

Міністерство освіти і науки України  
*Криворізький національний університет*

**В і с н и к**  
**Криворізького національного**  
**університету**

*Збірник наукових праць*

*Випуск 52*

**Кривий Ріг 2021**

Редакційна колегія: **Ступнік М.І.**, д-р техн. наук, проф. (головний редактор); **Моркун В.С.**, д-р техн. наук, проф., (заступник головного редактора); **Азарян А.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Бережний М.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Березовський А.А.**, д-р геол. наук, проф.; **Бровко Д.В.**, д-р техн. наук., доц.; **Вагонова О.Г.**, д-р економ. наук, проф.; **Варава Л.М.**, д-р економ. наук, проф.; **Вілкул Ю.Г.**, д-р техн. наук, проф.; **Гірін В.С.**, д-р техн. наук, проф.; **Губін Г.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Гурін А.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Євтехов В.Д.**, д-р геол.-мінерал. наук, проф.; **Жуков С.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Зінченко О.А.**, д-р економ. наук, проф.; **Зубов Д.А.**, д-р техн. наук, проф., Охрид, Македонія; **Ільяс Ніколає**, д-р техн. наук, проф., Петрошани, Румунія; **Калініченко В.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Кіяновський М.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Ковальчук В.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Коробко В.М.**, д-р техн. наук, проф., Массачусетс, США; **Купін А.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Лялюк В.П.**, д-р техн. наук, проф.; **Моркун Н.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Несмашний Є.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Нусінов В.Я.**, д-р економ. наук, проф.; **Олійник Т.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Перебудов В.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Решетілова Т.Б.**, д-р економ. наук, проф.; **Рудь Ю.С.**, д-р техн. наук, проф.; **Самуся В.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Сидоренко В.Д.**, д-р техн. наук, проф.; **Сінолиций А.П.**, д-р техн. наук, проф.; **Сінчук О.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Стороженко Л.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Титюк В.К.**, канд. техн. наук, доц.; **Ткаченко А.М.**, д-р економ. наук, проф.; **Толмачов С.Т.**, д-р техн. наук, проф.; **Турило А.М.**, д-р економ. наук, проф.; **Учитель О.Д.**, д-р техн. наук, проф.; **Федоренко П.Й.**, д-р техн. наук, проф.; **Шишкін О.О.**, д-р техн. наук, проф.

Збірник внесено до Переліку фахових видань, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт (наказ Міністерства освіти і науки України № 326 від 04.04.2018 р.).

Збірник індексується в наукометричних базах даних Google Scholar, Index Copernicus, Research Bible, Academic Keys та ін., в загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» (реферативний журнал «Джерело»). Збірник надсилається до Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського НАН України та провідних наукових бібліотек України.

У матеріалах збірника викладено результати досліджень у галузі технічних та економічних наук. Розглянуто шляхи підвищення ефективності промислових виробництв, автоматизації, контролю та керування технологічними процесами. Важливе місце займають питання енергозбереження, економіки, надійності охорони праці, техніки безпеки, захисту довкілля.

Наукові статті збірника рекомендовані науковим та інженерно-технічним працівникам, студентам, магістрантам й аспірантам.

Випуск № 52 рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет Вченою радою Криворізького національного університету (протокол № 9 від 27.04.2021 року).

Адреса редакції: Криворізький національний університет  
вул. Пушкіна, 44, Кривий Ріг, 50002,  
Тел. (056) 409 61 29  
web-сайт <http://visnykknu.com.ua>

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**Криворізький національний університет**  
**Вісник Криворізького національного університету**  
**Збірник наукових праць**

Засновано у 2003 р.

**Випуск 52, 2021**

Кривий Ріг  
Зміст

**ТЕХНІЧНІ НАУКИ**

|                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Ступнік М.І., Хівренко О.Я., Калініченко В.О., Калініченко О.В., Почтарьов О.В. Підвищення якості відбійки руди в умовах шахт ПрАТ «ЗЗРК» .....                                                                                   | 3   |
| Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Сердюк О. Ю., Гапоненко І. А., Гапоненко А. А. Вимірювання параметрів процесу магнітної сепарації на основі методів ультразвукового контролю .....                                       | 10  |
| Азарян А.А., Моркун В.С., Швець Д. В. , Черкасов О. В., Гриценко А.М., Швидкий О.В. Пошук шляхів зниження втрат і розубожнення залізорудної сировини .....                                                                        | 15  |
| Тарасов В.К., Воденнікова О.С., Воденнікова Л.В. Вибір раціональних засобів техногенної безпеки киснево-конвертерного процесу .....                                                                                               | 19  |
| Рибіна О. І. До питання організації та управління виробництвом прогнозних, проєктних та вишукувальних робіт із землеустрою .....                                                                                                  | 25  |
| Засельський В. Й., Пополов Д. В., Засельський І. В., Шепеленко М. І. Лабораторні дослідження технічної системи «роторийний змішувач-конвеєр» горизонтально-направленої дії .....                                                  | 29  |
| Манідіна Є.А., Белоконь К.В., Воденнікова О.С., Рижков В.Г., Троїцька О.О. Утилізація солянокислих відпрацьованих травильних розчинів прокатного виробництва .....                                                                | 35  |
| Нечаєв В.П., Рязанцев А.О., Реброва С.В., Лавриненко Д.О. Дослідження впливу технологічних факторів на стійкість ріжучого інструменту при плазово-механічній обробці .....                                                        | 39  |
| Латинин О.Є., Гацький А.К., Гацький І.А. Розроблення заходів безпеки при виникненні аварій у гірничих виробках шахт на основі використання мобільної камери повітропостачання .....                                               | 44  |
| Турило А.М., Турило А.А., Горська С.М. Проблеми економічного балансового розвитку в координатах «цінність людини (людиноцентризм) – справедливість – ефективність» .....                                                          | 49  |
| Кіянський М.В., Цивінда Н.І., Лаухіна Л.І., Чернявська О.В., Зуєв І.О. Аналіз призначення рівня режимів різання за виробничими критеріями .....                                                                                   | 54  |
| Пахомов В.І., Гірін І.В., Тищенко В.Ю., Жалдаченко О.А. Обґрунтування раціональної організації експлуатації кар'єрних автосамоскидів .....                                                                                        | 58  |
| Slipych O., Romanenko K., Kravtsova D., Bondar O. Installation of a stationary hydraulic hammer at a height .....                                                                                                                 | 64  |
| Сінчук І. О., Бойко С. М., Касаткіна І. В., Дозоренко О. В. Аспекти розвитку вітроенергетики в умовах залізрудних підприємств .....                                                                                               | 70  |
| Козакевич І.А., Будніков К.В. Предиктивна система керування трифазним інвертором напруги .....                                                                                                                                    | 77  |
| Кляцький В.І., Бугай Л.А., Запорожець Н.С. Експериментальні дослідження технологічних параметрів конусної дробарки мілкового дроблення .....                                                                                      | 82  |
| Долгих Л.В., Діхтяр С.В., Томашевська А.О. Використання методів цифрової фотограмметрії в умовах підземних гірничих виробок .....                                                                                                 | 85  |
| Козакевич І.А., Сіяно Р.В. Система керування мережевим модульним багаторівневим перетворювачем .....                                                                                                                              | 90  |
| Котов І.А. Інтелектуальна підтримка автоматизації диспетчерського керування енергосистемою з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів .....                                                                        | 95  |
| Гулівець О.А. , Попов С.О. , Бондарець А.О. , Олійник С.Ю. Деякі питання коригування експлуатаційних параметрів шахтного підйому за результатами обстеження і математичного моделювання армування вертикальних стволів шахт ..... | 104 |
| Суртаєв В.В. Підвищення загальної ефективності теплоенергетичних установок, теплових схем систем, пристроїв, установок утилізації тепла .....                                                                                     | 110 |
| Андрєєв Б.М., Бровко Д.В., Хворост В.В., Кононенко В.В., Романенко О.В. Обґрунтування річної продуктивності відпрацювання запасів Васіновського родовища .....                                                                    | 119 |
| Романов С.О., Грамм О.О., Савицький О.І. Модель системи керування процесами генерації активної та компенсації реактивної потужності на сонячних електростанціях .....                                                             | 124 |
| Кушнерьов І.П., Кривенко Ю.Ю., Максимов І.І. Утворення компенсаційного простору в лежачому боці похилого потужного покладу .....                                                                                                  | 131 |
| Бондар О.В. , Кравцова Д.Ю. , Чумак А.С. Порівняння САПР КОМПАС-3D і PowerSHAPE по критеріям функціональності та економічності.....                                                                                               | 136 |
| Мітрошин В. О., Шаповалова Н. Н., Доценко І. О., Світгарєєв Н. Х. Модель персоналізації рекомендацій контенту на основі колаборативної фільтрації .....                                                                           | 142 |
| Ткаченко Ю. Д., Швець Д. В. , Карабут Н.О. Аналіз методів виявлення та спостереження подвійних зірок .....                                                                                                                        | 146 |
| Замицький О.В., Гриценко О.В. Дослідження фотоелектричного перетворення з системою охолодження .....                                                                                                                              | 150 |
| Письменний С.В., Білюк В.О. Дослідження твердіючих сумішей при відпрацюванні Криворізького залізрудного родовища ім. Кірова ПрАТ «ЦГЗК» .....                                                                                     | 156 |
| Рудь Ю.С., Білоножко В.Ю. Розробка заходів енергозбереження в технологічному процесі виробництва агломерату на гірничо-збагачувальних комбінатах .....                                                                            | 164 |
| Худик М. В., Шаповалов В. А., Шепель О. Л. Засоби зниження виробничого шуму компресорних станцій шахт ...                                                                                                                         | 169 |
| Козакевич І.А., Котякова М.Г. Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії ....                                                                                                                    | 175 |
| <b>АНОТАЦІЇ ..</b>                                                                                                                                                                                                                |     |
| <i>А н о т а ц і ї</i> .....                                                                                                                                                                                                      | 180 |

УДК 622.274.3: 622.831

М.І. СТУПНІК, д-р техн. наук, проф., О.Я. ХІВРЕНКО, канд. техн. наук, доц.,  
В.О. КАЛІНІЧЕНКО, О.В. КАЛІНІЧЕНКО, доктори техн. наук, професори  
Криворізький національний університет  
О.В. ПОЧТАРЬОВ, «LAMET» s.r.o., Кошиці, Словаччина

## ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ВІДБІЙКИ РУДИ В УМОВАХ ШАХТ ПрАТ «ЗЗРК»

Досліджені питання кореляції параметрів буровибухових робіт (БВР) при підземній розробці унікального родовища залізних руд Запорізького залізорудного комбінату, руда якого має включення міцних магнетитових кварцитів. Існуюча на підприємстві методика розрахунку параметрів БВР має бути удосконалена для урахування гетерогенності рудного масиву.

**Мета.** Удосконалення технології буровибухових робіт за рахунок уточнення закономірностей розподілу енергетичних витрат вибухових речовин при відбійці корисних копалин з диференційованими фізико-механічними властивостями.

**Методи дослідження.** У якості основних методів досліджень використані аналітичні методи розрахунків параметрів буровибухових робіт, експериментальні методи дослідження промислових характеристик багатих залізних руд та магнетитових кварцитів родовища шахти «Експлуатаційна» ПрАТ «ЗЗРК», порівняльні дослідження існуючих вибухових речовин різної енергетичної потужності.

**Наукова новизна.** Визначені нові закономірності фрагментації корисних копалин при відбійці складноструктурних покладів багатих залізних руд з включеннями міцних магнетитових кварцитів. Встановлені нові залежності енергетичної насиченості масиву різної міцності руд при використанні різнотипних вибухових речовин.

**Практична значимість.** Визначені закономірності дали змогу удосконалити параметри буровибухових робіт в умовах родовища багатих залізних руд шахти «Експлуатаційна» ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат».

**Результати.** На основі виконаних досліджень удосконалена методика визначення параметрів буровибухових робіт, які дозволяє враховувати фізико-механічні характеристики багатих залізних руд і магнетитових кварцитів та рекомендувати вибухові речовини з оптимальними енергетичними показниками. У якості прикладу виконано розрахунки для очисного блоку 1/23с гор. 710-840 м шахти «Експлуатаційна» ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат», які дозволяють поліпшити техніко-економічні показники видобутку руди в цілому по блоку.

**Ключові слова.** підземна розробка, залізні руди різної міцності, параметри буровибухових робіт.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-3-10

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** При підземній розробці залізорудних родовищ великого значення набувають питання прийняття оптимальних технологічних рішень при проектуванні, плануванні та організації гірничовидобувного виробництва.

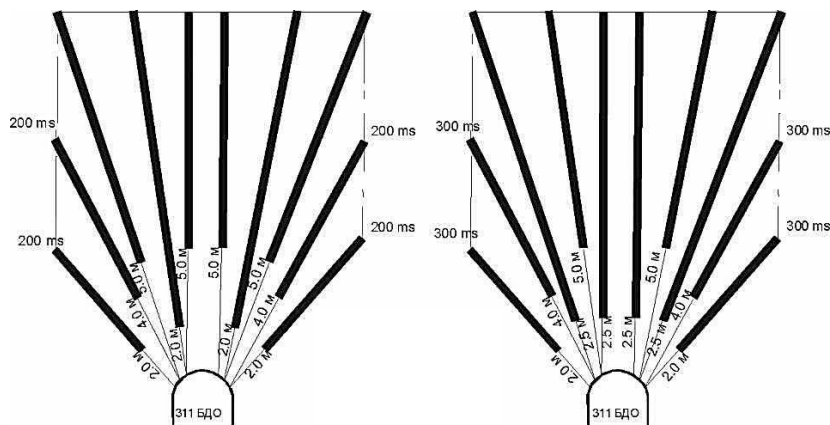
Особливо важливе значення ці питання мають для поліпшення техніко-економічних показників очисної виїмки, ефективність якої значною мірою визначається якістю подрібнення рудного масиву буровибуховим способом.

При відбійці руди в очисних камерах і панелях при системах розробки, що застосовуються на шахтах Запорізького і Криворізького залізорудних комбінатів, використовуються переважно віяла глибоких свердловин діаметром 89-105 мм. Головним недоліком віялового розташування свердловин є нерівномірне розташування вибухових речовин (ВР) у віялі. Так, біля виробок, з яких пробурені віяла глибоких свердловин, масив перенасичений вибуховими речовинами, в той час як на периферії контуру відбійки насиченість масиву вибухівкою є значно меншою. Недозаряджання свердловин та використання інертної забійки дещо робить рівномірною енергетичну насиченість рудного масиву, але все ж таки розбіжність між максимумом і мінімумом питомого насичення рудного масиву вибухівкою залишається вкрай високою (рис. 1). Такі варіації питомих витрат ВР, ускладнені відхиленнями свердловин від проектних траєкторій знову ж таки в основному в периферійних зонах віял приводять до нерівномірної фрагментації відбитої руди, значних обсягів її вторинного подрібнення.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Бурові та вибухові роботи є одними з основних технологічних процесів видобутку корисних копалин. Вони значною мірою впливають на наступні процеси у технологічному ланцюгу, стан промислової та екологічної безпеки гірничодобувного підприємства, економічну ефективність його роботи.

Світова практика однозначно визначає пріоритети сучасних технологій буровибухових робіт, виділяючи, насамперед, їх економічність, безпеку і екологічну надійність [7]. Суттєвою

проблемою для підвищення ефективності буровибухових робіт є визначення параметрів відбиття рудного масиву, неоднорідного за своїми фізико-механічними характеристиками. Такі умови критерій, зокрема для шахти «Експлуатаційна» Запорізького залізорудного комбінату, де багаті руди середньої міцності відбиваються валовим способом разом з прошарками магнетитових кварцитів з використанням однакових параметрів БВР. Звичайно, що такий підхід обумовлює значний вихід негабаритних шматків та погіршення умов випуску відбитої, але неякісно фрагментованої руди [2-4].



**Рис. 1.** Застосування недозаряду та використання інертної забійки у віялах глибоких свердловин

Крім того, необхідно виділити пов'язану з контекстом, який досліджується, задачу вибору вибухових речовин, потужність яких дозволяє забезпечити рівномірне фрагментування рудного масиву в проектних контурах відбійки.

Загальна характеристика найбільш широко використовуються ВР в розвинутих гірничодобувних країнах приведена в роботах [8, 9]. При цьому слід зазначити, що і з загальних витрат ВР по Україні найбільшу частину (40,0%) становить грамоніт 79/21; 3,6% - грамоніт 79/21 ГС (водостійкий); 31,6 5% - амоніти [10]. На сьогодні одним з провідних підприємств в Україні з виробництва вибухових речовин є Державне підприємство "Науково-виробниче об'єднання" Павлоградський хімічний завод "(ДП" НВО "ПХЗ") [11].

Серед особливостей технології БВР деякі автори [1, 5, 14] вказують на те, що «зі збільшенням діаметра заряду знижуються так звані хімічні втрати (неповнота реакції) при детонації і параметри вибуху все в більшій мірі визначаються потенційною енергією вибуху». З цього випливає, що зменшення діаметра свердловинних зарядів з одного боку сприяє поліпшенню якості дроблення порід, а з іншого - може негативно позначитись на режимі їх детонації і корисній праці вибуху. Особливо актуально це для підземних гірничодобувних підприємств, які використовують при буровибухових роботах свердловини діаметром 75 – 85 мм.

Серед іншого, як відзначають автори [12], при вибухових роботах необхідно виключити використання ВР, незбалансованих по кисневому балансу або з нестабільним складом компонентів, особливо складних гірничо-геологічних умовах застосування ВР в свердловинах (тріщинуватість, обводненість, хімічні реакції з середовищем та ін.). Тріщинуватість і обводненість порід сприяють відмовам при підриванні гранульованих ВР і водомістких ВР з малою в'язкістю, що призводить до високої ймовірності утворення в продуктах вибуху великої кількості окису вуглецю і сажистих частинок або окислів азоту [13]. Тому існуюча на шахтах Запорізького залізничного комбінату методика розрахунку параметрів БВР потребує удосконалення.

**Постановка задачі.** На основі виконаного аналізу сформульовано мету досліджень, яка полягає в удосконаленні технології буровибухових робіт за рахунок уточнення закономірностей енергетичного насичення вибуховими речовинами масиву корисних копалин з диференційованими фізико-механічними характеристиками.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було вирішити наступні задачі:

дослідження промислових характеристик багатих залізних руд та магнетитових кварцитів родовища шахти «Експлуатаційна» ПрАТ «ЗЗРК»;

обґрунтування застосування вибухових речовин з різними енергетичними показниками;

визначення та оптимізація параметрів буровибухових робіт для умов шахти «Експлуатаційна».

**Викладення матеріалу та результати.** При розробці потужних родовищ Запорізького залізорудного комбінату широке поширення отримала поверхово-камерна система розробки з наступною закладкою відпрацьованого очисного простору. На шахті «Експлуатаційна» для оптимізації параметрів БВР була запропонована камера 1/23с гор. 710-840 м. Особливістю даної камери є те, що значна частина глибоких свердловин була пробурена в межах двох різних за площею ділянок очисного блоку. Перша ділянка представляла собою ділянку мартитової руди з міцністю  $f = 8-10$ , друга - ділянку (включення) магнетитових кварцитів з міцністю  $f = 14-15$ . У табл. 1 перераховані віяла глибоких свердловин за трьома основними буровими горизонтами.

Таблиця 1

Віяла глибоких свердловин за трьома основними буровими горизонтами

| Кількість віял                           | Горизонт | Віяла по руді, по кварцитах           |
|------------------------------------------|----------|---------------------------------------|
| По руді, по кварцитах – 5<br>Всього – 17 | 740 м    | B2юг; B3юг; B1в/б; B2в/б; B3в/б       |
| По руді, кварцитах – 6<br>Всього – 17    | 775 м    | B2юг; B1юг; B4юг; B1в/б; B3в/б; B3в/б |
| По руді, кварцитах – 6<br>Всього – 13    | 810 м    | B2юг; B1юг; B3юг; B4юг; B2в/б; B3в/б  |

У камері 1/23с гор. 710 – 840 м маємо 47 віял на 3-х поверхах, з них 17 з прошарками магнетитових кварцитів (36,1%).

У камері 1/23с гор. 710–840 були прийняті для розрахунків віяло K2 в/б гор. 775 м і віяло B5 в/б гор. 810 м.

*Розрахунок параметрів БВР віяла K2 в/б гор. 775 м.* Рудний поклад у площині віяла KB2 в/б гор. 775 м представлено ділянкою мартитової руди міцністю  $f = 8-10$  і ділянкою магнетитових кварцитів міцністю  $f = 14-15$ . У віялі відбурено 22 свердловини діаметром 89 мм. Загальна довжина свердловин – 326 м. Згідно з проектом зарядці підлягають 228 м свердловин, що відповідає недозаряду 30%. В якості ВР використовується грамоніт 79–21В. У проекті зазначено питома місткість свердловин  $U = 6,84 \text{ г/см}^3$ , що відповідає густині заряджання  $\rho = 1,07$ . Питома вага рудної маси  $\gamma_p = 3,96 \text{ т/м}^3$ .

На рис. 2 представлено схеми розташування глибоких свердловин у віялах KB2 в/б гор. 775м та віялі B5 в/б гор. 810м, на підґрунті яких здійснюємо подальші розрахунки параметрів БВР для цих віял.

Так, площа віяла KB2 в/б гор. 775 м складе,  $\text{м}^2$

$$S_g = h_g \cdot A_g = 34,7 \cdot 14 = 485,$$

де  $h_g$  – висота віяла глибоких свердловин по руді, м;  $A_g$  – ширина віяла глибоких свердловин по руді, м.

|       | Віяла глибоких свердловин |    |    |    |    |    | Σ          |
|-------|---------------------------|----|----|----|----|----|------------|
|       | 1                         | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  |            |
| $h_g$ | 70                        | 72 | 68 | 68 | –  | –  | 278/4=34,7 |
| $A_g$ | 27                        | 28 | 30 | 26 | 30 | 28 | 169/6=14   |

Площа віяла по магнетитовим кварцитах,  $\text{м}^2$

$$S_{\kappa g} = h_{cp1} \cdot A_{cp1} + h_{cp2} \cdot A_{cp2} = 12,4 \cdot 14 + 8,5 \cdot 11,5 = 272.$$

Без урахування площі бурової виробки:  $S_{\kappa g} = 268 \text{ м}^2$ ,

де  $h_{g1}$  – висота віяла глибоких свердловин по руді, м;  $A_{g1}$  – ширина віяла глибоких свердловин по руді, м;  $h_{g2}$  – висота віяла глибоких свердловин по магнетитовим кварцитах, м;  $A_{g2}$  – ширина віяла глибоких свердловин по магнетитовим кварцитах, м.

|          | Віяла глибоких свердловин |    |    |    |  | Σ         |
|----------|---------------------------|----|----|----|--|-----------|
|          | 1                         | 2  | 3  | 4  |  |           |
| $h_{g1}$ | 22                        | 27 | 25 | –  |  | 74/3=12,4 |
| $A_{g1}$ | 22                        | 30 | 30 | 28 |  | 110/4=14  |
| $h_{g2}$ | 20                        | 20 | 17 | 9  |  | 66/4=8,5  |
| $A_{g2}$ | 18                        | 26 | 25 | –  |  | 69/3=11,5 |

Площа віяла по мартитовій руді, м<sup>2</sup>

$$S_p = S_{\kappa} - S_{\kappa\kappa} = 481 - 268 = 213.$$

Середній показник вибуховості рудної маси на ділянці мартитової руди міцністю  $f = 9$  дорівнює  $C_{0cp} = 29,26$ .

Середній показник вибуховості рудної маси на ділянці магнетитових кварцитів міцністю  $f = 14-15$  становитиме

$$C_{0cp} = (C_{0f14} + C_{0f15}) / 2 = (23,41 + 22,79) / 2 = 23,1.$$

В цілому по віялу середній показник вибуховості рудної маси, представленої ділянками покладу мартитової руди і магнетитових кварцитів може бути визначений наступним чином

$$C_{0cp\kappa} = (C_{0cp1} \cdot S_p + C_{0cp2} \cdot S_{\kappa\kappa}) / S_{\kappa} = (29,26 \cdot 213 + 23,1 \cdot 268) / 481 = 25,82.$$

Тоді лінія найменшого опору, м

$$W_{f0} = K_n \cdot C_{0cp3} \cdot d_{c\kappa} \cdot \sqrt{p} \cdot \delta = 0,9 \cdot 25,82 \cdot 0,089 \cdot \sqrt{1,07} \cdot 1 = 2,14,$$

де  $K_n = 0,9 \dots 1,0$  – коефіцієнт, який враховує неоднорідність масиву гірських порід;  $d$  – діаметр свердловини, м;  $\delta$  – коефіцієнт відносної роботоzдатності ВР.

Відстань між свердловинами, м

$$\begin{aligned} a_f &= m \cdot W_f; \\ m &= 0,019 \cdot C_{0cp3} + 0,403 = 0,490 + 0,403 = 0,893; \\ a_f &= 0,893 \cdot 2,14 = 1,91. \end{aligned}$$

Питомі витрати ВР, виходячи із місткості свердловин, кг/т:

$$\text{розрахункові: } q_f = (2 \cdot K_3 \cdot U) / (a_f \cdot W_f \cdot \gamma_p) = (2 \cdot 0,8 \cdot 6,84) / (1,91 \cdot 2,14 \cdot 3,96) = 0,676;$$

$$\text{проектні: } q_f = (2 \cdot K_3 \cdot U) / (a_f \cdot W_f \cdot \gamma_p) = (2 \cdot 0,8 \cdot 6,84) / (2,5 \cdot 3,0 \cdot 3,96) = 0,368.$$

Віяло KB2 в/б гор. 775 м, де  $f = 9$ ;  $C_{0cp} = 29,26$ ;  $p = 1,07$ ;  $I = 1$ ;  $U = 6,84$  г/см<sup>3</sup>.

Тоді  $W_f$  при щільності заряджання свердловин  $p = 1,07$  буде дорівнювати, м

$$W_f = K_n \cdot C_{0cp1} \cdot d_{c\kappa} \cdot \sqrt{1,07} \cdot \delta = 0,9 \cdot 29,26 \cdot 0,089 \cdot \sqrt{1,07} \cdot 1 = 2,42.$$

Відстань між свердловинами, м

$$\begin{aligned} a_f &= m \cdot W_f; \\ m &= 0,019 \cdot C_{0cp1} + 0,403 = 0,019 \cdot 29,26 + 0,403 = 0,958; \\ a_f &= 0,958 \cdot 2,42 = 2,32. \end{aligned}$$

Питомі витрати ВР по місткості свердловин, кг/т:

$$\text{розрахункові: } q_f = (2 \cdot K_3 \cdot U) / (a_f \cdot W_f \cdot \gamma_p) = (2 \cdot 0,8 \cdot 6,84) / (2,32 \cdot 2,42 \cdot 3,96) = 0,492;$$

$$\text{проектні: } q_f = (2 \cdot K_3 \cdot U) / (a_f \cdot W_f \cdot \gamma_p) = (2 \cdot 0,8 \cdot 6,84) / (2,48 \cdot 3,0 \cdot 3,96) = 0,371.$$

Розрахунковий обсяг мартитової руди, відбитий віялом KB2 в/б гор. 775 м складе, т

$$T_{p1} = S_p \cdot W_f \cdot \gamma_p = 213 \cdot 3,0 \cdot 3,96 = 2530.$$

Проектний обсяг мартитової руди, відбитий віялом KB2 в/б гор. 775 м складе, т

$$T_{p2} = S_p \cdot W_f \cdot \gamma_p = 213 \cdot 2,42 \cdot 3,96 = 2041.$$

Відповідно розрахункова та проектна кількість ВР, яка буде використана для обвалення мартитової руди даним віялом складе, кг

$$Q_{BB1} = T_{p1} \cdot q_f = 2530 \cdot 0,492 = 1244;$$

$$Q_{BB2} = T_{p2} \cdot q_f = 2041 \cdot 0,492 = 1004.$$

Віяло KB2 в/б гор. 775 м,  $C_{0cp} = 23,1$ ;  $p = 1,07$ ;  $\delta = 1$ ;  $U = 6,84$  г/см<sup>3</sup>.

Визначаємо  $W_{f0}$ , м

$$W_f = K_n \cdot C_{0cp} \cdot d_{c\kappa} \cdot \sqrt{1,07} \cdot I = 0,9 \cdot 23,1 \cdot 0,089 \cdot \sqrt{1,07} \cdot 1 = 1,91.$$

Визначаємо відстань між свердловинами, м

$$\begin{aligned} a_f &= m \cdot W_f; \\ m &= 0,019 \cdot C_{0cp1} + 0,403 = 0,019 \cdot 23,1 + 0,403 = 0,842. \\ a_f &= 0,842 \cdot 1,91 = 1,61. \end{aligned}$$

Питомі витрати ВР по місткості свердловин, кг/т

$$\text{розрахункові: } q_f = (2 \cdot K_3 \cdot U) / (a_f \cdot W_f \cdot \gamma_p) = (2 \cdot 0,8 \cdot 6,84) / (1,61 \cdot 1,91 \cdot 3,96) = 0,898;$$

$$\text{проектні: } q_f = (2 \cdot K_3 \cdot U) / (a_f \cdot W_f \cdot \gamma_p) = (2 \cdot 0,8 \cdot 6,84) / (2,48 \cdot 3,0 \cdot 3,96) = 0,371.$$

Розрахунковий обсяг магнетитових кварцитів, відбитий віялом KB2 в/б гор. 775 м складе, т

$$T_{\kappa\kappa} = S_{\kappa\kappa} \cdot W_f \cdot \gamma_p = 268 \cdot 3,0 \cdot 3,96 = 3183.$$

Проектний обсяг магнетитових кварцитів, відбитий віялом KB2 в/б гор. 775 м складе, т

$$T_{\kappa\kappa} = S_{\kappa\kappa} \cdot W_f \cdot \gamma_p = 268 \cdot 1,91 \cdot 3,96 = 2027.$$

Відповідно розрахункова та проектна кількість ВР, яка буде використана для обвалення магнетитових кварцитів даним віялом складе, кг

$$Q_{BB1} = T_{кв1} \cdot q_f = 3183 \cdot 0,898 = 2858;$$

$$Q_{BB2} = T_{кв2} \cdot q_f = 2027 \cdot 0,898 = 1820.$$

Сумарний обсяг рудної маси, відбитий віялом KB2 в/б гор. 775 м представлений мартитовою рудою і магнетитовими кварцитами складе, т

$$T_{61} = T_p + T_{кв} = 2530 + 3183 = 5713.$$

Відповідно сумарна кількість ВР, яка буде використана для обвалення руди і магнетитових кварцитів даним віялом складе, кг

$$Q_s = Q_{1p} + Q_{1кв} = 1244 + 2858 = 4102;$$

$$q_{f6} = 0,718 \text{ кг/т};$$

$$q_{fp} = 0,695 \text{ кг/т}.$$

Результати виконаних розрахунків по визначенню питомих витрат ВР за місткістю вибурених віял свердловин приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати розрахунків питомих витрат ВР за місткістю вибурених віял свердловин

| Показники                                                         | Руда  | Кварцити | Руда + кварцити | Проект |
|-------------------------------------------------------------------|-------|----------|-----------------|--------|
| Коефіцієнт міцності рудних порід – $f$                            | 9     | 14,5     | 9-14,5          | –      |
| Діаметр глибоких свердловин – $d_{св}$ , мм                       | 89    | 89       | 89              | 89     |
| Об'ємна вага рудного масиву – $\gamma_p$ , т/м <sup>3</sup>       | 3,96  | 3,96     | 3,96            | 3,96   |
| Площина віяла глибоких свердловин – $S_6$ , м <sup>2</sup>        | 213   | 268      | 481             | 481    |
| Кількість ВР в 1 м свердловини – $U$ , г/см <sup>3</sup>          | 6,84  | 6,84     | 6,84            | 6,84   |
| Коефіцієнт роботоздатності – $\eta$ , доли од.                    | 1     | 1        | 1               | 1      |
| Показник підризаємості гірських порід – $C_0$                     | 29,26 | 23,10    | 25,82           | –      |
| Коефіцієнт неоднорідності гірських порід – $K_n$                  | 0,9   | 0,9      | 0,9             | 0,9    |
| Коефіцієнт заповнення свердловин – $K_z$                          | 0,8   | 0,8      | 0,8             | 0,8    |
| Лінія найменшого опору – $W$ , м                                  | 2,42  | 1,91     | 2,14            | 3,0    |
| Відстань між кінцями свердловин – $a$ , м                         | 2,32  | 1,61     | 1,91            | 2,5    |
| Питомі витрати ВР за місткістю свердловини – $q$ , кг/т           | 0,492 | 0,898    | 0,676           | 0,371  |
| Щільність заряджання свердловин – $P$ , г/см <sup>3</sup>         | 1,07  | 1,07     | 1,07            | 1,07   |
| Коефіцієнт зближення свердловинних зарядів – $m$                  | 0,958 | 0,842    | 0,893           | –      |
| Об'єм відбитої рудної маси по виділенім ділянкам віял – $Q_s$ , т | –     | –        | –               | –      |

Розрахунок параметрів БВР віяла В5 в/б гор. 810 м. Рудний поклад у площині віяла В5 в/б гор 810 м представлений мартитовою рудою міцністю  $f = 8 - 10$ . У віялі відбурено 38 свердловин діаметром  $d = 89$  мм. Загальна довжина відбурених свердловин 598 м. До зарядки підлягає, з урахуванням недозаряду свердловин (30%) – 419 м. В якості ВР використовується грамоніт 79-21В. Вміст ВР в 1м свердловини –  $U = 6,84$  кг. Це можливо при густині зарядки  $p = 1,07$ . Питома вага руди  $\gamma = 3,96$  т/м<sup>3</sup>. Середній показник вибуховості мартитової руди  $C_{0cp} = 29,26$  при  $f = 9$ . Площа віяла В5 в/б гор. 810 м становить, м<sup>2</sup>

$$S_6 = h_{cp} \cdot A_{cp} = 37 \cdot 25 = 925.$$

Лінія найменшого опору  $W_{f6}$  при щільності зарядки свердловин  $p = 1,07$  складе, м

$$W_f = K_n \cdot C_{0cp1} \cdot d_{св} \cdot \sqrt{1,07} \cdot 1 = 0,9 \cdot 29,26 \cdot 0,089 \cdot \sqrt{1,07} \cdot 1 = 2,42.$$

|          | Віяла глибоких свердловин |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|----------|---------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|          | 1                         | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | Σ  |
| $h_{cp}$ | 75                        | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | –  | –  | –  | 37 |
| $A_{cp}$ | 46                        | 49 | 50 | 50 | 50 | 50 | 52 | 54 | 48 | 25 |

Відстань між свердловинами, м

$$a_f = m \cdot W_f;$$

$$m = 0,019 \cdot C_{0cp1} + 0,403 = 0,019 \cdot 29,26 + 0,403 = 0,958;$$

$$a_f = 0,958 \cdot 2,42 = 2,32.$$

Питомі витрати ВР по місткості свердловин, кг/т:

$$\text{розрахункові: } q_f = (2 \cdot K_z \cdot U) / (a_f \cdot W_f \cdot \gamma_p) = 10,94 / 22,23 = 0,492;$$

$$\text{проектні: } q_f = (2 \cdot K_z \cdot U) / (a_f \cdot W_f \cdot \gamma_p) = (2 \cdot 0,8 \cdot 6,84) / (2,45 \cdot 3,0 \cdot 3,96) = 0,376.$$

Відбитий запас рудної маси віялом В5 в/б гор. 810 м за вирахуванням площ двох бурових виробок, які виходять в площині віяла  $S_6 - S_{сир} = 925 - 2 \cdot 3 \cdot 6 \cdot 4,4 = 900$  м<sup>2</sup> становитиме, т

$$T_6 = 900 \cdot W_f \cdot \gamma_f = 900 \cdot 2,42 \cdot 3,96 = 8625.$$

Середній показник недозаряду глибоких свердловин складає 30%. В таблицях 3, 4 представлена динаміка зміни питомих витрат ВР залежно від величини недозаряду для різного запасу руди на віяло глибоких свердловин.

Запас руди на віяло глибоких свердловин становить  $T_6 = 8625$  т.

Таблиця 3

Динаміка зміни питомих витрат ВР при зміні величини недозаряду

| Недозаряд свердловин, % | Довжина заряду в свердловинах, м | Питомі витрати ВР по місткості свердловин, кг/т |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| 30                      | 419                              | 0,332                                           |
| 25                      | 448                              | 0,355                                           |
| 20                      | 478                              | 0,379                                           |
| 15                      | 508                              | 0,403                                           |
| 10                      | 538                              | 0,426                                           |
| 0                       | 598                              | 0,474                                           |

Запас руди на віяло глибоких свердловин становить  $T_6 = 8625$  т.

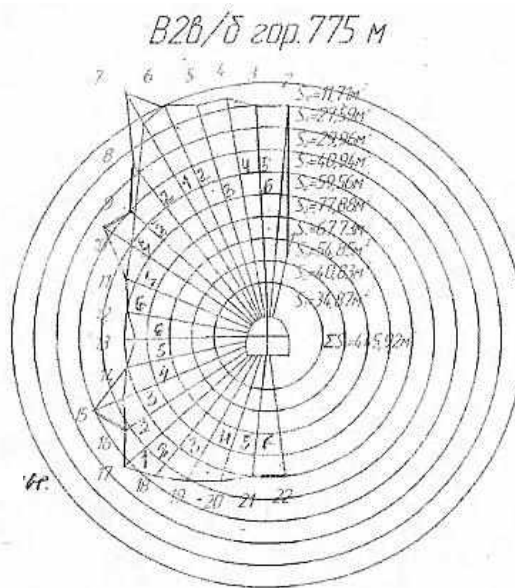
Таблиця 4

Динаміка зміни питомих витрат ВР при зміні величини недозаряду

| Недозаряд свердловин, % | Довжина заряду в свердловинах, м | Питомі витрати ВР по місткості свердловин, кг/т |
|-------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|
| 30                      | 419                              | 0,268                                           |
| 25                      | 448                              | 0,286                                           |
| 20                      | 478                              | 0,306                                           |
| 15                      | 508                              | 0,325                                           |
| 10                      | 538                              | 0,344                                           |
| 0                       | 598                              | 0,383                                           |

Одним з основних методів інтенсифікації фрагментації руди при вибуховому руйнуванні руд є раціональна черговість підривання свердловинних зарядів в часі і просторі. В даний час на шахті «Експлуатаційна» застосовується миттєве підривання свердловинних зарядів у віялах.

Пропонується в камері 1/23с гор. 775 м застосувати метод короткоуповільненого підривання свердловинних зарядів в віялах вибурених свердловин при відпрацюванні рудних покладів поверхово-камерної системою розробки з наступною закладкою камер, яка набула широкого поширення на даній шахті. На рис. 2 представлено схему розташування свердловини віяла KB2 в/б гор. 775 м, на якій вказана черговість підривання кожної свердловини при клиновому способі підривання свердловин.



**Рис. 2.** Схема розташування свердловин віяла KB2 в/б гор. 775 м та черговість підривання кожної свердловини у віялі при клиновому способі підривання

В табл. 5 представлено енергетичну насиченість гірського масиву вибуховою речовиною на виділених перерізах. В якості характеристики енергетичної насиченості використовувався показник питомих витрат ВР на відбійку. Розрахункові показники:  $W_f = 3$  м;  $a_f = 2,5$  м.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Згідно поставленої мети в роботі були вирішені наступні задачі. Досліджено промислові характеристики багатих залізних руд та магнетитових кварцитів родовища шахти «Експлуатаційна» ПрАТ «ЗЗРК». Обґрунтовано застосування вибухових речовин з різними енергетичними показниками. Визначено та оптимізовано параметри буровибухових робіт для умов шахти «Експлуатаційна».

Виконаними дослідженнями встановлено, що існуючі проектні розрахунки параметрів БВР у віялах KB2 в/б гор. 775 м та віялі B5 в/б гор. 810 м не враховують фізико-механічних характеристик гірського масиву, який складений багатими мартитовими рудами міцністю  $f = 9$  та магнетитовими кварцитами міцністю  $f = 14-15$ . Використання однакових параметрів при відбійці такого складноструктурного поклада призводить до незадовільних показників відбійки, а саме значного виходу негабаритних кусків. Виконаними дослідженнями удосконалена методика вибору параметрів БВР для складноструктурних покладів шахти «Експлуатаційна» ПрАТ «ЗЗРК».

Для дослідження основних параметрів БПР і можливості застосування методу коротко-уповільненої підривання зарядів свердловин в камері 1/23с гор. 710-840 м обрані два віяла глибоких свердловин віяло KB2 в/б гор. 775 м і віяло B5 в/б гор. 810 м. Виконані дослідження показали, що при взаємодії двох і більше одночасно підриваємих подовжених зарядів відбувається складання їх полів напружень і значне підвищення концентрації напружень по площині розташування глибоких свердловин, що значно перевищує величину напружень в інших рівновіддалених від заряду точках рудного масиву.

Встановлено, що коротко-уповільнений спосіб підривання свердловинних зарядів у порівнянні з миттєвим (одночасним) способом в умовах камери 1/23с гор. 710-840 м дозволяє знизити сейсмічний ефект у блоці, підвищити інтенсивність дроблення руди за рахунок збільшення часу дії вибуху на рудний масив, утворити додаткові площини оголення, що дозволяє досягти зустрічного зіткнення кусків руди та додаткового подрібнення.

В цілому зменшуються питомі витрати глибоких свердловин та покращується якість подрібнення руди. Висока якість подрібнення, в свою чергу, дозволяє збільшити продуктивність праці на випуску і доставці руди, що сприяє підвищенню інтенсивності відпрацювання запасів, а отже, поліпшенню показників діяльності шахти в цілому.

### Список літератури

1. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Федько М.Б., Калініченко О.В., Музика І.О., Письменний С.В. Удосконалення методики визначення параметрів буровибухових робіт з урахуванням напружено-деформованого стану масиву при його обваленні на похиле оголення / Гірничий вісник: наук.-техн. збірник. Кривий Ріг, 2017. Вип. 102. С. 47–53.
2. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Калініченко О.В., Грищенко М.А. Випуск руди з малорухомої зони на лежачому боці поклада похилим очисним вибоєм / Гірничий вісник: Науково-технічний збірник. Кривий Ріг, 2018. Вип. 104. С.3–8.
3. Ступнік М.І., Калініченко О.В. Хівренко О.Я. Грищенко М.А., Теляпньов В.О. Розробка та дослідження технології відпрацювання запасів блоків із застосуванням комбінованого високоефективного випуску руди / Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг. – 2016. – Вип. 43. – С.3–7.
4. Ступнік М.І., Калініченко В.О., Тарасютін В.М., Хівренко О.Я., Косенко А.В. Підвищення ефективності технологічного процесу випуску і доставки руди на базі використання самохідної навантажувально-доставочної техніки в складних геомеханічних умовах шахт Кривбасу / Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг. – 2016. – Вип. 41. – С.141–147.

Таблиця 5  
Енергетична насиченість гірського масиву вибуховою речовиною

| Переріз, м <sup>2</sup> | Обсяг відбитої руди, т | Сумарний заряд свердловини, кг | Питомі витрати ВР, кг/т |
|-------------------------|------------------------|--------------------------------|-------------------------|
| $S_1 = 34,87$           | 414                    | 0                              | 0                       |
| $S_2 = 40,83$           | 485                    | 300                            | 0,618                   |
| $S_3 = 54,85$           | 651                    | 294                            | 0,452                   |
| $S_4 = 67,73$           | 804                    | 287                            | 0,357                   |
| $S_5 = 77,88$           | 925                    | 280                            | 0,303                   |
| $S_6 = 59,56$           | 707                    | 198                            | 0,281                   |
| $S_7 = 40,94$           | 486                    | 164                            | 0,337                   |
| $S_8 = 29,96$           | 355                    | 109                            | 0,303                   |
| $S_9 = 27,59$           | 327                    | 82                             | 0,250                   |
| $S_{10} = 11,71$        | 139                    | 34                             | 0,246                   |

5. Ступник Н.И., Калинин В.А., Федько М.Б., Мирченко Е.Г. Влияние напряженно-деформированного состояния массива горных пород на технологию отбойки урановых руд / Научный вестник Национального горного университета. – Днепропетровск. – 2013. – № 2. – С. 11-16.
6. Мельников Н.В. Повышение полезной работы взрыва при отбойке полезных ископаемых / Взрывное дело, № 54/11 - М.: Недра, 1964. - С. 7-34.
7. Ефремов Э.И. Опыт использования простейших ВВ на карьерах Украины / Украинский союз инженеров горняков. Информационный бюллетень №4, 2010, с. 9-11.
8. Совершенствование ассортимента промышленных взрывчатых веществ в зарубежных странах / В.М.Скоробагатов, Б.Н. Кукиб, З.Г. Поздняков и др. – Взрывное дело, 87/44. –М., Недра, 1985. –С. 174-182.
9. Демидюк Г.П., Дубнов Л.В., Стоянов В.В. и др. и др. Техника и технология взрывных работ на рудниках. – М., Недра, 1978. -238с.
10. Захаренков Е.И. Состояние взрывного дела на Украине. Государственный надзор в сфере обращения со взрывчатыми материалами промышленного назначения / Украинский союз инженеров горняков. Информационный бюллетень №4, 2010. - С. 3-8.
11. <http://www.ukr-prom.com/nomid3398/>.
12. Шиман Л.Н., Устименко Е.Б., Кириченко А.Л., Подкаменная Л.И. Оценка влияния условий применения смесевых вв на их взрывчатые характеристики при проведении взрывных работ / Сучасні ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва. Випуск 1 /2010(5), с. 60-68.
13. Факторы безопасного применения водосодержащих взрывчатых веществ с продуктами утилизации твердого ракетного топлива / Е.Б. Устименко, Л.Н. Шиман, Л.И. Подкаменная // Вестник КГПУ им. Михаила Островского - 2008 - №5 (часть 2) - с. 158 - 161.
14. Дубнов Л.В. Современное состояние и перспектива развития взрывчатых веществ для горной промышленности //Сб. Взрывное дело, № 49/6, М.: Недра, 1962. - С. 5-17.

УДК 622.7: 534

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори технічних наук, професори,  
В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., О. Ю. СЕРДЮК, асист.,  
І. А. ГАПОНЕНКО, А. А. ГАПОНЕНКО, наукові співробітники  
Криворізький національний університет

## ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ МАГНІТНОЇ СЕПАРАЦІЇ НА ОСНОВІ МЕТОДІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЮ

**Метою дослідження** є розроблення методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи (продуктивності, концентрації твердої фази, вмісту контрольного класу крупності часток твердої фази), який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора.

**Методи дослідження.** У роботі використані наступні методи: аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду; методи аналітичного конструювання та комп'ютерного моделювання; методи чисельного моделювання для синтезу та аналізу математичної моделі; методи математичної статистики і теорії ймовірності для обробки результатів експериментів.

**Наукова новизна** полягає в удосконаленні методу комплексного ультразвукового вимірювання характеристик потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора. Запропонований метод дозволяє оцінити продуктивність, концентрацію часток твердої фази і вміст контрольного класу крупності часток твердої фази.

**Практичне значення** полягає в тому, що використання запропонованого підходу дозволяє отримати додаткову інформацію про параметри потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора.

**Результати.** Розрахунок характеристичної функції дисперсії ультразвукового сигналу, що пройшов через контрольований об'єм пульпи, на основі вимірювання початкової інтенсивності та інтенсивності прийнятого сигналу дозволяє визначити вміст контрольного класу крупності часток твердої фази залізорудної пульпи. Для реалізації методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора доцільно застосовувати джерело хвиль Лемба, що працює у режимі широкої діаграми спрямованості і підключене за V-подібною схемою. Зазначене дозволяє створити пучок когерентних хвиль, які поширюються як у стінці ємності (робочої камери сепаратора), так і у вимірюваному середовищі (залізорудній пульпі). Отримані з використанням запропонованого методу ультразвукових вимірювань дані дозволяють створити математичну модель процесу магнітної сепарації на основі рівняння Розіна-Раммлера..

**Ключові слова:** магнітна сепарація, ультразвукові вимірювання, залізорудна пульпа, математична модель

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-10-15

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** При переробленні залізорудної сировини здійснюють моніторинг характеристик технологічних потоків між технологічними операціями. До контрольованих параметрів відносять такі: продуктивність потоку, концентрація часток твердої фази і гранулометричний склад часток залізорудної сировини. Водночас, здійснення контролю названих параметрів у робочих ємностях технологічних агрегатів є складним завданням. Водночас, можливість контролювати параметри потоку рудного матеріалу всередині магнітного сепаратора у різних робочих умовах дозволить вибрати оптимальний режим функціонування і підвищити як ефективність роботи сепаратора, так і якість вихідного продукту.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Процес мокрої магнітної сепарації характеризують такі основні параметри: продуктивність, кількість пустої породи у концентраті, втрати магнітного матеріалу у хвостах і загальне споживання води у даному процесі [1]. Водночас існує велика кількість режимних параметрів, які впливають на роботу магнітного сепаратора. Наприклад, у роботі [2] розглянуті такі параметри: швидкість подачі магнітного матеріалу, частка магнітного матеріалу у рудній сировині, концентрація твердих часток, конструкція магнітного вузла сепаратора і конструкція резервуару сепаратора. Також на продуктивність впливають такі параметри сепаратора як: рівень пульпи у сепараторі, кут магнітного вузла, зазори між барабаном і резервуаром і швидкість обертання барабана.

Дослідження [3] показали, що основним механізмом вилучення дрібних часток магнетиту є магнітна флокуляція в робочій ємності сепаратора, для здійснення якої необхідно підтримувати досить високу концентрацію магнітного матеріалу в живленні сепаратора. При роботі з більш грубозернистим матеріалом швидкість потоку твердих часток є фактором, який вимагає зменшення продуктивності по твердій фазі пульпи [1]. Також, важливим фактором, який впливає на концентрацію твердих часток у концентраті і на якість концентрату, є кількість рудного матеріалу всередині сепаратора.

Для вимірювання продуктивності потоку пульпи використовують такі ультразвукові методи [4]: фазовий, частотний, часоімпульсний. У основі фазового методу знаходиться процес формування двох ультразвукових коливань, спрямованих по потоку рідини і проти нього, і подальшого вимірювання різниці фазових зсувів цих коливань [4,5]. Недоліком даного методу є необхідність використання чотирьох пар п'єзоелементів замість двох, що здорожує конструкцію. Використання частотного методу передбачає імпульсну модуляцію ультразвукових коливань з подальшим вимірюванням їх частот [4]. Дані ультразвукові коливання формуються одночасно у напрямку руху потоку середовища і проти руху, а різниця їх частот є пропорційною величині витрати рідини. Часоімпульсний метод ґрунтується на тому, що швидкість поширення звукової хвилі в рухомому середовищі дорівнює векторній сумі швидкості звуку у нерухомому середовищі і швидкості середовища [4,6]. Підхід до організації вимірювань величини витрати рідини в потоці запропоновано у роботі [7]. У основі даного підходу знаходиться залежність швидкості потоку вимірюваного середовища від різниці часу переміщення коротких ультразвукових імпульсів.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи (продуктивності, вмісту твердої фази, вміст контрольованого класу крупності часток твердої фази), який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора.

**Викладення матеріалу і результати.** Оцінимо дисперсію високочастотних об'ємних ультразвукових коливань, що пройшли через пульпу. Інтенсивність ультразвукового сигналу при проходженні їм фіксованої відстані у пульпі має такий вигляд [8]

$$\xi = I_0 \exp \left\{ -\frac{1}{V} \sum_{i=1}^k \sigma(r_i) Z \right\}, \quad (1)$$

де  $\sigma(r_i)$  – перетин погашення часток радіуса  $r_i$ .

На основі виразу для умовного математичного сподівання для фіксованого числа часток  $k$  подрібненого матеріалу у контрольованому об'ємі отримано середнє значення величини сигналу, що пройшов через контрольований об'єм пульпи  $V$

$$\langle \xi \rangle = I_0 \exp \left\{ -nV \left( 1 - \int_0^\infty \exp \left( -\frac{1}{V} \sigma(r) Z \right) F(r) dr \right) \right\}. \quad (2)$$

Дисперсія цієї величини при проходженні ультразвуковим сигналом шару пульпи товщиною  $Z$  визначимо з виразу [9]

$$D\xi = I_0^2 \exp \left\{ -nV \left( 1 - \int_0^\infty e^{\left( -\frac{2}{V} \sigma(r) Z \right)} F(r) dr \right) \right\} - I_0^2 \exp \left\{ 2nV \left( 1 - \int_0^\infty e^{\left( -\frac{1}{V} \sigma(r) Z \right)} F(r) dr \right) \right\} \quad (3)$$

Представимо складові отриманого виразу у вигляді

$$\int_0^\infty F(r) e^{\left( -\frac{2}{V} \sigma(r) Z \right)} dZ \approx \int_0^\infty F(r) \left[ 1 - \frac{2}{V} \sigma(r) Z + \frac{4\sigma^2(r) Z^2}{2V^2} \right] dZ, \quad (4)$$

$$\int_0^\infty F(r) dr \cdot e^{\left( -\frac{1}{V} \sigma(r) Z \right)} = 1 - \frac{Z}{V} \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr + \frac{Z^2}{V^2} \int_0^\infty F(r) \sigma^2(r) dr. \quad (5)$$

Введемо позначення

$$\psi = \exp \left\{ \frac{nZ^2}{V} \int_0^\infty \sigma^2(r) F(r) dr \right\}, \quad (6)$$

тоді

$$D\xi = I_0^2 \exp \left\{ 2nZ \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right\} [\psi^2 - \psi]. \quad (7)$$

Визначимо відносну величину

$$\frac{\sqrt{D\xi}}{\langle \xi \rangle} = \left( I_0 \exp \left\{ -nZ \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right\} \sqrt{\psi^2 - \psi} \right) / \left( I_0 \exp \left\{ -nZ \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right\} \sqrt{\psi} \right). \quad (8)$$

Враховуючи що  $\sqrt{\psi} \approx 1$ , отримаємо

$$\langle \xi \rangle = I_0 \exp \left\{ \left( -ZW \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right) / \left( \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 F(r) dr \right) \right\}, \quad (9)$$

і, отже

$$\ln \frac{I_0}{\langle \xi \rangle} = ZW \left( \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right) / \left( \int_0^\infty \frac{4}{3} \pi r^3 F(r) dr \right). \quad (10)$$

Визначимо характеристичну функцію

$$S' = \frac{\ln \psi}{\ln(I_0 / \langle \xi \rangle)} = \frac{Z}{V} \left( \int_0^\infty \sigma^2(r) F(r) dr \right) / \left( \int_0^\infty \sigma(r) F(r) dr \right). \quad (11)$$

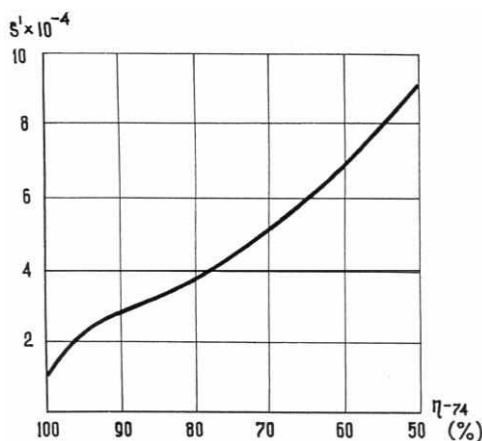


Рис. 1. Залежність  $S' = f(\omega_{-74})$

З останнього виразу видно, що величина  $S'$  є функцією крупності часток твердої фази у пульпі. Отже, при відомій залежності (11), на основі вимірювання параметрів  $I_0$ ,  $\langle \xi \rangle$ ,  $D\xi$  і обчислення параметра  $S'$ , можна визначити вміст контрольного класу крупності, наприклад  $\omega_{-74}$ . На рис. 1 приведена розрахункова залежність  $S' = f(\omega_{-74})$ .

Для реалізації методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора: продуктивності, вмісту твердої фази, вміст контрольного класу крупності часток твердої фази; пропонується схема, представлена на

рис. 3. Відповідно до даної схеми джерело хвиль Лемба працює у режимі широкої діаграми спрямованості і підключене за V-подібною схемою. Зазначене дозволяє створити пучок когерентних хвиль, які поширюються як у стінці ємності (робочої камери сепаратора), так і у вимірюваному середовищі (залізорудній пульпі).

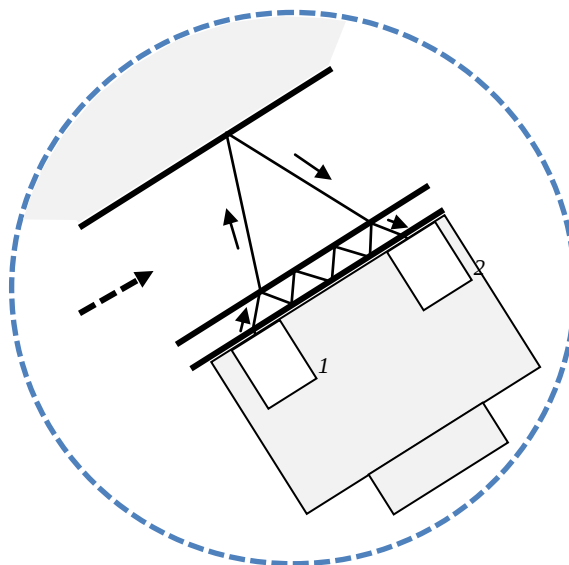


Рис. 2. Схема ультразвукового вимірювального каналу: 1 - джерело ультразвуку; 2 - приймач ультразвуку

Для моделювання процесів поширення ультразвукових хвиль використано спеціалізований програмний пакет Waveform Reveal [10]. При проведенні розрахунків товщина стінки магнітного сепаратора, в якій здійснюється поширення ультразвукових хвиль прийнято такою, що дорівнює 5 мм. Як приймачі сигналів використано п'єзoeлектричні напівпровідникові активні датчики. Результати моделювання вихідного сигналу представлені на рис. 3а і рис. 3б відповідно.

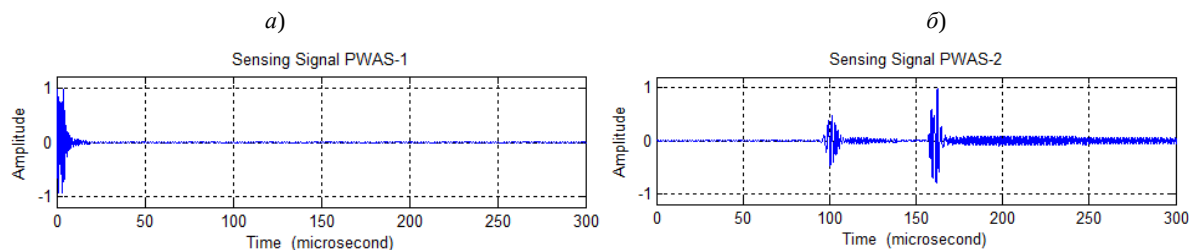


Рис. 3. Вхідний 5-періодний сигнал збудження синусоїдальної хвилі 5 МГц (а) та прийнятий сигнал (б) на відстані 10 см від джерела

Частотні характеристики пакетів S0 і A0 представлені на рис. 4. Криві дисперсії фазової швидкості ультразвуку в сталевій пластині представлені на рис. 4,а. Частотні характеристики хвильового пакета показані на рис. 4,б.

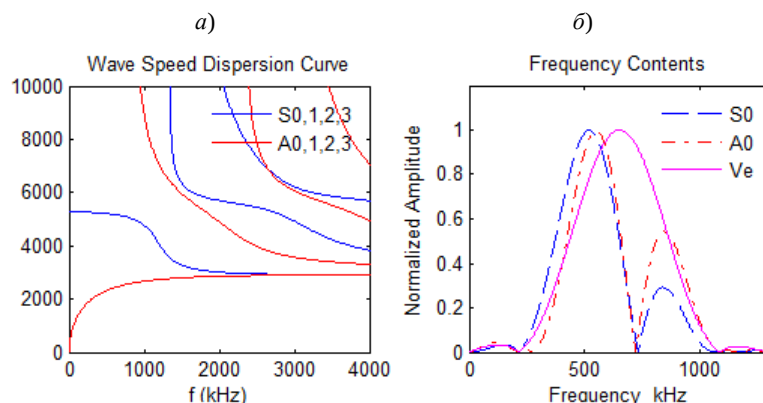


Рис. 4. Частотні характеристики хвильового пакета

Отримані з використанням запропонованого методу ультразвукових вимірювань дані дозволяють створити математичну модель процесу магнітної сепарації на основі рівняння Розіна-Раммлера [11]. Сумарний вихід фракцій визначено за такими формулами: для фракції  $r[d_1]$  –  $R[>d_1]=r[d_1]$ , для фракції  $r[d_i]$  –  $R[>d_i]=r[d_1]+r[d_2]+\dots+r[d_i]$ ; для фракції  $r[d_m]$  –  $R[>d_m]=1$ . У процесі дослідження розглянуті такі фракції крупності рудних часток: +3, 3+1, 1+0.5, 0.5+0.25, 0.25+0.125, 0.125+0.071, 0.071+0.056, 0.056+0.044, 0.044+0. Для визначення коефіцієнтів рівняння Розіна-Раммлера використаний метод найменших квадратів. Результати ідентифікації коефіцієнтів рівняння Розіна-Раммлера для математичного моделювання розподілу часток руди за класами крупності представлені на рис. 5.

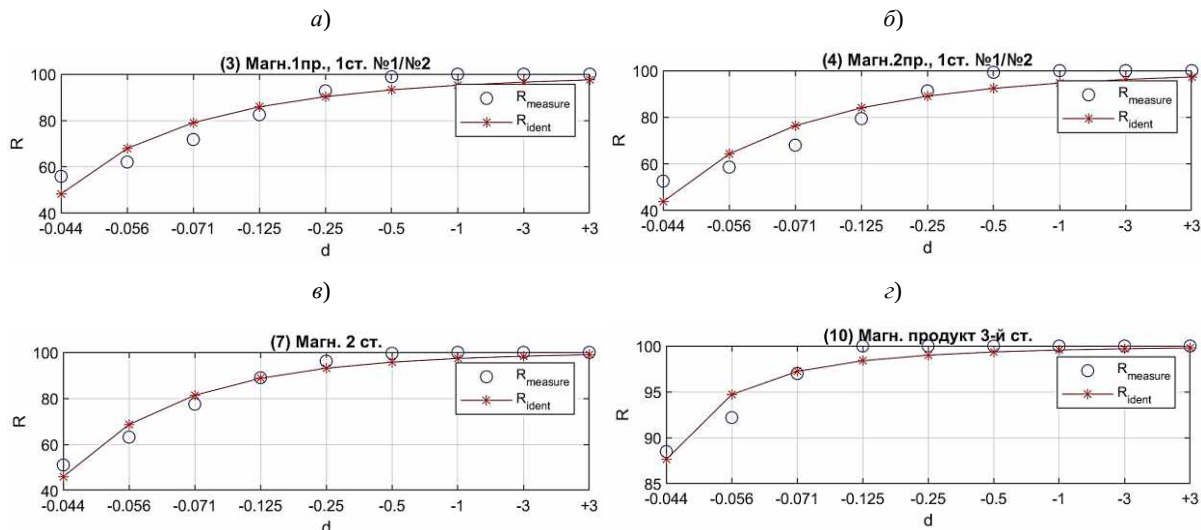


Рис. 5. Результат ідентифікації параметрів рівняння Розіна-Раммлера

Для ідентифікації залежностей, які не можуть бути описані аналітично доцільно використовувати гібридний підхід із застосуванням нечітких моделей Такагі-Сугено.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Розрахунок характеристичної функції дисперсії ультразвукового сигналу, що пройшов через контрольований об'єм пульпи, на основі вимірювання початкової інтенсивності та інтенсивності прийнятого сигналу дозволяє визначити вміст контрольного класу крупності часток твердої фази залізорудної пульпи.

Для реалізації методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора доцільно застосовувати джерело хвиль Лемба, що працює у режимі широкої діаграми спрямованості і підключене не за V-подібною схемою. Зазначене дозволяє створити пучок когерентних хвиль, які поширюються як у стінці ємності (робочої камери сепаратора), так і у вимірюваному середовищі (залізорудній пульпі).

Отримані з використанням запропонованого методу ультразвукових вимірювань дані дозволяють створити математичну модель процесу магнітної сепарації на основі рівняння Розіна-Раммлера.

#### Список літератури

1. Stener, J.F., Carlson, J.E., Palsson, B.I., & Sand, A. (2016). Direct measurement of internal material flow in a bench scale wet low-intensity magnetic separator. *Minerals Engineering*. 91. 55-65. DOI: 10.1016/j.mineng.2015.10.021.
2. Morgan, D. G., & Bronkala, W. J. (1993). The selection and application of magnetic separation equipment. Part II. *Magnetic and Electrical Separation*. 4(3). 151-172.
3. Rayner, J. G., & Napier-Munn, T. J. (2000). The mechanism of magnetics capture in the wet drum magnetic separator. *Minerals Engineering*. 13(3). 277-285. DOI:10.1016/S0892-6875(00)00007-8
4. Бондарь А.И., Дегтярь С.М., Павленко С.А., Смоляков В.А., Юдин А.Ю. (2010). Измерение расхода жидкости с помощью ультразвукового расходомера. *Механіка та машинобудування*. 2. 189-193.
5. Trosnikov, D., & Zhuk, V. (2008). Raskhodometry: printsipy raboty i opyt ekspluatatsii [Flow: operating principles and operating experience]. *Energetika i TEK [Power and Energy]*. 2008. 4(61).
6. Yeung, H. (2003). Editorial to: multiphase flow measurement. *Flow Measurement and Instrumentation*. 14. 137. DOI: 10.1016/S0955-5986(03)00043-8.

7. **Khlebnova, V.I.** (2016). Methods and instruments for measuring the rate of liquids and gases: prospects of application of ultrasonic transducers with a wide measuring beam. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 9 (678). 45-52. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-9-45-52.
8. **Morkun, V., Morkun, N., Pikilnyak, A.** The adaptive control for intensity of ultrasonic influence on iron ore pulp. *Metallurgical and Mining Industry*, 2014. 6(6), с. 8-11.
9. **Morkun V., Morkun N., Pikilnyak A..** (2015) The study of volume ultrasonic waves propagation in the gas-containing iron ore pulp. *Ultrasonics*, Volume 56, p.p. 340-343.
10. **Splichal, J., & Hlinka, J.** (2018). Modelling of health monitoring signals and detection areas for aerospace structures. *Proceedings of 13th Research and Education in Aircraft Design*. 170-188.
11. **Шупов Л. П.** Моделирование и расчет на ЭВМ схем обогащения. М.: Недра, 1980. 288 с.

УДК 658.652.64.622.3

А.А. АЗАРЯН, В.С. МОРКУН, доктори технічних наук, професори, Д. В. ШВЕЦЬ, ст. викл., О. В. ЧЕРКАСОВ, ст. наук. співроб., А.М. ГРИЦЕНКО, О.В. ШВИДКИЙ, наукові співробітники Криворізький національний університет

## ПОШУК ШЛЯХІВ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ І РОЗУБОЖЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

**Мета.** Аналіз існуючих та виявлення оптимальних шляхів зниження втрат і розубоження залізорудної сировини.

**Методи дослідження.** Пропонується для зниження втрат та розубоження залізорудної сировини застосовувати комплекс організаційно-технічних заходів, що складається з вибору системи відпрацювання родовища, буропідричних робіт, випуску руди з дучок, каротажу вибухових свердловин та інклінометрії.

**Наукова новизна.** Основним елементом зазначеного комплексу організаційно-технічних заходів є застосування електронного інклінометра з модулем, який являє собою сукупність акселерометра, гіроскопа і магнітометра. Додатково в ньому розміщений мікроконтролер управління модулем, який відповідає за виконання математичних розрахунків для передачі готових даних з датчика. Акселерометр відповідає за вимірювання проекції прискорення та кута нахилу пристрою, гіроскоп застосовується для стабілізації вихідного сигналу нахилу, магнітометр реалізує вимірювання вмісту магнітного заліза в залізорудній сировині. Додатково використовується окремий, незалежний пристрій зі спеціально розробленим програмним забезпеченням, що дозволяє по протоколу обміну і з використанням механізму переривань здійснювати взаємозв'язок з модулем, що містить акселерометр, гіроскоп та магнітометр. Взаємозв'язок цих пристроїв дозволяє проводити налаштування як в цілому модуля, так і окремо акселерометра, гіроскопа та магнітометра, проводити калібрування модуля, а також отримувати результати проведених вимірювань і розрахунків.

**Практичне значення.** Для оптимізації технологічних параметрів залізорудної сировини в умовах підземного видобутку при використанні похилих свердловин для буровибухових робіт необхідне застосування інклінометрії. Запропонований інклінометр із застосуванням акселерометра, гіроскопа та магнітометра дозволяє збільшити точність вимірювань та підвищити інформативність процесу інклінометрії.

**Результати.** Розроблено функціональну схему інклінометра із застосуванням акселерометра, гіроскопу та магнітометра. Попередні розрахунки дозволяють прийти до висновків, що застосування інклінометрії при підземному видобутку руд дозволить знизити планові показники засмічення на 3,0%, втрати руд на 5,0%, і забезпечити підвищення вмісту заліза на 2,0%.

**Ключові слова:** залізорудна сировина, інклінометрія, розубоження, акселерометр, гіроскоп, магнітометр.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-15-19

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Частка України в світовому виробництві залізної руди становить близько 6%. На території України знаходиться 20% світових запасів залізної руди. За запасами залізорудної сировини Україна посідає перше місце в світі, а за обсягами виробництва – сьоме.

Кривбас є центром гірничо-металургійного комплексу України. Економічний потенціал нашої держави в значній мірі залежить від стану гірничо-металургійної промисловості [1, 2].

Річний обсяг відкритого і підземного видобутку залізорудної сировини в Кривбасі сягає понад 60 млн. тонн. Разом з тим, високі темпи розвитку промисловості вимагають збільшення обсягів видобутку руд. Балансові запаси багаті руди Кривбасу із середньою масовою часткою заліза 56,7% складають 1,5 млрд тонн, а залізистих кварцитів із середньою масовою часткою заліза 34,3% - 18 млрд тонн.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Забезпечення металургійного виробництва сировиною з заданими показниками якості є актуальною проблемою [3].

Однією з найважливіших характеристик якості видобутої руди є вміст металу в гірничій масі. Діапазон допустимих значень вмісту металу досить широкий, але чим більше вміст корисного компонента, тим вище економічна ефективність металургійного переділу. Так, наприклад, підвищення вмісту металу в руді тільки на 1% збільшує продуктивність доменного виробництва на 4 ... 5%, знижує витрати коксу на 1 ... 3% і витрати вапняку на 6 ... 8% [1].

В даний час при видобутку залізорудної сировини втрати руд з середнім вмістом заліза до 57% складають сьому частину від загального обсягу, а засмічення вміщуючими породами з вмістом заліза 37,5% становить шосту частину від загального обсягу видобутку руд.

**Постановка завдання.** Аналіз можливих шляхів зниження втрат і розубоження залізорудної сировини.

**Викладення матеріалу та результати.** Які ж існують реальні методи і способи для зниження втрати руд?

Для зниження втрат та розубоження залізорудної сировини необхідно застосовувати комплекс організаційно-технічних заходів, що складається з:

- вибору системи відпрацювання родовища;
- буропідливних робіт;
- випуску руди з дучок;
- каротажу вибухових свердловин;
- інклінометрії.

Досвід Запорізького залізорудного комбінату показав, що відпрацювання родовища з закладкою дозволяє значно знизити втрати руд і засмічення підірваної гірничої маси. Крім того, виключаються провали відпрацьованих родовищ, що покращує екологію і дозволяє рекультивувати і відновити родючі землі.

У Кривбасі не використовується система розробки родовищ із закладкою. Змінити встановлену систему розробки родовищ є надзвичайно трудомісткою і витратною процедурою.

Буропідливні роботи потрібно проводити суворо за паспортом буропідливних робіт.

Одним з основних джерел втрат руд і засмічення підірваної гірничої маси є випуск руди з дучок. Існують різні способи боротьби за підвищення ефективності процесу випуску.

На стадії підготовчих робіт для видобутку руд втрати і розубоження складають 3-5% [4]. Досвід роботи показує, що найбільш раціональними та ефективними методами зниження як втрат руд, так і засмічення підірваної гірничої маси порожніми породами, є каротаж свердловин та інклінометрія. Згідно з розрахунковими даними, поєднання цих двох методів дозволить знизити втрати руд на 5%, а засмічення – на 3%.

Інклінометри по праву вважаються основними засобами здійснення вимірів у свердловинах. Електронний інклінометр призначений для контролю стану вибухових свердловин в рудному масиві, що дозволяє визначати зенітний і азимутальні кути і оперативно контролювати стан свердловини в масиві [5-8]. Інклінометрія запобігає переходу свердловин в контактну зону «руда-порода», що в кінцевому підсумку знижує втрати. При цьому фіксується викривлення свердловини, що за даними статистики становить до 15% від її глибини.

Сумарна інформація, що одержується від інклінометрів і каротажного зонду, дозволяє розробляти тривимірні моделі рудного масиву, що дає можливість прогнозувати якісно-кількісні параметри підірваної рудної маси і визначати кількість експлуатаційних свердловин, відхилених за контактну зону в область «порожніх порід». Крім того, при великій відстані між свердловинами, визначається необхідність буріння додаткових свердловин, для виключення втрати руд і наднормативного виходу негабаритів.

Основною перевагою інклінометра в поєднанні з каротажним зондом є отримання каротажних даних відповідно до положення та орієнтації каротажного зонду в кожен момент часу.

В інклінометрі повинні бути передбачені наступні основні функції:

- завдання початкових значень положення інклінометра;
- контроль поточної орієнтації інклінометра;
- контроль пройденого шляху вздовж переміщення інклінометра;
- синхронне накопиченні даних;

канал зв'язку для діагностики та аварійної сигналізації.

Додаткові функції:

магнітометричний контроль;

радіометричний контроль;

відеометричний контроль.

В даний час на дробильно-сортувальних фабриках шахт для підвищення якості товарної руди застосовується технологія переробки сирової руди, яка базується на різних характеристиках міцності руди і вміщуючих порід. В результаті дроблення і розсівання сирової руди на вібраційних грохотах отримують два продукти: підрешітний продукт в якості агломераційної руди реалізується металургійним заводам, а надрешітний продукт складається у вигляді бідної кускової руди. Вихід бідної кускової руди по ПАТ «КЗРК» становить близько 2 млн тонн на рік.

Досвід показує, що застосовувана схема переділу неефективна, так як при цьому збільшуються амортизаційні та енерговитрати на 1 тону товарної руди.

Основні причини втрати руд і засмічення при підземному видобутку наведені нижче:

відхилення вибухових свердловин від проектного напрямку, в середньому на 10-15% від глибини, внаслідок чого відбувається законтурне відбивання некондиційної гірської маси, а також залишаються невідбиті долі рудного покладу;

основні втрати через неповне відбивання рудної маси зосереджені в лежачому боці рудного тіла;

викривлення свердловин в приконтатній зоні призводить до засмічення підірваної гірничої маси.

Однією з основних причин великих втрат і засмічення рудної маси є відсутність оперативного контролю положення і глибини вибухових свердловин в рудному масиві.

З метою зниження втрати руд і засмічення підірваної гірничої маси, необхідно розробити і впровадити у виробництво:

електронний інклінометр для контролю положення вибухових свердловин в рудному масиві;

пристрій для оперативного контролю глибини вибухових свердловин;

програмний комплекс для створення 3D-моделі рудного масиву;

рудничний радіометр для оперативного контролю якості гірської маси при випуску руди з дучок і на концентраційному горизонті.

Функціональна схема електронного інклінометра наведена на рис. 1.

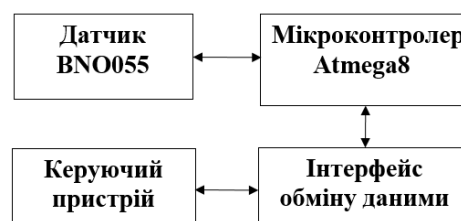
**Рис.1.** Функціональна схема електронного інклінометра

В електронному інклінометрі в якості датчика просторового положення використовується модуль BNO055, вироблений фірмою BOSCH. Даний датчик є сукупністю 3-х осьових акселерометра, гіроскопа і магнітометра. Крім того, в ньому розміщений мікроконтролер управління модулем, також він виконує математичні розрахунки для передачі готових даних з датчика.

Магнітометр призначений для вимірювання характеристик магнітного поля і магнітних властивостей матеріалів. Для контролю параметрів магнітного поля проводиться вимір повного вектора магнітного поля. Це необхідно для оцінки неоднорідності магнітного поля під час перевірки.

Акселерометр є пристроєм, що вимірює проекцію прискорення (різницю між істинним прискоренням об'єкта та гравітаційним прискоренням) [9-10]. Акселерометри призначені для безперервного вимірювання віброприскорення за трьома взаємноортогональними осями X, Y, Z, кута нахилу по двом осям і передачі результатів вимірювань по інтерфейсу RS-485 в персональний комп'ютер для подальшої обробки, аналізу та зберігання.

Гіроскоп – пристрій, здатний реагувати на зміну кутів орієнтації тіла, на якому він встановлений, щодо інерціальної системи відліку [11-15]. Серед механічних гіроскопів можна виділити роторний гіроскоп – тверде тіло, що швидко обертається, вісь обертання якого може зміню-



вати свій напрям в просторі. Гіроскоп має низку цікавих властивостей, які спостерігаються у небесних тіл, що обертаються, у артилерійських снарядів, у дитячої дзиги, у роторів турбін, встановлених на судах. Властивості гіроскопа проявляються при виконанні двох умов:

вісь обертання гіроскопа повинна мати можливість змінювати свій напрям у просторі;

кутова швидкість обертання гіроскопа навколо своєї осі повинна бути досить великою порівняно з тією кутовою швидкістю, яку буде мати сама вісь при зміні свого напрямку.

Перша властивість урівноваженого гіроскопа з трьома ступенями свободи полягає в тому, що його вісь прагне стійко зберігати в світовому просторі приданий їй початковий напрямок. Якщо ця вісь спочатку направлена на якусь зірку, то при будь-яких переміщеннях основи приладу або випадкових поштовхах вона продовжуватиме вказувати на цю зірку, міняючи своє орієнтування щодо земних осей.

Елемент функціональної схеми, позначений як Host Processor - це окремий, незалежний пристрій зі спеціально розробленим програмним забезпеченням, що дозволяє по протоколу обміну і з використанням механізму переривань здійснювати взаємозв'язок з модулем BNO055. Взаємозв'язок дозволяє проводити налаштування як в цілому модуля, так і окремих його пристроїв, проводити калібрування модуля, а також отримувати результати проведених вимірювань і розрахунків.

Функціональна схема датчика наведена на рис. 2

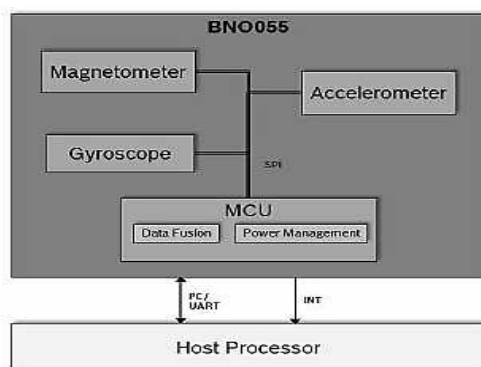


Рис. 2. Функціональна схема датчика

Блок-схема алгоритму нижнього рівня наведена на рис. 3.

Блок-схема алгоритму верхнього рівня наведена на рис. 4.



Рис. 3. Блок-схема алгоритму нижнього рівня



Рис. 4. Блок-схема алгоритму верхнього рівня

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Для оптимізації технологічних параметрів залізорудної сировини в умовах підземного видобутку при використанні похилих свердловин для буровибухових робіт, необхідне застосування інклінометрії.

Застосування інклінометрії при підземному видобутку руд, за попередніми оцінками, дозволить знизити планові показники засмічення на 3,0%, втрати руд на 5,0%, і забезпечити підвищення вмісту заліза – на 20%.

#### Список літератури

1. Качество минерального сырья / А. А. Азарян, В. А. Колосов, Л. А. Ломовцев, А. Д. Учитель ; под общ. ред. В. Ф. Бызова. – Кривой Рог : Минерал, 2001. – 203 с.
2. Ways to Reduce Ore losses and Dilution in Iron Ore Underground Mining in Kryvbass / **A. A. Azaryan, A. S. Batareyev, F. I. Karamanits** [ et al.] // Science and Innovation. – 2018. – Vol. 14, is. 4. – P. 17–24.
3. Development of the method to operatively control quality of iron ore raw materials at open and underground extraction / **A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, D. Shvets** // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 5, issue 5 (95). – P. 13–19. – DOI: 10.15587/1729-4061.2018.144003.
4. Система управления качеством руд с применением радиометрических методов на действующих горнодобывающих предприятиях / **В. И. Ревнивцев, Е. И. Крапивский, Е. П. Леман** [и др.] // Тезисы докладов Всесоюзного семинара «Электронные методы обогащения». – Москва, 1985. – С. 10–11.
5. **Бранец В. Н.** Применение кватернионов в задачах ориентации твердого тела / **В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский**. – Москва : Наука, 1973. – 320 с.
6. **Челноков Ю. Н.** Кватернионные и бикватернионные модели и методы механики твердого тела и их приложения / **Ю. Н. Челноков**. – Москва : Физматлит, 2006. – 512 с.
7. **Kuipers J. B.** Quaternions and Rotation Sequences / **J. B. Kuipers** : a primer with Applications to Orbits, Aerospace and Virtual Reality. – Princeton : University Press, 1999. – 400 p.
8. **Журавлев В. Ф.** Основы теоретической механики. – 2-е изд., перераб. – Москва : Физматлит, 2001. – 320 с.
9. **Красовский А. А.** Теоретические основы пилотажно-навигационных комплексов / **А. А. Красовский, А. В. Лебедев, В. В. Невструев**. – Москва : ВВИА им. Жуковского, 1980. – 372 с.
10. **Алешин Б. С.** Ориентация и навигация подвижных объектов / **Б. С. Алешин**. – Москва : Физматлит, 2006. – 422 с.
11. **Бранец В. Н.** Введение в теорию бесплатформенных инерциальных навигационных систем / **В. Н. Бранец, И. П. Шмыглевский**. – Москва : Наука, 1992. – 280 с.
12. **Дмитриев С.П.** Инерциальные методы в инженерной геодезии / **С.П. Дмитриев** // С.-Петербург : ГНЦ РФ - ЦНИИ "Электроприбор", 1997. – 208 с.
13. **Липтон Н.** Начальная выставка инерциальной системы на подвижном основании / **Н. Липтон**. – М. : Наука, 1971. – 167 с.
14. **Збруцький О. В.** Розробка структури та алгоритму функціонування інтегрованої навігаційної системи визначення координат і курсу рухомого об'єкта / **О. В. Збруцький, О. І. Нестеренко, О. В. Прохорчук** // Вісник ТАУ, УТУ. – 1999. – № 3. – С. 233–236.
15. **Азарян А. А.** Разработка комплексной системы для повышения качественных показателей железной руды / **А. А. Азарян, В. Ю. Зубкевич, Д. В. Швец** // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць. – 2018. – Вип. 47. – С. 68–75. – DOI: 10.31721/2306-5451-2018-1-47-68-76.

УДК 669.184:628.5-049.5

В.К. ТАРАСОВ, О.С. ВОДЕННИКОВА, кандидати техн. наук, доценти

Запорізький національний університет

Л.В. ВОДЕННИКОВА, асист., Запорізький державний медичний університет

#### ВИБІР РАЦІОНАЛЬНИХ ЗАСОБІВ ТЕХНОГЕННОЇ БЕЗПЕКИ КИСНЕВО-КОНВЕРТЕРНОГО ПРОЦЕСУ

**Мета.** Метою роботи є пошук шляхів підвищення техногенної безпеки технологічного процесу киснево-конвертерного виробництва сталі.

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями:

проаналізувати шкідливі виробничі фактори киснево-конвертерного процесу та засоби підвищення техногенної безпеки конверторного виробництва;

визначення рівня безпеки основного обладнання киснево-конвертерного цеху від тривалості його безаварійної роботи;

встановлення раціональної зони роботи обладнання киснево-конвертерного цеху;

привести оцінку причин та характеру негативного впливу теплових виділень, зокрема, через нагрітий корпус конвертеру, на умови праці робітників киснево-конвертерного цеху;

визначити шляхи захисту робітників киснево-конвертерного цеху від негативного впливу джерела зовнішнього іонізуючого випромінювання;

проаналізувати допустиму тривалість перебування людини в зоні дії інфрачервоного випромінювання в умовах киснево-конвертерного цеху.

**Методи досліджень.** При узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з напрямку аналізу допустимих та раціональних засобів техногенної безпеки киснево-конвертерного процесу виробництва сталі використовувався комплексний підхід. Виконано обробку та аналіз аналітичних даних залежності рівня безпеки основного обладнання киснево-конвертерного цеху від тривалості його безаварійної роботи. Аналіз аналітичних даних допустимої тривалості перебування людини в зоні дії інфрачервоного випромінювання в умовах киснево-конвертерного цеху.

**Наукова новизна.** Запропоновано удосконалення методики аналізу рівня безпеки технологічного процесу та обладнання киснево-конвертерного цеху; для зменшення дії випромінювання від кисневого конвертеру запропоновано схему теплозахисного екрану.

**Практичне значення.** Приведений розрахунок теплових втрат і виділень бічною поверхнею кисневого конвертера дозволяє за рахунок встановлення теплозахисних екранів та укриття знизити радіус небезпечної зони до 1,0 м та підвищити техногенну безпеку в киснево-конвертерному цеху.

**Результати.** Визначено рівень безпеки кисневого конвертеру в залежності від тривалості його безаварійної роботи. Встановлено, що максимальний рівень безпеки роботи кисневого конвертеру (в межах 80–98%) досягається при тривалості його безаварійної роботи на протязі 720–2160 год. Запропоновано заходи з охорони праці в умовах киснево-конвертерного цеху, які дозволяють забезпечити дану безаварійну тривалість роботи кисневого конвертеру.

**Ключові слова:** техногенна безпека, рівень безпеки, кисневий конвертер, теплові виділення, забруднення виробничого середовища, безаварійна робота конвертеру.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-19-25

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** На сьогодні одним з пріоритетних напрямків сучасного металургійного виробництва є підвищення якості та конкурентоспроможності готової продукції [1].

Серед першочергових завдань науково-технічної проблеми техногенної безпеки України виділяють наступні [2]:

висвітлення реальних наукових основ забезпечення промислової безпеки та безпеки складних технічних систем, людей і довкілля;

розробка методів оцінки небезпеки промислових об'єктів;

визначення наукових засад концепції прийнятного ризику стосовно умов функціонування вітчизняної промисловості;

створення банку даних та системи моніторингу техногенної безпеки;

розробка соціально-економічних, нормативно-правових та організаційних заходів стійкого розвитку України в умовах переходу до ринкових відносин з урахуванням загроз, що мають техногенне, стихійне або техногенно-стихійне походження;

використання математичних моделей зниження потенційних загроз промислових об'єктів для розв'язання широкого кола оптимізаційних задач, пов'язаних зі зниженням загроз для населення.

Умови праці в металургійних цехах визначаються як технологічним процесом, так і особливостями оснащення самих цехів. Для приміщень з надлишком тепловиділення характерна висока температура повітря, що перевищує гранично допустимі рівні і низька відносна вологість повітря у теплий період року. Запиленість повітряного середовища в металургійних цехах зустрічається на різних етапах технологічного процесу незалежно від його періоду і, як правило, перевищує гранично-допустимі концентрації [4]. Умови праці на основних робочих місцях металургійних цехів повинні відповідати ДСНтаП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу» [5].

Так комплексні дослідження умов праці металургійного виробництва України, проведені в роботі [3], показують, що 75 % робітників працюють в умовах, що не відповідають гігієнічним нормативам і відносяться до 3 класу 3 або 4 ступеню шкідливості та оцінюються як шкідливі і небезпечні.

Досвід експлуатації технологічного обладнання та агрегатів киснево-конвертерних цехів показує, що тривалість їх безпечної роботи визначається рівнем технології та технічного оснащення, головними складовими яких є: якість шихтових матеріалів; раціональність технології

виплавки і розливки сталі; ефективність використання діючих систем газоочищення і охолодження; якість вогнетривів футеровки конвертерів; техніка випуску продуктів плавки (сталі та шлаку); технічний стан і надійність основного технологічного устаткування [5].

Для киснево-конвертерного цеху характерні великі вантажопотоки (в тому числі і рідкого металу), швидкості процесу, наявність потенційно небезпечних та шкідливих ділянок, особливо під час продувки рідкого металу киснем. Ці нюанси вимагають бездоганного і чіткого дотримання всіх правил техніки безпеки і норм промислової санітарії. Великі навантаження і високі температури, яким піддається конвертер під час експлуатації, можуть стати причинами аварій з виникненням тріщин і поломок окремих його елементів. Стан конвертера і всіх механізмів повинен піддаватися регулярному і ретельному контролю [6].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Підвищити техногенну безпеку роботи кисневих конвертерів можна за рахунок вдосконалення та оптимізації технології і технологічних прийомів, до яких можна віднести [7]:

комбіновану продувку, що забезпечує економію шлакоутворюючих присадок, чавуну, феросплавів і підвищення виходу придатного металу;

технологію плавки з рафінуванням і доведенням складу металу в ковші;

оптимізацію режиму продувки, що забезпечує зменшення втрат металу з виносом і викидами;

десульфурацію чавуну у розливному ковші і доставку рідкого чавуну з доменного цеху до конвертерів в ковшах міксерного типу з метою збереження температури чавуну;

збільшення частки брухту в шихті та попередній його нагрів;

введення твердих вуглецевих добавок в агрегат;

збільшення ступеня допалювання CO до CO<sub>2</sub> в порожнині конвертера;

утилізація конвертерних газів в газгольдері без допалювання CO з подальшим їх використанням для енергетичних і технологічних потреб металургійного підприємства;

застосування відходів в якості шлакоутворюючих.

Серед шляхів до підвищення безпеки праці робітників киснево-конверторних цехів є постійне дотримання оптимальних режимів плавки, зокрема теплового і шлакового, та режиму дуття [8].

Авторами роботи [5] запропоновані рекомендації щодо підвищення безпеки експлуатації кисневих конвертерів вітчизняних підприємств в різних умовах і варіантах продування ванни, зокрема з використанням перспективних технологій. Показано, що забезпечення безпечної роботи кисневих конвертерів вимагає проведення оптимізації завдань використання і утилізації газів, що відходять. Запропонована авторами методика ймовірнісної оцінки виникнення аварійних ситуацій та інцидентів на основному обладнанні киснево-конвертерного виробництва, спрямована на забезпечення промислової безпеки процесу виплавки та розливки сталі, показала, що виникнення інцидентів і аварійних ситуацій в киснево-конвертерному цеху можна описати законом Пуассона, а час ліквідації - показовим законом.

Дослідження небезпечних чинників сучасного технологічного процесу конвертерного виробництва сталі представлені у роботі [9]. Авторами виконано розрахунки рівня безпеки процесів з урахуванням невикористаних зупинок, пошкоджень та аварій, а також розроблено спосіб захисту персоналу від дії випромінювання, який дозволить підвищити техногенну безпеку основного агрегату і виробництва в цілому.

**Постановка задачі.** Метою роботи є пошук шляхів підвищення техногенної безпеки технологічного процесу киснево-конвертерного виробництва сталі.

**Викладення матеріалу та результати.** При киснево-конвертерному процесі спостерігаються наступні шкідливі виробничі фактори [10]: тепловиділення від технологічного устаткування та розплавленого металу та шлаку; гази, які утворюються при продувці конвертеру, роботі газових пальників в котлі-утилізаторі та при сушінні футеровки відремонтованих конвертерів та сталерозливних ковшів; пил, що утворюється при транспортуванні сипких матеріалів, продувці конвертеру, зливу чавуну з ковшу у конвертер, випуску сталі та шлаку з конвертеру, ломки футеровки конвертера та ковшів. Для уловлювання газів та пилу в киснево-конвертерних цехах передбачається встановлення спеціальної витяжної вентиляції.

До нормованих параметрів техногенної безпеки киснево-конвертерного процесу слід віднести стан внутрішньої поверхні футерівки конвертера, відповідність фізико-хімічних параметрів

рів компонентів шихти, а також необхідні характеристики кисневого струменя.

Тому представляється доцільним проаналізувати рівень безпеки технологічних операцій киснево-конвертерного виробництва сталі з урахуванням не виробничих зупинок, пошкоджень та аварій, ґрунтуючись на тому, що загальна тривалість виплавки сталі за даними [11] у конвертері ємністю 50–350 т складає 30–50 хв.

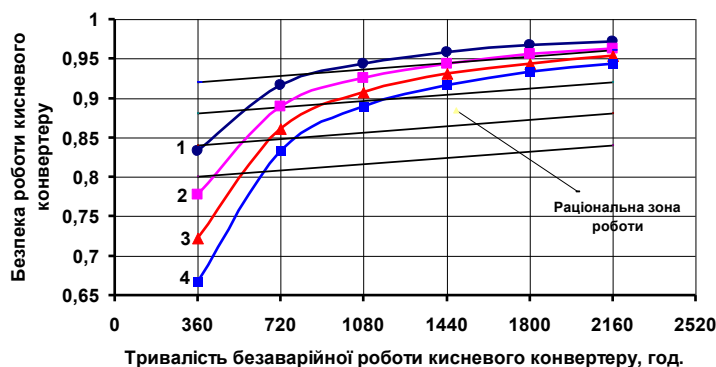
У якості об'єкту дослідження в даній роботі виступає технологічний процес виплавки сталі в конвертері місткістю 130 т, для якого тривалість однієї плавки складає 45 хв., а загальна тривалість робочого часу конвертеру без зупинки на ремонт складає 420 год.

Рівень безпеки кисневого конвертеру визначається згідно співвідношення [12]

$$U_{\text{безпеки}} = 1 - \frac{\sum \tau_z + \sum \tau_{ze} + \sum \tau_{zzf}}{T}, \quad (1)$$

де  $\sum \tau_z$  – загальна тривалість часу порушень параметрів безпеки, год.;  $\sum \tau_{ze}$  – загальна тривалість часу екстремального відключення виробництва, год.;  $\sum \tau_{zzf}$  – загальна тривалість часу порушення процесу під впливом зовнішніх факторів, год.;  $T$  – тривалість безаварійної роботи кисневого конвертеру, год.

Змінюючи значення сумарної тривалості порушень  $\sum \tau_z + \sum \tau_{ze} + \sum \tau_{zzf}$  від 60 год. до 120 год. та час безаварійної роботи конвертеру на протязі від 350 год. до 2160 год., отримаємо розрахункові дані для визначення безпеки роботи кисневого конвертеру (рис. 1).



**Рис. 1.** Залежність безпеки роботи кисневого конвертеру від тривалості його безаварійної роботи

Аналіз залежності безпеки роботи кисневого конвертеру від тривалості його безаварійної роботи (рис. 1), отриманої при фіксованих значеннях загальних порушень, показує, що безпека роботи стрімко зростає на ділянці  $T = 360$ – $720$  год. та знаходиться в межах від 0,667 (рис. 1, крива 4) до 0,917

(рис. 1, крива 1). Збільшуючи тривалість безаварійної роботи кисневого конвертеру в межах 720–1080 год. безпека роботи зростає повільніше з 0,883 (рис. 1, крива 4) до 0,944 (рис. 1, крива 1). В подальшому, збільшуючи тривалість безаварійної роботи конвертеру до 2160 год. безпека роботи кисневого конвертеру досягає значення 0,972 (рис. 1, крива 1). Тому в якості раціональної зони роботи представляється доцільним інтервал рівня безпеки від високого до дуже високого в межах 0,8–0,98 (80–98%), що відповідає безаварійній роботі конвертеру на протязі 360–2160 год. (рис. 1).

Отже, для підвищення рівня техногенної безпеки в киснево-конвертерному цеху доцільно зменшити негативний вплив на робітників інфрачервоного випромінювання.

Відомо, що джерелом інфрачервоних теплових виділень є кожух та розпечена горловина конвертера, гази, що відходять, розплавлений чавун, рідка сталь та шлак. У розливному прольоті велика кількість тепла та нагрітих газів виділяє розплавлений метал, який подається на розливку. Інтенсивність випромінювання на цих ділянках складає 350–10500 Вт/м<sup>2</sup>. Особливо великому тепловому опромінюванню підлягають робітники киснево-конвертерного цеху при взятті проб, вимірі температури, огляді та ремонті горловини конвертеру. Температура повітря може досягати 45–50°C.

Згідно теплового балансу конвертерної плавки [13] частка вторинних енергетичних ресурсів становить 95% від загальної витрати теплоти, витраченої на процес, в тому числі частка паливних вторинних енергетичних ресурсів (хімічна енергія конвертерного газу), становить 32%, а частка теплових вторинних енергетичних ресурсів (фізична теплота сталі, шлаку і конвертерного газу) – 63%.

Приведемо розрахунок втрат теплоти нагрітою стінкою кисневого конвертера.

Загальна втрата теплоти стінкою конвертера складає

$$Q_{\text{заг}} = Q_k + Q_{\text{випр.}}, \quad (2)$$

де  $Q_k$  – втрати теплоти конвекцією, Дж/с;  $Q_{\text{випр.}}$  – тепловіддача випромінюванням, Дж/с.

Конвективний коефіцієнт тепловіддачі складає, Дж/с·К

$$\alpha_k = \lambda \cdot \sqrt{T_n - T_u}, \quad (3)$$

$$\alpha_k = 2,56 \cdot \sqrt{523 - 298} = 38,4,$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки конвертеру, приймаємо 2,56 Дж/с;  $T_n$  – температура зовнішньої поверхні, приймаємо 250 °С;  $T_u$  – середня температура повітря в киснево-конвертерному цеху, приймаємо 25 °С.

Втрата теплоти конвекцією складає, Дж/с

$$Q_k = \alpha_k \cdot (T_n - T_u) \cdot S, \quad (4)$$

$$Q_k = 38,4 \cdot (523 - 298) \cdot 1 = 8640,$$

де  $S$  – площа горловини кисневого конвертеру для завантаження шихти, приймаємо 1 м².

Тепловіддача з отриманням нагрітої стінки конвертеру складає, Дж/с

$$Q_{\text{випр.}} = C \cdot S \cdot \left[ \left( \frac{T_n}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{оzp}}}{100} \right)^4 \right], \quad (5)$$

$$Q_{\text{випр.}} = 5,35 \cdot 1 \cdot \left[ \left( \frac{523}{100} \right)^4 - \left( \frac{298}{100} \right)^4 \right] = 3580,$$

де  $C$  – приведений коефіцієнт випромінювання для червоної цегли, приймаємо 5,35 Дж/(м²·с·К).

Підставляючи отриманні данні, визначаємо значення загальної втрати теплоти стінкою кисневого конвертера, Дж/с

$$Q_{\text{заг}} = 8640 + 3580 = 12220.$$

Таким чином, представлена методика дозволяє провести оцінку тепловиділень від бічної поверхні кисневого конвертеру в робоче середовище та взяти до уваги при розрахунку засоби захисту робочих місць робітників киснево-конвертерного цеху.

Захист робітників киснево-конвертерного цеху від негативного впливу джерела зовнішнього іонізуючого випромінювання досягається шляхом [14]:

зниження потужності джерела випромінювання до мінімально необхідної величини («захист кількістю»);

збільшення відстані між джерелом випромінювання та працівником («захист відстанню»);

зменшення тривалості роботи в зоні випромінювання («захист часом»);

встановлення між джерелом випромінювання та працівником захисного екрана («захист екраном»).

Для зниження безпеки обслуговування кисневого конвертера, міксера, ковшів та машин безперервної розливки сталі пропонується понизити небезпечний рівень теплового опромінення робітників киснево-конвертерного цеху. Доцільно зменшити ступінь опромінення за рахунок використання теплозахисних екранів. З цією метою визначено відстань від центру випромінювання (осі кисневого конвертера або сталерозливного ковшу) до безпечної зони

$$l_u = 0,78 \frac{S_{\text{дж}}^{0,5}}{Q_{\text{норма}}} \left[ \left( \frac{T_{\text{дж}}}{100} \right)^4 - 110 \right], \quad (6)$$

де  $S_{\text{дж}}$  – площа поверхні джерела, що випромінює, приймаємо 1 м²;  $T_{\text{дж}}$  – температура поверхні джерела, що випромінює, приймаємо 523 К;  $Q_{\text{норма}}$  – оптимальна норма інтенсивності тепловиділення, приймаємо 140 Вт/м².

Підставляючи вище зазначенні данні, отримуємо значення  $l_u = 2,5$  м.

Радіус небезпечної зони перевищує 2,0 м, тобто захисні екрани є необхідним засобом захисту робітників киснево-конвертерного цеху. В табл. 1 приведено допустиму тривалість знахо-

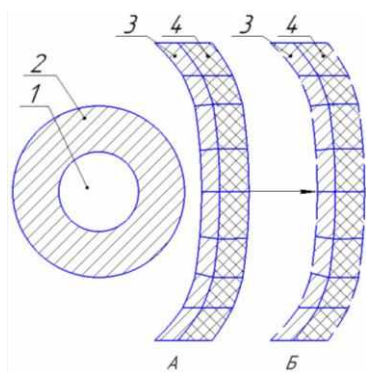
дження робітників в небезпечній зоні залежно від потужності випромінювання.

Таблиця 1

Допустима тривалість перебування людини в зоні дії випромінювання [12]

| Потужність випромінювання, Вт/м <sup>2</sup> | Допустима тривалість перебування робітників в небезпечній зоні, хв. | Тривалість перерви, не менше, хв. | Припустимий час праці у зоні протягом робочого дня, % |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------------------------|
| ≤ 350                                        | без обмежень                                                        | –                                 | 100                                                   |
| 500                                          | 20,0                                                                | 5                                 | 70                                                    |
| 700                                          | 15,0                                                                | 5                                 | 50                                                    |
| 1200                                         | 10,0                                                                | 5                                 | 50                                                    |
| 2000                                         | 5,0                                                                 | 5                                 | 50                                                    |
| 2100                                         | 4,5                                                                 | 10                                | 30                                                    |
| 2800                                         | заборонена робота без спеціальних засобів індивідуального захисту   |                                   |                                                       |

В киснево-конвертерному цеху для захисту від теплового випромінювання на відстані 1,0 м від джерела випромінювання можна встановити теплозахисний екран з алюмінієвої фольги товщиною  $\delta = 0,02$  м (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема теплозахисного екрану для зменшення дії випромінювання: А – стаціонарне положення екрану; Б – переносне положення екрану; 1 – горловина кисневого конвертеру; 2 – корпус кисневого конвертеру; 3 – відбивний матеріал (алюмінієва фольга); 4 – теплопоглинальний матеріал (термостійка цегла)

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Робоче та навколишнє середовище киснево-конвертерного цеху забруднюється насамперед тепловими викидами (з температурою до 250<sup>0</sup>С) та токсичними газоподібними викидами (у вигляді СО), що негативно впливає на умови праці в цеху. Визначено рівень безпеки кисневого конвертеру в залежності від тривалості його безаварійної роботи. Встановлено, що максимальний рівень безпеки роботи кисневого конвертеру (в межах 80–98%) досягається при тривалості його безаварійної роботи на протязі 720–2160 год. Запропоновано заходи з охорони праці в умовах киснево-конвертерного цеху, які дозволяють забезпечити дану безаварійну тривалість роботи кисневого конвертеру. Представлено методику розрахунку теплових втрат і виділень бічною поверхнею кисневого конвертера і випромінюванням через його горловину. Отримані розрахунки дозволили за рахунок встановлення теплозахисних екранів та укриття знизити радіус небезпечної зони до 1,0 м та підвищити техногенну безпеку в киснево-конвертерному цеху.

У подальших дослідженнях доцільно розглянути стан техногенної безпеки киснево-конвертерного процесу згідно циклів технологічної картки та визначити колективні та індивідуальні засоби захисту виробничого середовища та робітників киснево-конвертерного цеху при виникненні аварійних ситуацій.

#### Список літератури

1. Ломов І.М. Розробка та освоєння ефективної технології сухого волочіння сталевих катанки після механічного видалення окалини : автореф. дис. ... на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.03.05 / Ломов Ілля Миколайович; Нац. метал. акад. України. – Дніпропетровськ, 2002. – 20 с.
2. Хилько М. І. Екологічна безпека України: навч. посібн. / М. І. Хилько. – К., 2017. – 267 с.
3. Орехова О.В. Сучасний стан умов праці в металургійному виробництві України / О.В. Орехова// ScienceRise. Medical science. – 2016. – № 10. – С. 34–39.
4. Умови праці робітників підприємств чорної металургії. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://oppb.com.ua/news/umovy-praci-robotnykiv-pidpryyemstv-chornoj-metalurgiyi>
5. ДСНтаП «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу». [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0472-14#Text>
6. К вопросу повышения промышленной безопасности конвертеров и экологической безопасности процессов выплавки стали / Л.Г. Тубольцев, В.П. Корченко, В.Ф. Поляков и др.// Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. – Дніпропетровськ: ІЧМ НАН України, 2011. – Вып. 24. – С. 258–272.
7. Техника безопасности в кислородно-конвертерных цехах [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://metallplace.ru/about/stati-o-chnoy-metalurgii/tehnika-bezopasnosti-v-kislorodno-konverternykh-tsekhakh/>
8. Горохова В.А. Экологические аспекты промышленной безопасности кислородно-конвертерного производс-

- тва / В.А. Горохова, Л.Г. Тубольцев // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сб. научн. тр. – Дніпропетровськ: ІЧМ НАН України, 2010. – Вип. 22. – С. 329–339.
9. Охрана труда. Информационный ресурс. Кислородно-конвертерное производство стали [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: [http://ohrana-bgd.ru/metal/metal2\\_01.html](http://ohrana-bgd.ru/metal/metal2_01.html)
10. Тарасов В.К. Про підвищення техногенної безпеки конвертерного виробництва / В.К. Тарасов, Ю.В. Куріс, В.Р. Румянцев, І.О. Ткаліч // Металургія. 2019. – №1 (41). – С. 113–117.
11. Бринза В.Н., Зиньковский М.М. Охрана труда в черной металлургии. – М.: Металлургия. – 1985. – 192 с.
12. Бойченко Б.М. Конвертерное производство стали: теория, технология, качество стали, конструкции агрегатов, рециркуляция материалов и экология / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотский, П.С. Харлашин. – Дніпропетровськ: Дніпро-ВАЛ, 2004. – 454 с. – ISBN 966-7616-47-9.
13. Тарасов В.К. Безпека технологічних процесів і обладнання: навч. посібн. / В.К. Тарасов. – Запоріжжя: ЗДІА, 2005. – 164 с.
14. Гічов Ю.О. Вторинні енергоресурси промислових підприємств. Частина II: конспект лекцій/ Ю.О. Гічов. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2012. – 54 с.
15. Захист від іонізуючого випромінювання [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <https://sites.google.com/site/ionizuueviprominuvanna/zahist-vid-ionizuucogo-viprominuvanna>

УДК 528.4

О. І. РИБІНА<sup>\*</sup>, канд. екон. наук, доц.  
Сумський національний аграрний університет

## ДО ПИТАННЯ ОРГАНІЗАЦІЇ ТА УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ ПРОГНОЗНИХ, ПРОЄКТНИХ ТА ВИШУКУВАЛЬНИХ РОБІТ ІЗ ЗЕМЛЕУСТРОЮ

**Мета.** Сучасний період розвитку суспільства визначається як період перетворення економічних відносин, зміни суспільно-економічної формації. Основною ознакою цього процесу є виникнення різних форм власності на землю та інші засоби виробництва, а також становлення та розвиток раціональних форм господарювання в усіх сферах економіки, в тому числі й землевпорядкування. У зв'язку з різноманіттям організаційно-виробничих землевпорядних структур особливої актуальності набувають проблеми організації та планування проєктно-вишукувальних робіт. Мета цієї статті полягає у розвитку теоретичних засад та науково-методичних підходів до організації та планування проєктно-вишукувальних робіт на основі узагальнення наукових напрацювань із цього питання у вітчизняній і закордонній науковій літературі.

**Методи дослідження.** У статті використано такі загальнонаукові методи пізнання, як: індукція та дедукція, синтез та аналіз, абстрагування та конкретизація, логічне узагальнення.

**Наукова новизна.** Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає в тому, що набули подальшого розвитку теоретичні засади організації та управління виробництвом прогнозних, проєктних та вишукувальних робіт із землеустрою.

**Практична значимість.** Результати цієї роботи мають практичне значення та можуть використовуватись не лише проєктними організаціями, а й при розробці навчально-методичного забезпечення дисциплін «Організація геодезичних та землевпорядних робіт», «Економіка землекористування і землевпорядкування» і т.п.

**Результати.** За результатами виконаних досліджень обґрунтовано, що землевпорядкування – система заходів щодо раціонального використання, обліку, оцінки та поліпшення земель. Ці заходи здійснюються відповідно до землевпорядних проєктів. Систематизовано процеси організації прогнозних та проєктних робіт із землеустрою, виявлено особливості управління зазначеними видами робіт. Розглянуто можливості організації та управління виробництвом вишукувальних робіт із землеустрою на прикладі коригування топографічного матеріалу.

**Ключові слова:** вишукувальні роботи, прогнозні та проєктні роботи із землеустрою, геодезія, стадії землевпорядного процесу.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-25-29

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Землевпорядкування – це різноманітна багатогранна діяльність функціональної системи використання земель. Землевпорядкування функціонує, як проміжна діяльність по організації використання земель шляхом розробки та здійснення землевпорядних проєктів, що є результатом землевпорядного проєктування. Слід зазначити, що землевпорядний процес включає ряд стадій, і однією з основних є саме розробка та обґрунтування проєкту, що відбиває ті зміни, через які проводиться землевпорядкування на даному об'єкті. При землеустрої виконуються землевпорядні роботи, що пов'язані з вивченням, аналізом, використання земельних ресурсів. На їх основі відбувається проєкту-

вання організації території. Землевпорядні роботи базуються на трьох основних складових: технічна; економічна; юридична.

При цьому слід зазначити, що до технічної відносяться вишукувальні землевпорядні роботи, проєктний, перенесення проєкту в натуру; до економічної – агроекономічне, економічне обґрунтування проєктів та визначення економічної ефективності запроєктованих заходів; до юридичної – розгляд, погодження та затвердження проєктів та іншої землевпорядної документації. Все вишукувальні роботи діляться на польові та камеральні. Польові роботи – це вишукувальні роботи, що виконуються безпосередньо на об'єкті проєктування, в полі на місцевості. До польових робіт відносяться:

- обстеження земель;
- коригування планово-картографічних матеріалів;
- перенесення проєкт в натуру.

Головне завдання польових робіт полягає в проведенні польового землевпорядного обстеження з метою встановлення в натурі фактичного стану угідь, їх контурів, теперішньої організації територій, виявлення характеру сучасного і перспективного напрямку використання кожної ділянки землі.

Камеральні роботи – це роботи по обробці вишукувальних матеріалів, проєктованій території, оформлення документації, а також в процесі камеральних робіт вивчаються, оцінюються, систематизуються матеріали для розробки схем проєктів, робочих проєктів і оформлення землевпорядних документів. За результатами землевпорядних вишукувань складається завдання на проєктування.

Проєктні роботи діляться на складання проєктів: ескізного та технічного. Кожен з етапів включає елементи вивчення об'єкта проєктування. Складання проєкту землеустрою полягає в детальній розробці порядку використання землі за цільовим призначенням з відбиттям на планово-картографічному матеріалі меж землеволодінь і землекористувань, а також розміщення складових частин і елементів землеустрою.

При складанні схем, програм, прогнозних розробок землевпорядні роботи поділяються на такі стадії:

- підготовчі роботи;
- розробка проєктних рішень;
- техніко-економічне обґрунтування проєкту;
- розгляд, погодження та затвердження схем, програм, технічних розробок;
- виготовлення проєктної документації.

Тому виникає необхідність дослідження проєктних документів у землеустрої.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Питання організації та управління проєктно-вишукувальними роботами є предметом дослідження вітчизняних і закордонних науковців [1-6]: Лазаревої О. В., Ількова Є. Ю., Третьяка А. М., Балакірського В. Б., Червоного В. М., Петренко О. Я., Гарбуз М. М., Левитської Т. І. та інших. Вивчення та узагальнення досліджень, в яких розглядаються питання організації вишукувальних робіт із землеустрою засвідчили, що наразі відсутній системний підхід до їх узагальнення.

**Постановка задачі.** Для реалізації мети в роботі були поставлені наступні завдання:

- проаналізувати прогнозні роботи із землеустрою;
- дослідити процес організації та управління виробництвом проєктних робіт із землеустрою;
- розглянути можливості організації та управління виробництвом вишукувальних робіт із землеустрою на прикладі коригування топографічного матеріалу.

**Викладення матеріалу та результати.** Виходячи із завдань, встановлених перспективних термінів, детального опрацювання вирішуваних питань, проєктні документи заведено поділяти на прогнозні та проєктні. У землеустрої до робіт прогнозного характеру можна віднести розробку генеральних схем планування території, генеральних планів областей, районів, схем землеустрою адміністративно-територіальних одиниць і т. д. До проєктних робіт відносяться проєкти внутрішньогосподарського і міжгосподарського землеустрою, робочі проєкти щодо докорінного поліпшення земель, посадці полезахисних лісових смуг і ін.

При розробці документів прогнозного і проєктного характеру використовуються планові матеріали знімання і коригувань, ґрунтових, геоботанічних та інших видів спеціальних обстежень, що заведено відносити до категорії вишукувальних робіт.

В основі організації робіт повинні лежати загальні принципи та методи організації праці та управління виробництвом, але мають бути враховані особливості проєктних та вишукувальних робіт із землеустрою. При цьому основне завдання полягає в забезпеченні високої якості робіт, виконання їх у встановлені терміни при найменших затратах праці та коштів.

Слід зазначити, що у зв'язку зі складанням довгострокових стратегічних планів розвитку країни та адміністративних одиниць виникла необхідність в прогнозуванні використання земельних ресурсів. Ця задача вирішується при складанні генеральної схеми використання та охорони земельних ресурсів на тривалу перспективу. Схема може бути розроблена за взаємопов'язаними етапами.

Організацію прогностичних робіт із землеустрою розглянемо на прикладі складання схеми землеустрою адміністративно-територіальної одиниці. Організація будь-якої роботи, а особливо з розробки схем використання земель, пов'язана з формуванням спеціального підрозділу відповідно до обсягу, змісту, термінів початку і закінчення роботи, встановленими в наряді-замовленні. Для розробки схеми землеустрою доцільно створювати проєктні групи в складі чотирьох – шести осіб (двох – чотирьох землевпорядників, одного агронома-економіста, в необхідних випадках залучають фахівців).

Колективний характер праці вимагає, щоб при формуванні в проєктній групі зверталася увага не тільки на кваліфікацію і досвід фахівців, але і на їх психологічну сумісність. Керівник групи перед початком робіт має проводити організаційно-технічну підготовку, що включає підбір і вивчення, методичних та інструктивних матеріалів, літературних джерел, нормативів з праці для виконання окремих частин (стадій) схеми, встановлення потреби у використанні планово-топографічного обстежуваного матеріалу, визначення потреби в технічних засобах і креслярських приладах для виконання робіт.

Виходячи з планових витрат праці, на основі вивчення методичних та інструктивних вказівок, керівнику групи доцільно в письмовій формі уточнювати зміст робіт, склад продукції, що здається замовнику, і, за вказівкою керівництва проєктної організації, погоджувати їх із замовником. Такий організаційний захід необхідно робити тому, що в практиці планований обсяг праці іноді не відповідає зазначеному в методичних і інструктивних вказівках.

Складання схеми можна поділити на такі стадії:

- підготовчі роботи;
- розробка проєктне завдання;
- розробка, узгодження, оформлення справи та графічних документів, експертиза та затвердження схеми;
- розмноження матеріалів схеми для замовника.

Виходячи із завдань на складання схеми, її змісту, нормативів витрат на подібні роботи, керівник групи має встановлювати процентне співвідношення виділених стадій в загальному обсязі робіт і розробляти графік їх виконання за схемою. З графіком мають ознайомитись фахівці групи. За необхідності можуть вносити пропозиції щодо його поліпшення.

Керівник групи відповідно до графіка має довести завдання до кожного фахівця в письмовій формі. Так, підготовчий етап можна поділити на дві частини:

- збір, систематизацію та аналіз топографічного, проєктних матеріалів, матеріалів земельного кадастру, що доцільно доручати землевпорядникам;
- збір, систематизацію, аналіз даних щодо стану та перспектив розвитку сільського господарства і т. д. – агрономам-економістам.

Керівник групи в період виконання фахівцями підготовчих робіт має направляти, координувати їх роботу та одночасно готувати матеріали для розробки проєктного завдання на складання схеми. У розробці є можливість брати участь всім фахівцям групи. Розроблене завдання слід узгоджувати з усіма зацікавленими організаціями, підприємствами. Спільно з замовником воно подається на затвердження. Розрахунок економічної ефективності планованих заходів на перспективу має здійснювати керівником групи з агрономом-економістом.

Всі графічні матеріали (основні, допоміжні) і ілюстрації (схеми, діаграми, графіки, картограми та ін.) для пояснювальної записки мають готувати землевпорядники групи, пояснювальну записку з усіма розрахунками – керівник групи та агроном-економіст.

Слід звернути увагу, що у планах проєктних організацій значну питому вагу займає внутрішньогосподарське землевпорядкування. Цей вид робіт з метою планування, фінансування і розрахунку з замовником розділений на стадії:

перша – підготовчі та дослідницькі роботи;

друга – складання проєкту.

Ці роботи виконуються проєктними групами. Терміни початку і закінчення робіт, визначені ще при складанні плану проєктно-вишукувальних робіт, є відправними в загальній організації виконання цієї роботи. Крім встановлених термінів важливе значення має те, що група протягом року займається декількома об'єктами як в цілому, так і окремо по стадіях, оскільки проєктування здійснюється протягом усього року, а обстеження – тільки в польовий період. Це, своєю чергою, викликає необхідність на певних стадіях роботи застосовувати як колективну, так і індивідуальну форму організації праці.

На організацію виконання робіт значною мірою впливає розташування об'єктів, порядок та час розробки завдань на проєктування тощо. Організація робіт пов'язана зі здійсненням виробничого процесу, що визначається інструкціями, вказівками та порядком здачі робіт замовнику. Як приклад розглянемо в загальному вигляді організацію та управління виробництвом робіт по одному об'єкту з урахуванням колективної форми організації праці. В завданні проєктній групі за об'єктами повинні бути відбиті не тільки показники витрат праці, а й дані конкретні вказівки по утриманню та детальному опрацюванні окремих частин проєкту. Керівнику групи необхідно конкретно представляти зміст і обсяг робіт, розробляти та погоджувати графік їх виконання фахівцями. Це дозволить чітко визначити участь і ступінь завантаженості фахівців проєктної групи, а також загальне просування всього виробничого процесу. Графік є завершальним етапом управлінського рішення керівників групи, здійснення його пов'язано з прийняттям організаційних заходів і контролю за виконанням завдань фахівцями.

Варто зазначити, що проєктні, дослідні та інші види робіт із землеустрою пов'язані з використанням топографічного матеріалу. Зазначений матеріал повинен відповідати фактичному розташуванню і стану використання земельних угідь. Виникає необхідність коригування матеріалів, оскільки по завершенню навіть двох-трьох років він є застарілим. Воно виконується фахівцями, які мають відрядно-преміальну систему оплати праці. Коригування планового матеріалу виконується в межах кожного землекористування, яке виступає як самостійний об'єкт. В завданні повинні бути відбиті основні показники, що характеризують об'єкт робіт (назва господарства, його площа, категорія складності робіт), зміст роботи, норми виробітку, календарні терміни виконання робіт, інструкції, розмір преміального фонду тощо. Коригування може здійснюватися на підготовчу, польову і камеральну роботи.

Спеціаліст (інженер або технік-землевпорядник), отримавши завдання на проведення робіт, вивчає інструкцію, проводить збір необхідних матеріалів, довідок, планового матеріалу, отримує необхідні інструменти, приладдя, бланки, журнали та ін. Усі копії технічних документів (відомість координат і ін.) повинні обов'язково бути звірені та підписані.

При отриманні інструментів і приладдя необхідно переконатися в їх справності та комплектності. Плановий матеріал необхідно проаналізувати на якість його виготовлення, наявність деформації та ін.

На об'єкті фахівець організовує собі приміщення зручне для роботи, розв'язує питання про робітників і проводить з ними інструктаж з техніки безпеки та охорони праці, навчає їх прийомам виконання робіт.

Успіх роботи залежить від чіткості виконання графіка завдання, розпорядку дня і розподілу обов'язків між робітниками. Перед початком коригування проводять обстеження зовнішніх меж землекористування і території. За необхідності виконавець складає проєкт створення робочого обґрунтування, розробляє порядок і технологію виробництва робіт. У процесі коригування фахівець зобов'язаний систематично здійснювати самоконтроль за якістю робіт, забезпечувати загальну злагоду в колективі, щодня аналізувати польові матеріали та заповнювати кальку контурів.

Керівник групи систематично має допомагати виконавцям в організації та технічному виконанні робіт. Залежно від її тривалості він щомісяця має здійснювати контроль. Приймаючи виконану роботу має звертати увагу на виправлення недоліків, зазначених в попередніх актах.

У процесі остаточного контролю ведеться коректурний аркуш, на підставі якого складається акт приймання роботи в цілому. Оскільки керівник групи несе відповідальність як і виконавець за якість і терміни виконання робіт, тому він зобов'язаний надавати допомогу виконавцям у вирішенні технологічних і організаційних питань.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** В процесі дослідження проаналізовано процеси організації прогностичних та проєктних робіт із землеустрою, виявлено особливості управління зазначеними видами робіт. Розглянуто можливості організації та управління виробництвом вишукувальних робіт із землеустрою на прикладі коригування топографічного матеріалу. Визначено, що керівництво прогностичною, проєктною та вишукувальною роботою здійснюється на основі забезпечення скоординованості організації робіт виробництва, планування та управління, роль яких обумовлюється рядом факторів (складністю та обсягами виконання робіт, чисельністю працівників, підрозділів та ін.). Виконання проєктних та вишукувальних робіт зумовлює необхідність відповідної структури управління, планування робіт нормування і досвід роботи. Всі ці елементи є складовою частиною землепорядного виробництва, що включає планово-організаційну діяльність членів суспільства у сфері землеустрою.

### Список літератури

1. Лазарева О. В. Організація і управління землепорядним виробництвом. Миколаїв: Вид-во ЧНУ ім. Петра Могили, 2018. 160 с.
2. Ільків С. Ю. Організація і управління виробництвом. Івано-Франківськ: ІФНТУНГ, 2014. 121 с.
3. Балакірський В.Б., Червоний В.М., Петренко О.Я., Гарбуз М.М. Геодезичні роботи при землеустрої. Харк. нац. аграр. ун-т ім. В. Докучаєва, 2008. 226 с.
4. Третяк А. М. Землепорядне проєктування: Теоретичні основи і територіальний землеустрій. К. : Вища освіта, 2006. 528 с.
5. Левитская Т. И. Основы геодезии. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2017. 88 с.
6. Третяк А.М., Третяк В.М., Третяк Р.А. Землепорядне проєктування: розроблення проєктів землеустрою щодо встановлення (відновлення) меж населених пунктів. Херсон: Олді-Плюс, 2017. 180 с.
7. Закон України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність» [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>
8. Закон України «Про землеустрій» [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/858-15#Text>
9. Земельний кодекс України [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2768-14#Text>
10. Закон України «Про державний земельний кадастр» [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3613-17#Text>

УДК 621.929.6:622.781

В. Й. ЗАСЕЛЬСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., Д. В. ПОПОЛОВ,

І. В. ЗАСЕЛЬСЬКИЙ, кандидати техн. наук, доценти

Технологічний навчально-науковий інститут Державного університету економіки та технологій

М. І. ШЕПЕЛЕНКО, асп., Криворізький національний університет

### ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНІЧНОЇ СИСТЕМИ «РОТОРНИЙ ЗМІШУВАЧ-КОНВЕЄР» ГОРИЗОНТАЛЬНО-НАПРАВЛЕНОЇ ДІЇ

**Мета.** Основним процесом в технологічних схемах підготовки шихтових матеріалів сучасного металургійного виробництва є процес змішування. Для реалізації процесу змішування може бути застосований роторний змішувач безперервної горизонтально-направленої дії. Метою лабораторних досліджень було отримання лінійної математичної моделі процесу змішування в технічній системі безперервної дії «роторний змішувач-конвеєр», а також визначення її раціональних конструктивних параметрів, що впливають на якість змішування матеріалу.

**Методи дослідження.** В даній науковій праці представлена методика досліджень, яка включає аналітичний аналіз який виконувався на основі представлення динаміки руху матеріальної точки та твердих тіл, що рухаються в вібраційній горизонтальній площині при їх безпосередній взаємодії. Також застосовано метод планування повного

факторного експерименту, виконана перевірка адекватності моделі по критерію Стюдента та використані математичні методи обробки даних.

**Наукова новизна.** Вперше для лабораторного зразка технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» отримані лінійні залежності, які характеризують гомогенність готової суміші при раціональній взаємодії кінематичних та конструктивних параметрів роторного змішувача при вібраційному прискоренні та навантаженні конвеєрної стрічки. З дослідження встановлено, що для дослідної системи «роторний змішувач-конвеєр», при постійних конструктивних та кінематичних параметрах стрічки конвеєра якість змішування прямопропорційно залежить від висоти шару матеріалу.

**Практична значимість.** В статті наведено схему та принцип роботи лабораторного стенду системи роторний змішувач безперервної горизонтально-направленої дії та стрічковий конвеєр, також описаний хід проведення попереднього та повного факторного експериментів. Встановлений зв'язок між кінематичними та конструктивними елементами робочого органу змішувача, висотою шару транспортуючого матеріалу та вібраційного прискорення конвеєрної стрічки, що впливають на якість змішування матеріалу. Визначені раціональні параметри системи «роторний змішувач-конвеєр».

**Результати.** Визначено основні фактори, які безпосередньо впливають на якість змішування; наведений хід проведення експерименту; отримана математична модель, яка описує процес змішування в технічній системі безперервної, горизонтально-направленої дії.

**Ключові слова:** змішувач, матеріал, шар, експеримент, робочий орган, ротор, фактор, змішувач, технічна система, конвеєр.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-29-35

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Як відомо операція змішування є базовою в металургічних технологічних схемах, адже за нею тягнеться подальший технологічний цикл. Також відомо, що змішувальне устаткування схильне до постійного зносу внаслідок безперервного тертя при транспортуванні шихтової суміші. Для усунення вищезгаданих недоліків доцільним є удосконалення роторного змішувача безперервної-горизонтально направленої дії шляхом створення додаткового вібраційного впливу на конвеєрну стрічку. Для визначення основних конструкційних та кінематичних залежностей технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» авторами був розроблений лабораторний стенд, який є зменшеним прототипом реального промислового об'єкту.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Аналіз найбільш сучасних концептуальних робіт [1-4] присвячених лабораторним дослідженням апаратів для змішування показав, що основоположним є встановлення найбільш значущих факторів, що мають безпосередній вплив на якість змішування суміші.

**Постановка завдання.** Задачею досліджень є отримання лінійної математичної моделі процесу змішування в технічній системі безперервної дії «роторний змішувач-конвеєр» та визначення її раціональних конструктивних та кінематичних параметрів, що впливають на якість змішування матеріалу.

**Викладення матеріалу та результати.** Для можливості оцінки якісних факторів що впливають на суміш, яка одержується в системі «роторний змішувач-конвеєр», та оцінки продуктивності даної системи, виготовляємо її лабораторну модель, яка наведена на рис. 1.

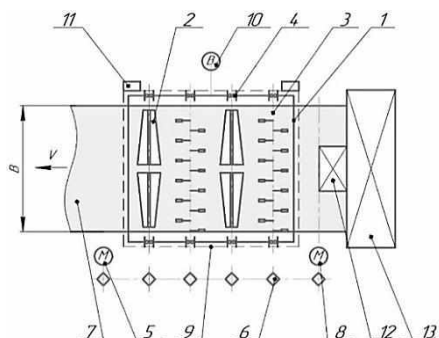


Рис. 1 Схема лабораторної установки

Лабораторний стенд роторного змішувача (рис.1) представлений у вигляді системи конвеєр-роторний змішувач та складається з корпусу 1, в якому встановлені вали з двома типами насадок, лопатками 2 або з гнучкими тросовими елементами 3; вали опираються на шарики-опори 4; обертання валів здійснюється двома синхронізованими двигунами постійного струму 5, типу МВ-42, через ланцюгову передачу 6 з передатним відношенням  $i = 2$ ; конвеєрної стрічки 7, встановленої під змішувачем, з відповідним електродвигуном 8, типу МВ-42 (при цьому конвеєрна стрічка 7 має постійну ширину  $B$  та рухається з постійною швидкістю  $V$ ); вібруючої поверхні 9 з вібродвигуном 10, типу VV038/4 з робочою частотою 50 Гц, та датчиками фіксування вібраційного прискорення 11, типу Wintact WT63B з точністю вимірювання 0,001 Гц; двох бункерів 12 та 13 для звичайного та ключового компонентів. Для дослідження також використовувались ваги марки

РН10Ц13У ГОСТ 13882-68; частотний перетворювач типу, SYSDRIVE 3G3HV INVERTER; амперметр 3365-1; стробоскоп СШ-2; ємність для змішаного матеріалу та електронний секундомір. Фото моделі технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» наведено на рис 2.

Планування досліджень проточного змішувача спрямовано на одержання максимальної інформації при мінімальних витратах на експериментування, що дозволить визначити значимість факторів, описати процес змішування математичною моделлю та систематизувати експериментальний матеріал.

Оскільки метою досліджень є математичний опис процесу змішування матеріалів в системі «роторний змішувач-конвеєр» та вироблення технологічних висновків, виконуємо планування й проведення експерименту за такою послідовністю: вибір параметрів оптимізації; вибір факторів; визначення області оптимуму; аналіз отриманих результатів.

В якості параметра оптимізації приймаємо показники, які найбільше повно відображають якість отриманої суміші й ефективність процесу змішування матеріалу в системі «роторний змішувач-конвеєр», а саме коефіцієнт варіації. Коефіцієнт варіації визначаємо по формулі

$$V_c = \frac{100}{\bar{c}} \cdot \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2}, \quad (1)$$

де  $\bar{c}$  – середнє арифметичне значення концентрації ключового компонента у всіх  $n$  пробах суміші, %;  $c_i$  – концентрація ключового компонента в  $i$ -й пробі суміші, %.

Продуктивність визначаємо по формулі

$$Q = 3600 \cdot B \cdot H \cdot V \cdot j, \quad (2)$$

де  $H$  – висота шару матеріалу;  $B$  – ширина конвеєрної стрічки;  $V$  – швидкість конвеєрної стрічки;  $j$  – питома вага матеріалу.

Так як величини  $B$ ,  $V$  та  $j$  є постійними, можна ототожнити, що продуктивність безпосередньо залежить від висоти шару матеріалу.

Коефіцієнт варіації у статистичному змісті є ефективним, а це значить, що він визначається з достатньою точністю й має ясний фізичний зміст, що скорочує можливість помилки при визначенні обраних параметрів оптимізації. Крім цього обрані параметри мають однозначність, що дозволяє визначити одне значення параметра оптимізації для загального процесу.

Прийняті фактори, згідно з [5], повинні відповідати наступним вимогам: між факторами не повинно бути зв'язку; фактори повинні мати сумісність; фактори повинні досить точно вимірюватися й підтримуватися на певному рівні.

З огляду на перераховані вимоги, приймаємо наступні фактори: інтенсивність завантаження (висота шару)  $X_1$ , мм; частота обертання валів моделі  $X_2$ , с<sup>-1</sup>; вібраційне прискорення стрічки конвеєра  $X_3$ , м/с<sup>2</sup>.

Варіювання факторів здійснюється на двох рівнях, тому задається верхній і нижній рівні фактору, а також нульова відмітка. Інтервал між нульовим та верхнім, а також нульовим та нижнім рівнями (інтервал варіювання) обирається однаковий. При виборі інтервалу варіювання є певні труднощі: інтервал варіювання повинен бути досить малим, щоб одержати лінійне рівняння, але разом з тим і досить великий щоб не одержати помилкового висновку про незначущий вплив того чи іншого фактору [6].

З огляду на вище сказане, приймали наступні рівні варіювання факторів, що зводяться до табл. 1.

Таблиця 1

Рівні вимірювання факторів

| Рівень            | Висота шару, мм | Число обертів, об/хв | Прискорення, м/с <sup>2</sup> |
|-------------------|-----------------|----------------------|-------------------------------|
|                   | $X_1$           | $X_2$                | $X_3$                         |
| Верхній (+1)      | 20              | 164                  | 25                            |
| Нульовий (0)      | 15              | 148                  | 15                            |
| Нижній (-1)       | 10              | 132                  | 5                             |
| Інтервал варіації | 5               | 16                   | 15                            |

У дослідженнях механізму перемішування матеріалу застосовувалась так названа ідеальна система, тобто система сферичних часток одного виду матеріалу однакових розмірів [7]. З огляду на вище перераховані вимоги, як матеріал для дослідження застосовуємо пшона. Щоб виділити в цій системі компоненти, частина пшона забарвлюється в червоний колір та використовується як ключовий компонент.

Експеримент проводили при варіаціях встановлення роторів різних типів (лопастного і тросового) та їх комбінацій над конвеєрною стрічкою при наступних режимах роботи системи «роторний змішувач-конвеєр»: частота обертання валів  $\omega = 14 \div 17 \text{ c}^{-1}$ ; висота шару матеріалу  $H = 0,005 \div 0,025 \text{ м}$ ; пропорція ключового компонента в суміші становила 10% від загальної кількості матеріалу.

Перед проведенням дослідів перевірялася вага матеріалу. Потім матеріал викладався шарами на конвеєрну стрічку. Нижній шар формувался із не фарбованого пшона, тоді як верхній - із пофарбованого у червоний колір. Після завершення формування шарів вмикалося живлення електродвигуна та проводились вимірювання частоти обертів валів за допомогою стробоскопа та вимірювання вібраційного прискорення за допомогою датчика Wintact WT63B. Далі вмикався секундомір, який зупиняли при повному витoku матеріалу з конвеєрної стрічки в розміщену під нею ємність. З ємності (піддону) брались проби суміші, з яких відокремлювали частки червоного та природнього кольорів, які далі зважували і одержували їх співвідношення. Одержані дані фіксувались в лабораторному журналі. Кожен дослід повторювався три рази.

Оцінку отриманих сумішей у результаті проведення дослідження на моделі ротору здійснювали з використанням формул (1) та (2).

В табл. 2 наведені дані, що відображають коефіцієнт варіації в залежності від варіантів розташування різних типів роторів. Умовні позначення в таблиці «Л» - лопастний ротор, «Т» - тросовий ротор. Результати проведених досліджень відображені в графіках, що відображають залежність коефіцієнта варіації: від типу роторів та частоти обертання рис. 3; від висоти шару матеріалу рис. 4.

Таблиця 2

Залежність коефіцієнту варіації від комбінацій типів роторів

| Варіант розташування та послідовності роторів | Коефіцієнт варіації, % |                      |                    |                    |                    |
|-----------------------------------------------|------------------------|----------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|                                               | 1, $\text{c}^{-1}$     | 14,5 $\text{c}^{-1}$ | 15 $\text{c}^{-1}$ | 16 $\text{c}^{-1}$ | 17 $\text{c}^{-1}$ |
| «Л»                                           | 8,46                   | 6,50                 | 6,66               | 6,14               | 3,49               |
| «Т»                                           | 8,14                   | 5,52                 | 7,81               | 5,34               | 5,78               |
| «Л»+«Т»                                       | 3,14                   | 6,35                 | 5,51               | 3,67               | 4,01               |
| «Т»+«Л»                                       | 6,53                   | 4,65                 | 5,14               | 3,80               | 3,14               |

З проілюстрованих графіків видно, що найбільший вплив на якість змішування матеріалу має поєднання тросового та лопастного роторів («Т+Л»). Неменше вагомим фактором є висота шару матеріалу, але варто відмітити, що зі збільшенням висоти шару матеріалу покращується якість змішування. Встановлено, що для дослідної системи «роторний змішувач-конвеєр», при постійних конструктивних та кінематичних параметрах стрічки конвеєра якість змішування прямопропорційно залежить від висоти шару матеріалу.

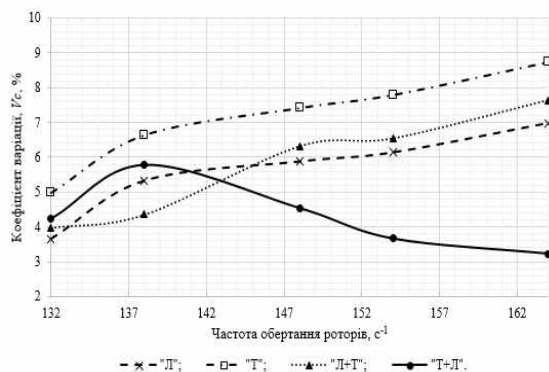


Рис. 3 Залежність коефіцієнту варіації від типу ротору та частоти обертання

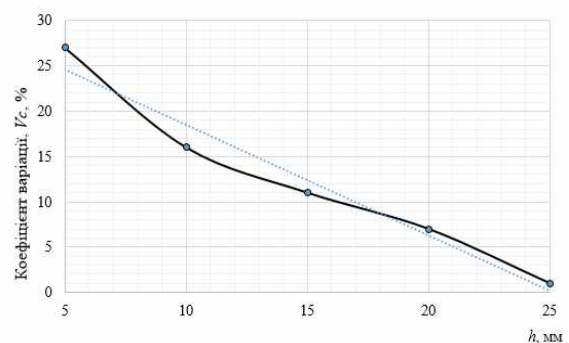


Рис. 4 Залежність коефіцієнту варіації від висоти шару матеріалу

За результатами попереднього експерименту визначено, що якість суміші  $V_c$  підвищувалась при наступних параметрах: частота обертання валів роторів  $\omega = 15 \text{ с}^{-1}$ ; висота шару матеріалу  $H = 0,02 \text{ м}$ , при більшому завантаженні ( $H \leq 0,025 \text{ м}$ ) присутнє значне прокидання матеріалу за борти корпусу установки; застосування комбінації тросового та лопастного роторів.

Для одержання математичної моделі процесу змішування матеріалу на роторному змішувачі застосовувався повний факторний експеримент типу  $2^3$ . Для застосування стандартної ортогональної план-матриці експерименту переводимо натуральні фактори в безрозмірні величини, по формулі

$$x_i = (x_i - x_i^0) / \Delta x_i, \quad (3)$$

де  $x_i$  – натуральне значення  $i$ -го фактору на певному рівні (верхньому або нижньому);  $x_i^0$  – натуральне значення  $i$ -го фактору на нульовому рівні;  $\Delta x_i$  – інтервал варіювання  $i$ -го фактору.

Натуральні й кодовані значення факторів обираються з табл.1. Досліди проводились при різних режимах роботи моделі [6]. Для того щоб додати елемент випадковості впливу факторів на результати експерименту, а це необхідно для обґрунтування використання апарата математичної статистики, установлюється випадковий порядок постановки дослідів у часі.

Оцінку якості отриманих сумішей у результаті проведення дослідження здійснювали по формулі (1). Також розраховувались по формулі (2) та фіксувались значення продуктивності при різних режимах роботи системи «роторний змішувач-конвеєр». При цьому контролювалась потужність електродвигунів. Значення коефіцієнта варіації та потужності вносимо в табл.3.

Таблиця 3

Отримані дані

| № досліду | Потужність        |                   |                   | Параметри оптимізації |                    |                    |         |                |              |              |         |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------------|--------------------|--------------------|---------|----------------|--------------|--------------|---------|
|           | $N_1, \text{ Вт}$ | $N_2, \text{ Вт}$ | $N_3, \text{ Вт}$ | серія дослідів        |                    |                    | середнє | серія дослідів |              |              | середнє |
|           |                   |                   |                   | $Q_1, \text{ т/г}$    | $Q_2, \text{ т/г}$ | $Q_3, \text{ т/г}$ |         | $V_{c1}, \%$   | $V_{c2}, \%$ | $V_{c3}, \%$ |         |
| 1         | 0,27              | 0,27              | 0,27              | 1,178                 | 1,074              | 1,14               | 1,13    | 15,78          | 14,65        | 15,65        | 15,36   |
| 2         | 0,31              | 0,31              | 0,31              | 2,35                  | 2,42               | 2,416              | 2,40    | 2,54           | 2,78         | 2,98         | 2,77    |
| 3         | 0,30              | 0,30              | 0,305             | 2,045                 | 2,07               | 2,052              | 2,06    | 4,65           | 4,87         | 4,32         | 4,61    |
| 4         | 0,28              | 0,28              | 0,28              | 1,88                  | 1,87               | 1,98               | 1,91    | 7,46           | 7,65         | 7,65         | 7,59    |
| 5         | 0,28              | 0,27              | 0,28              | 1,62                  | 1,65               | 1,67               | 1,65    | 7,65           | 6,65         | 7,90         | 7,40    |
| 6         | 0,3               | 0,3               | 0,29              | 1,34                  | 1,35               | 1,45               | 1,38    | 12,48          | 11,64        | 12,64        | 12,26   |
| 7         | 0,305             | 0,3               | 0,305             | 1,15                  | 1,023              | 1,147              | 1,11    | 15,65          | 14,57        | 14,65        | 14,96   |
| 8         | 0,275             | 0,275             | 0,28              | 1,24                  | 1,235              | 1,34               | 1,27    | 10,54          | 11,49        | 11,78        | 11,27   |

Отримані результати дозволяють описати залежність якості змішування матеріалу та продуктивності від обраних факторів за допомогою лінійної моделі

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3, \quad (4)$$

де  $b_0, b_i$  – коефіцієнти регресії, які визначаються по формулам

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n}, \quad b_i = \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sum_{i=1}^n x_i^2}, \quad (5)$$

де  $\bar{y}_i$  – середнє арифметичне значення відгуку при  $i$ -тому сполученні факторів;  $x_i$  – кодоване значення  $i$ -го фактору на  $i$ -тому поєднанні факторів, з табл.3.

Розрахункові значення коефіцієнтів регресії наведені в табл.4.

З урахуванням розрахункових значень коефіцієнтів регресії було отримано лінійні математичні моделі, які відображають залежність якості суміші і продуктивності від обраних факторів

$$V_c = 9,527 - 4,019 \cdot x_1 - 0,823 \cdot x_2 - 0,934 \cdot x_3, \quad (6)$$

$$Q = 1,614 - 0,373 \cdot x_1 - 0,129 \cdot x_2 - 0,147 \cdot x_3, \quad (7)$$

Оцінку адекватності отриманої моделі перевіряли за допомогою критерія Стюдента [6,7], де середньоквадратична помилка коефіцієнтів регресії визначалась як [8]

Таблиця 4  
Розрахункові значення коефіцієнтів регресії

| $V_c, \%$  |          | $Q, \text{ т/г}$ |          |
|------------|----------|------------------|----------|
| коэф. рег. | значення | коэф. рег.       | значення |
| $b_0$      | 9,527    | $b_0$            | 1,614    |
| $b_1$      | -4,019   | $b_1$            | 0,373    |
| $b_2$      | -0,823   | $b_2$            | 0,129    |
| $b_3$      | -0,934   | $b_3$            | 0,147    |

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^m (y_{ij} - \bar{y}_i)^2}{n \cdot n_1 \cdot (m-1)}}, \quad (8)$$

де  $n_1$  – кількість дослідів з повторами;  $m$  – кількість повторів кожного дослідів;  $y_{ij}$  – значення параметра оптимізації  $i$ -го дослідів в  $j$ -у повторному досліді;  $\bar{y}_i$  – середнє значення параметра оптимізації в  $i$ -у досліді;  $n$  – кількість дослідів в матриці.

Число степенів свободи критерія Стюдента було одержано за формулою

$$f = n \cdot (m-1). \quad (9)$$

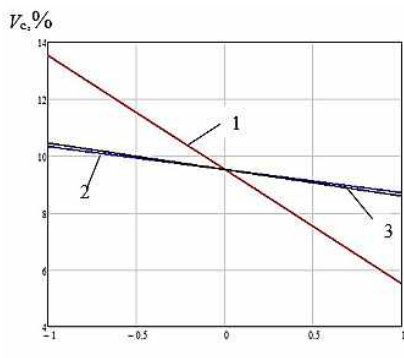
А довірчий інтервал визначався як

$$\Delta b_i = \pm t_{(0,05f)}^{мabl} \cdot S_{bi} \approx \pm 2 \cdot S_{bi}, \quad (10)$$

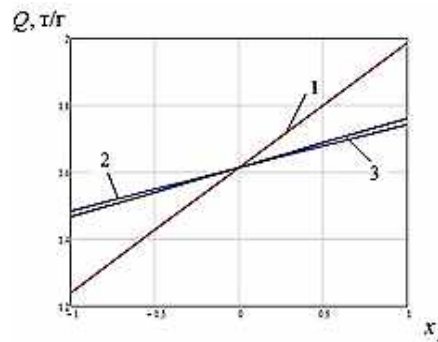
де  $\pm t_{(0,05f)}^{мabl}$  – табличне значення критерію Стюдента при 5% рівні значимості.

Адекватність моделі вважалась обґрунтованою, якщо його розрахункове значення було менше або дорівнювало його табличному значенню при 5%-му рівні значимості. Здійснивши розрахунки за (8) – (10) було встановлено, що рівняння (6) та (7) адекватно описують процес, так як  $\Delta b_{i(Vc)} = 0,582$ ;  $\Delta b_{i(Q)} = 0,06$ .

Отримані регресійні рівняння (6) та (7) були піддані графічному аналізу, що дозволив наочно встановити ступінь впливу кожного фактору на параметр оптимізації. З наведених залежностей (рис. 5, 6) видно, що найбільш впливовим фактором є висота шару матеріалу ( $H = 20$  мм).

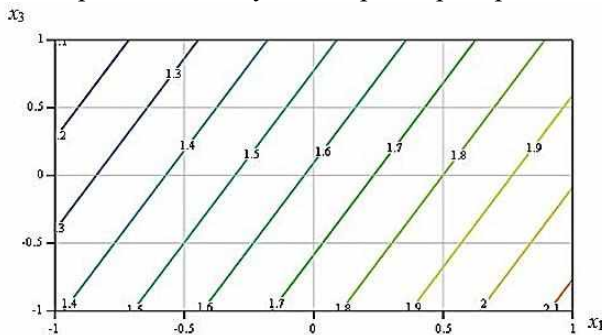


**Рис. 5** Залежність коефіцієнта варіації від факторів: 1 – інтенсивність завантаження (висота шару); 2 – частота обертання валів моделі; 3 – вібраційне прискорення стрічки конвеєра



**Рис. 6** Залежність продуктивності від факторів: 1 – інтенсивність завантаження (висота шару); 2 – частота обертання валів моделі; 3 – вібраційне прискорення стрічки конвеєра

Для обраних діапазонів частот обертання роторів та прискорень коливань конвеєрної стрічки при їх безпосередньому збільшенні виникає тенденція і до збільшення якості змішування суміші, а саме при збільшенні оборотів ротора на 15 %, а при прискоренні до 16 %. З приведенного графіку на рис.6 залежності продуктивності від дослідних факторів витікає, що зі збільшенням висоти шару матеріалу зростає і продуктивність змішувача. Встановлено, що для дослідної системи конвеєр-роторний змішувач, при постійних конструктивних та кінематичних параметрах стрічки конвеєра якість змішування прямопропорційно залежить від висоти шару матеріалу.



**Рис.7** Двовимірний переріз поверхні відгуку при взаємодії факторів  $x_1$  та  $x_3$

Для оцінки взаємовпливу інтенсивності завантаження та вібраційного прискорення стрічки конвеєра був побудований графік двовимірного перерізу поверхні відгуку (рис. 7). З графіку видно, що максимальне значення продуктивності відповідає максимальним значенням інтенсивності завантаження та вібраційного прискорення стрічки.

Так як для опису процесу змішування використовувались два параметри оптимізації, була проведена оцінка кореляції між коефіцієнтом варіації та продуктивністю, коефіцієнт кореляції склав 0,96, що вказує

на сильну кореляційну залежність.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** В результаті проведених досліджень була отримана лінійна математична модель процесу змішування в технічній системі безперервної дії «роторний змішувач-конвеєр», а також визначені її раціональні конструктивні параметри, що впливають на якість змішування матеріалу.

### Список літератури

1. Винарский М.С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М.С. Винарский, М.В. Лурье. - К.: Техника, 1975. - 168 с. .
2. Ковшов В.Н. Постановка инженерного эксперимента / В. Н. Ковшов. - Киев-Донецк: Вища школа, 1982. - 120 с.
3. Белай Г.Е. Организация металлургического эксперимента - учеб. пособие [для вузов] / Г. Е. Белай, В. В. Дембовский, О. В. Соценко / под ред. В. В. Дембовско-го. - М.: Металлургия, 1993. - 256 с.
4. Гуливец А.А. Методика поиска решения творческих задач по созданию способов воздействия на материальные объекты / А. А. Гуливец, И. В. Засельский, Г. Л. Зайцев, К. В. Федоренко // Теорія та методика навчання фундаментальних дисциплін у вищій школі: 36. наук. праць. Вип. V. – Кривий Ріг: Видавничий відділ НметАУ, 2008. – С. 245 – 247.
5. Стренк Ф. Перемешивание а аппараты с мешалками / Ф. Стренк // Пер. с польск. под ред. Щупляка И. А. — Л.: «Химия», 1975. — 384 с.
6. Белай Г.Е. Организация металлургического эксперимента / Г.Е. Белай, В.В Дембовский. и др. // Учебное пособие для вузов. — М.: Металлургия, 1993. — 256 с.: ил. — ISBN 5-229-00835-0.
7. Бакланов Н.А. Перемешивание жидкостей / Н.А. Бакланов // Л.: Химия, 1979. — 64 с.: ил.
8. Рыжов П. А. Математическая статистика в горном деле / П. А. Рыжов. — М.: Высшая школа, 1973. — 287 с.
9. Ахназаров С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологии – учеб. пособие [для химико-технологических вузов] / Ахназаров С. Л., Кафаров В. В. — М.: Высш. школа. —1978— . 319 с., ил.
10. Учитель А. Д. Экспериментальные исследования динамики вибромашины, работающей в режиме «биений» / А. Д. Учитель, В. И. Засельский, С. В. Швед, И. В. Засельский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2007. – № 3. – С. 102–104.

УДК 658.567.1:621.794.42]:621.774

Є.А. МАНІДІНА, К.В. БЕЛОКОНЬ, О.С. ВОДЕННІКОВА,  
В.Г. РИЖКОВ, кандидати техн. наук, доценти, О.О. ТРОЇЦЬКА, канд. біол. наук, доц.  
Запорізький національний університет

## УТИЛІЗАЦІЯ СОЛЯНОКИСЛИХ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ТРАВІЛЬНИХ РОЗЧИНІВ ПРОКАТНОГО ВИРОБНИЦТВА

**Мета.** Визначити параметри переробки солянокислих відпрацьованих травільних розчинів прокатного виробництва з отриманням залізного коагулянту.

**Методи дослідження.** При виконанні роботи використовувались санітарно-гігієнічні, аналітичні, математичні, статистичні методи дослідження. Статистична обробка результатів проводилась з використанням комп'ютеризованої програми Microsoft Excel.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що за результатами проведених експериментальних досліджень у роботі:

встановлено вплив параметрів обробки відпрацьованих травільних розчинів на якість отриманого коагулянту; розроблена апаратурно-технологічна схема переробки відпрацьованих травільних розчинів з отриманням залізного коагулянту.

**Практична значимість.** Запропонована технологія утилізації солянокислих відпрацьованих розчинів, яка може бути рекомендована для використання на металургійних підприємствах України. Матеріали роботи впроваджені у навчальний процес кафедри прикладної екології та охорони праці Запорізького національного університету.

**Результати.** Встановлено, що найбільш перспективними методами обробки солянокислих відпрацьованих травільних розчинів є методи з отриманням товарного продукту. Визначено, що переробку солянокислих відпрацьованих травільних розчинів найбільш доцільно проводити з одержанням коагулянту. Встановлено, що при витраті повітряної суміші, що містить озон, 0,5 л/хв повне окиснення ферум (II) хлориду до ферум (III) хлориду відбувається через 36 хв від початку обробки. При витраті повітряної суміші, що містить озон, 1,5 л/хв повне окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду відбувається через 18 хв від початку обробки. Встановлено, що повне окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду за допомогою озону відбувається в 1,5 рази швидше ніж киснем. Експериментально встановлено, що ефективна доза коагулянту ферум (III) хлориду для осадження коричневого залізного

пігменту в розчині становить 62 мг/л. Розроблена принципова апаратурно-технологічна схема переробки солянокислих відпрацьованих розчинів з отриманням коагулянту – ферум(III) хлориду.

**Ключові слова:** прокатне виробництво, солянокислий відпрацьований травильний розчин, ферум(II) хлорид, озон, утилізація, ефективна доза коагулянту

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-35-39

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** В результаті дії на метал високих температур на його поверхні утворюється окалина. Склад окалини залежить від режиму температурної обробки металу та складається із трьох оксидів: FeO, Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Відомо, що при низькій температурі окалина в своєму складі буде містити лише два оксиди: Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Дані оксиди розчиняються в травильних кислотах з різною швидкістю. Оксид FeO розчиняється найбільш швидко, повільніше розчиняється оксид заліза Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, а повільніше за всіх – Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Процес травлення сталевих заготовок у сірчаній кислоті та у соляній кислоті мають значні відмінності: різні швидкості розчинення заліза в цих кислотах, різна кінетика процесу [1,2].

Сьогодні на металургійних підприємствах травлення металу найчастіше відбувається за допомогою соляної кислоти. Процес травлення в розчинах соляної кислоти проходить при температурі 20-30 °С, що обумовлено високою летучістю її парів, які шкідливо впливають на організм обслуговуючого персоналу та викликають корозію обладнання. Використання травильного розчину відбувається до зниження концентрації кислоти в розчині до 5-7% [2].

Склад відпрацьованих травильних розчинів сильно відрізняється, тому що він залежить від хімічного складу свіжої ванни й категорії оброблюваного металу. Однак загальною характерною рисою всіх стічних вод травильних відділень є низька концентрація кислот і висока концентрація іонів металів. Приблизний склад відпрацьованих травильних розчинів [1,2] : температура розчину – 20-30 °С; водневий показник, рН – 1-2; концентрація ферум(II) хлориду – 120-250 г/л; концентрація соляної кислоти – 20-60 г/л.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Теоретичний аналіз показав, що солянокислі відпрацьовані розчини можливо перероблювати з одержанням цінних продуктів: бішофіту (MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O), пігментів (FeOOH), коагулянтів (FeCl<sub>3</sub>). За результатами теоретичних досліджень встановлено, що переробка відпрацьованих солянокислих травильних розчинів з одержанням залізного коагулянту FeCl<sub>3</sub> є найбільш економічно-доцільною [2-11].

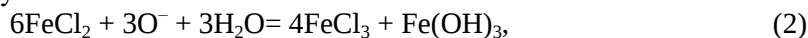
У разі наявності на підприємстві відпрацьованих азотнокислих травильних розчинів (ВАТР) більш економічно застосовувати для окиснення ферум(II) хлориду заліза пароповітряну суміш з ВАТР за запропонованою нижче технологією [10]:

обробка розчину, що містить ферум(III), пароповітряною сумішшю;

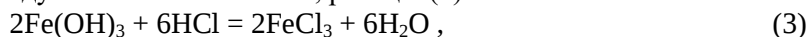
розпад ферум(III) нітрату з виділенням атомарного кисню, реакція (1):



окиснення ферум(II) хлориду атомарним киснем за реакцією (2) з утворенням ферум(III) хлориду та ферум(III) гідроксиду:



взаємодія ферум(III) гідроксиду з соляною кислотою, реакція (3):



при охолодженні суспензії утворюється кристалічний коагулянт за реакцією (4):



Отже саме наявність в розчині атомарного кисню (формула (2)) буде обумовлювати швидкість та повноту протікання процесу окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду. А реакція (1) необхідна лише для насичення розчину атомарним киснем.

**Постановка завдання.** Метою роботи є визначити параметри переробки відпрацьованих солянокислих травильних розчинів прокатного виробництва з отриманням залізного коагулянту – ферум(III) хлориду.

**Викладення матеріалу та результати.** Процес коагуляції та очищення води залежить від таких чинників: доза коагулянту, іонний склад та рН води, яка очищається, температура розчину. Також на процес коагуляції буде впливати і склад коагулянту [12,13].

Відомо, що при оптимальній дозі коагулянту досягаються максимальне видалення з води забруднюючих речовин і мінімальні залишкові концентрації заліза у воді. Встановлення оптимальної дози коагулянту відбувалося при кількісному визначенні прозорості води "за шрифтом".

Концентрацію загального заліза та ферум(II, III) іонів у модельному розчині визначають фотокolorиметричним методом із сульфосаліциловою кислотою (КНД 211.1.4.040-95) [14]. Фотометрування проб проводять при довжині хвилі 410-440 нм для загального заліза й при довжині хвилі 490-520 нм для заліза(III).

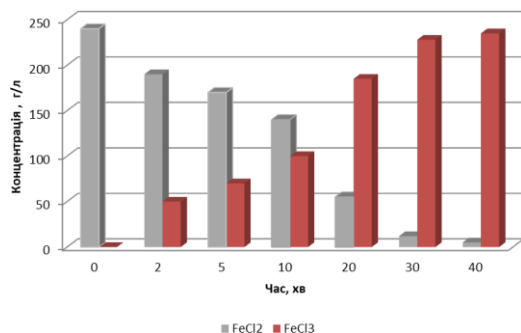
Вимірювання величини водного показника проводили з використанням рН-метра типу рН-150 і приладу EZDO-7200-PH-TDS-SALT (погрішність приладів 0,05-2 %).

Математична обробка експериментальних даних проводилась на основі перевірки нормальності розподілу випадкової величини [15].

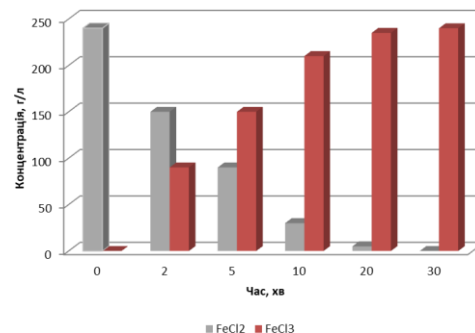
Для дослідження процесу утилізації відпрацьованого солянокислого травильного розчину була використана лабораторна установка, яка включала: водяну баню, реактор, озонатор-компресор, підігрівач. У якості відпрацьованого травильного розчину використовували модельний розчин, що містив 60-80 г/л соляної кислоти та ферум(II) хлориду концентрацією 200-240 г/л. У реактор поміщали 150 мл приготовленого модельного розчину. Для підігріву розчину використовували водяну баню. Температура розчину підтримувалась у межах 20-30 °С. Витрата повітря, яке насичене озоном, через модельний розчин підтримувалась в межах 0,5-1,5 л/хв. Час проведення процесу окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду змінювався від 2 хв до 50 хв.

На рис.1 та рис.2 наведені результати проведених досліджень по визначенню оптимального часу процесу окиснення озоном ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду. Процес відбувався при температурі 30 °С. Оцінювання проводилось за зміною кількості ферум(III) іонів в перерахунок на вміст ферум(III) хлориду в кінцевому розчині. Точково проводили визначення концентрації ферум(II) іонів.

За результатами досліджень встановлено, що при витраті повітряної суміші, яка містить озон, 0,5 л/хв повне окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду настає через 36 хв від початку обробки (рис.1).



**Рис. 1.** Вплив часу барботування озоном модельного розчину на кількість утворення ферум(III) хлориду: температура процесу 30 °С, витрата повітря 0,5 л/хв



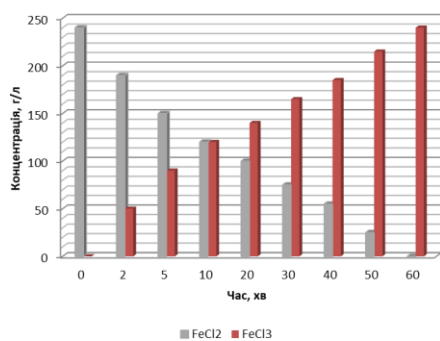
**Рис. 2.** Вплив часу барботування озоном модельного розчину на кількість утворення ферум(III) хлориду: температура процесу 30 °С, витрата повітря 1,5 л/хв

Повне окиснення хлориду заліза(II) до хлориду заліза(III) настає через 18 хв від початку обробки, при витраті повітряної суміші, яка містить озон, 1,5 л/хв (рис.2). Зменшення часу окиснення при збільшенні витрати повітря, насиченого озоном, обумовлено більшою кількістю озону, який пройшов через розчин. Для підтвердження ефективності окиснення ферум(II) хлориду саме озоном проводилось визначення ефективності окиснення ферум(II) хлориду киснем повітря (рис.3).

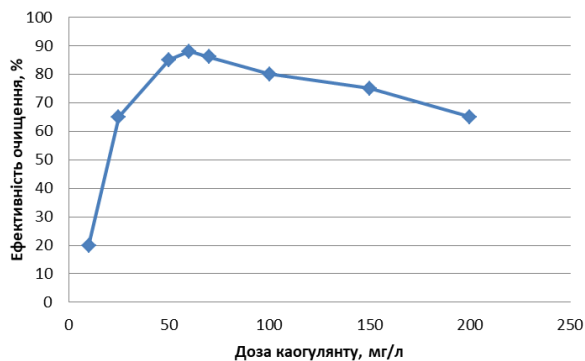
За результатами експериментальних досліджень встановлено, що повне окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду озоном відбувається в 1,5 рази швидше ніж киснем (рис.2 та рис.3).

Час ведення процесу переробки солянокислих відпрацьованих розчинів буде залежати від висоти шару розчину, площі поверхні нагріву та температури процесу. Дані параметри можуть бути рекомендовані для кожного підприємства в залежності від вихідних даних у технічному завданні.

Встановлення ефективної дози коагулянту відбувалося для очищення модельних вод, які містять завислі речовини у вигляді коричневого залізоокисного пігменту. Ефективність дози коагулянту визначалось по каламутності (ДСТУ ISO 7027-2003. Якість води. Визначання каламутності (ISO 7027:1999, IDT)). Відповідно до експериментальних даних ефективна доза для осадження коричневого залізоокисного пігменту становить 62 мг/л (рис.4). При збільшенні дози коагулянтів більш ніж оптимальне значення спостерігалось повторне забруднення води, що визначалось збільшенням каламутності (рис.4).

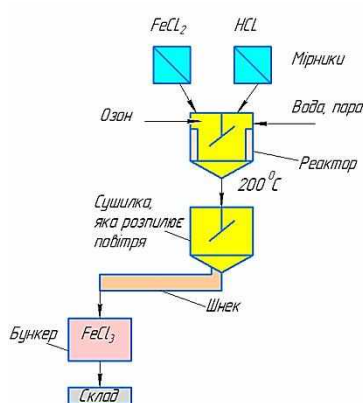


**Рис. 3.** Вплив часу барботування киснем повітря модельного розчину на кількість утворення ферум(III) хлориду: температура процесу 30 °С, витрата повітря 1,5 л/хв



**Рис. 4.** Встановлення ефективної дози коагулянту

За результатами проведених експериментальних досліджень розроблена апаратурно-технологічна схема утилізації солянокислих відпрацьованих травильних розчинів з одержанням коагулянту  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (рис. 5).



**Рис. 5.** Принципова апаратурно-технологічна схема утилізації відпрацьованих солянокислих травильних розчинів з одержанням коагулянту  $\text{FeCl}_3$

Відповідно до розробленої апаратурно-технологічної схеми (рис.5) процес одержання коагулянту можна розділити на наступні стадії:

- окиснення озоном ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду – випаровування розчину;
- розпилення та сушка суспензії (кристалізація);
- збір, пакетування та транспортування коагулянту на склад.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** За результатами теоретичних досліджень встановлено, що найбільш перспективними методами обробки солянокислих відпрацьованих травильних розчинів є методи з одержанням коагулянту – ферум(III) хлориду. У результаті експериментальних досліджень визначено, що при витраті повітряної суміші, яка містить озон, 0,5 л/хв повне окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду відбувається через 36 хв від початку обробки розчину. Встановлено, що при збільшенні витрати повітря, яке містить озон, до 1,5 л/хв відбувається пришвидшення процесу окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду та становить 18 хв від початку обробки. При порівнянні тривалості процесу повного окиснення розчину ферум(II) хлориду киснем та озоном встановлено, що використання озону дозволить скоротити час обробки розчину більш ніж у 1,5 рази (на відміну від кисню). Експериментально визначено, що ефективна доза коагулянту – ферум(III) хлориду для осадження коричневого залізного пігменту в розчині становить 62 мг/л.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень розроблена принципова апаратурно-технологічна схема утилізації солянокислих відпрацьованих травильних розчинів з одержанням коагулянту.

У подальших дослідженнях доцільно розглянути вплив зміни температури на швидкість процесу окиснення ферум(II) хлориду, визначити вплив параметрів роботи озонатору на повноту окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду.

## Список літератури

1. Травление сталей и чугуна. [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <http://metal-archive.ru/cinkovanie/4543-travlenie-staley-i-chuguna.html>.
2. Наркевич И.П., Печковский В.В. Утилизация и ликвидация отходов в технологии неорганических веществ. – М: Химия, 1984. – 240 с.
3. Способ регенерации соляной кислоты из отработанных травильных растворов. [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.freepatent.ru/patents/2061102>.
4. Способ и устройство для регенерации используемых для травления металлов растворов. [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.freepatent.ru/patents/2330902>.
5. Способ регенерации отработанных растворов соляной кислоты. [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.freepatent.ru/patents/2294982>.
6. Способ регенерации оксида железа и хлористоводородной кислоты. [Електронний ресурс]. – 2021. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.freepatent.ru/patents/2495827>.
7. Ламзина И.В., Тарасов А.П., Желтобрюхов В.Ф. Разработка технологии процесса нейтрализации травильных растворов металлургических производств / И.В. Ламзина, А.П. Тарасов, В.Ф. Желтобрюхов // Научно-технический вестник Брянского государственного университета, 2016. – №4. – С. 9-15.
8. Бучило Э. Очистка сточных вод травильных и гальванических отделений. – М.: Металлургия, 1974. – 200 с.
9. Винникова О.С. Пашаян А.А., Лукашов С.В. Проблемы утилизации травильных растворов сталепрокатных заводов / О.С. Винникова, А.А. Пашаян, С.В. Лукашов // Экологические проблемы регионов Украины: материалы IX Всеукраинской науч. конф. студентов, магистров и аспирантов. Одесса, 2007. – С.45-47.
10. Добровольский И.П., Селихов А.Б. Перспективные направления переработки солянокислых отработанных травильных растворов с получением бишофита, пигментов и коагулянтов / И.П. Добровольский, А.Б. Селихов // Вестник Челябинского государственного университета, 2008. – № 17. – С. 28-31.
11. Манідіна Є.А., Смотраєв Р.В., Троїцька О.О. та ін. Technology of sulfur oxide (IV) emissions neutralizing with the production of iron oxide pigment / Є.А. Манідіна, Р.В. Смотраєв, О.О. Троїцька, Н.В. Беренда, В.Г. Рижков, Р.О. Бакарджиев // Вісник Українського відділення Міжнародної академії аграрної освіти, 2019 – № 7. – С. 50-61.
12. Запольский А. К., Баран А. А. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды. – Л.: Химия, 1987. – 203 с.
13. Смирнов Д.И., Генкин В.Б. "Очистка сточных вод в процессах обработки металлов". – М.: "Металлургия", 1989. – с. 28.
14. Методика фотометричного визначення заліза (III) та заліза (II) з сульфосаліциловою кислотою в стічних водах: КНД 211. 1.4.040-95. – [Чинний від 01.07.95].- К. : Мінекобезпеки України, 1995. 12 с. – Керівний нормативний документ.
15. Агаєв І.М. Азы статистики в мире химии: Обработка экспериментальных данных. – Санкт-Петербург: НОТ, 2015. – 614 с

УДК 621.9.044

В.П. НЕЧАЄВ, А.О. РЯЗАНЦЕВ, кандидати техн. наук, доценти, С.В. РЕБРОВА, асист.,  
Д.О. ЛАВРИНЕНКО, асп.  
Криворізький національний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ НА СТІЙКІСТЬ РІЗУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ ПЛАЗМОВО-МЕХАНІЧНІЙ ОБРОБЦІ

**Мета.** Метою даної роботи є вдосконалення технології обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів, а саме – дослідження й наукове обґрунтування параметрів процесу плазово-механічної обробки поверхонь деталей з легованих сталей для підвищення продуктивності обробки, забезпечення необхідного періоду стійкості різального інструменту.

**Методи дослідження.** Результати роботи з плазово-механічної обробки отримані шляхом теоретичних і експериментальних досліджень. Теоретичні дослідження полягають у визначенні факторів, які впливають на інтенсивність зношування різального інструменту в умовах плазово-механічного точіння й стругання. Експериментальні дослідження засновані на комплексному вивченні взаємозв'язку основних показників механічної обробки з факторами попереднього плазового нагрівання припуску.

**Наукова новизна.** У результаті проведених досліджень були отримані дані про особливості протікання процесу спрацювання інструментального матеріалу, динаміку параметрів зношування інструменту при нагріванні заготовки плазовою дугою. Виявлена залежність зростання фаски зношування від параметрів нагрівання поверхневого шару заготовки, установлений розподіл нормальних та дотичних напруг на контактних поверхнях різучого клину.

**Практичне значення.** Розроблений процес плазово-механічної обробки та рекомендації з вибору параметрів нагрівання та різання дозволяють збільшити продуктивність обробки заготовок із середньо легованих сталей при забезпеченні заданих параметрів стійкості різучої частини інструменту.

**Результати.** Встановлено, що попереднє плазмове нагрівання при механічній обробці забезпечує протікання специфічного термічного циклу в матеріалі припуску, у результаті чого змінюються твердість і пластичність оброблюваного матеріалу. Зміна механічних властивостей припуску приводить до зниження питомих навантажень на ріжучий клин, до зниження інтенсивності його адгезійного зношування й тендітного руйнування, до стабілізації його округлення, що позитивно позначається в цілому на ефективності процесу плазово-механічної обробки важкооброблюваних матеріалів. Можливо здійснювати плазово-механічну обробку в режимі інтенсивного зношування леза, доводячи розмір фаски по задній поверхні до половини товщини ріжучої пластини.

**Ключові слова:** плазова дуга, різальний інструмент, стійкість, нормальні та дотичні напруги, зношування.

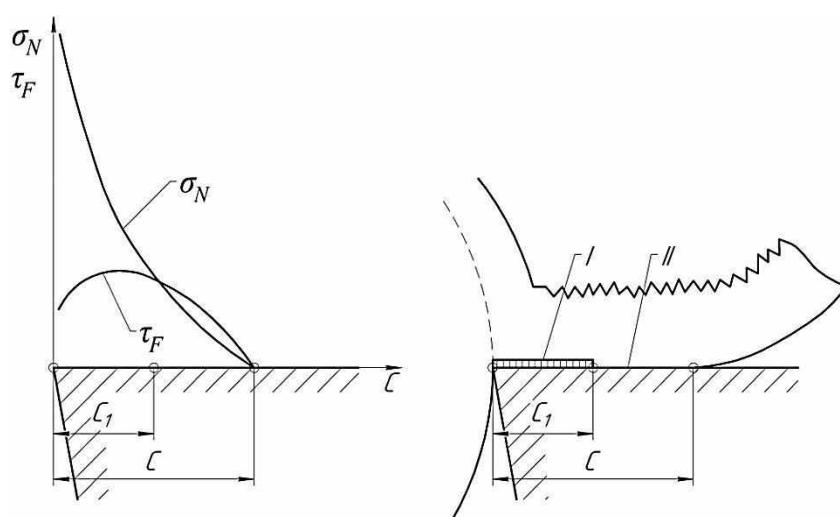
doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-39-44

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Руйнування ріжучого леза інструмента й інтенсивність його зношування визначається рівнем сил і температур, що виникають в процесі різання. У зв'язку із цим доцільно більш докладно розглянути вплив попереднього плазового нагрівання заготовки на характер розподілу силових і теплових навантажень, що діють на контактних поверхнях інструмента. Дані процеси на контактних поверхнях ріжучого леза, його високі швидкості переміщення щодо хімічно чистих поверхонь різання створюють несприятливі умови для роботи різального інструменту, особливо при різанні сталей і сплавів з низькою теплопровідністю, схильністю до адгезійного схоплювання з матеріалом інструмента, високою міцністю й значним наклепом при пластичному деформуванні. Необхідно створити такі умови, у яких руйнування інструментального матеріалу спостерігалось б можливо рідше або зовсім виключалося.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Відомо, що плазмове нагрівання впливає на такі основні характеристики процесу різання, як сили різання, кут зрушення стружки, коефіцієнт її стовщення й довжина контакту з передньою поверхнею інструмента [2-6, 10-12, 17]. Усе це впливає на питомі контактні навантаження, прикладені до передньої поверхні ріжучого клина, визначити які можна за допомогою методики, запропонованої Н.Н Зоревим [1].

Згідно із цією методикою розподілу питомих нормальних навантажень описується статечною залежністю, епюра ж дотичних навантажень має дві ділянки: на першій (пластичної) зовнішнє тертя відсутнє, а дотичні напруження постійні й дорівнюють опору приконттактних шарів стружки на зрушення (рис. 1). На другій ділянці має місце зовнішнє тертя й контактні навантаження змінюються по статечній залежності. Показник ступеня, що характеризує нерівномірність розподілу навантажень на передній поверхні, може бути знайдений з виразу

$$n = 2 \cdot \left\{ \frac{c}{a \cdot K_a [\mu + \operatorname{tg}(\varphi - \gamma)]} \right\}. \quad (1)$$



**Рис.1.** Епюри розподілу нормальних ( $\sigma_N$ ) і дотичних ( $\tau_F$ ) напружень на передній поверхні ріжучого клина (I – ділянка пластичного контакту, II – ділянка пружного контакту)

При цьому максимум питомого нормального навантаження в ріжучій кромки інструмента розраховується по формулі

$$q_m = \frac{N}{b \cdot c} (n+1). \quad (2)$$

Нормальні навантаження в будь-якій точці передньої поверхні в межах довжини її контакту зі стружкою визначаються з умови

$$q_N = q_m \left(1 - \frac{y}{c}\right)^n, \quad (3)$$

де  $y$  – відстань розглянутої точки від вершини ріжучого клина.

Питомі ж дотичні навантаження на ділянці зовнішнього тертя обчислюються по формулі:

$$q_F = \mu_b \cdot q_N, \quad (4)$$

де  $\mu_b$  – коефіцієнт зовнішнього тертя, обумовлений вираженням:

$$\mu_b = \frac{F(n+1)}{b \cdot c \cdot q_m \left(1 + \frac{n \cdot c_1}{c}\right) \cdot \left(1 - \frac{c_1}{c}\right)^n}. \quad (5)$$

В основу розрахунків питомих контактних навантажень на передній поверхні інструмента були покладені експериментальні дані, отримані Шатеріним М.А. і Медко В.С. [6,11,12]. Нормальна та дотична складова сили різання, що діють на передній грані леза, визначилися по відомим формулам

$$N = \tilde{P}_z \cos \gamma - \tilde{P}_{xy} \sin \gamma; \quad (6)$$

$$F = \tilde{P}_{xy} P_{sy} \sin \gamma. \quad (7)$$

Аналіз приведених результатів свідчить про істотне (до двох – трьох раз) зниження максимальних і середніх питомих нормальних навантажень, що діють на передній поверхні інструмента в умовах різання з попереднім плазмовим нагріванням заготовки.

**Постановка задачі.** Стан питання визначає інтерес до дослідження впливу плазмового нагрівання оброблюваного матеріалу на міцність і зношування різального інструменту. У зв'язку з важливістю збереження гостроти ріжучого клина в процесі роботи, слід також розглянути питання про його тендітну міцність.

Розрахункам напруг у ріжучому клині присвячені роботи ряду авторів [8,18,20-22]. Для того щоб при навантаженні інструмента не відбувалося сколювання інструментального матеріалу, відповідно до теорії граничних напруг необхідно, щоб еквівалентна напруга в ріжучому клині  $\sigma_{екв}$  не перевищувала напруги, що допускається

$$[\sigma] = \sigma_B / n_B, \quad (8)$$

де  $\sigma_B$  – тимчасовий опір матеріалу інструмента при розтяганні;  $n_B$  – коефіцієнт запасу тендітної міцності ( $n_B = 1,3 \dots 3$ ).

При постійних геометричних параметрах інструмента й коефіцієнті тертя  $\mu$  величина  $\sigma_{гм}$  і  $\sigma_{екв}$  знижується зі зменшенням середнього питомого навантаження на передній поверхні ас. Саме це й має місце при ПМО як внаслідок зменшення сили різання, так і внаслідок збільшення  $l_1$  [17]. Плазмове нагрівання заготовок також знижує небезпека відколів різального інструменту в порівнянні з іншими видами нагрівання.

Важливим фактором, що поліпшують умови роботи інструмента при ПМО, є менша ймовірність пластичного деформування ріжучої кромки. Згідно з теорією граничних напружених станів Губера-Мизеса-Генки пластичний плин матеріалу настає тоді, коли еквівалентна напруга  $\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_y^2 + \sigma_z^2 - \sigma_y \sigma_z + 3\tau_{yz}^2}$  досягає межі плинності. Показане, що деформований стан у контактному шарі металу задньої поверхні інструмента наближається до стану простого зрушення, при якому нормальні напруги уздовж ліній ковзання постійні та у розглянутому випадку відповідають нормальним напругам на контактній площадці різець – поверхня різання  $\sigma_{N2}$  [17]. Це дозволяє одержати рівняння для визначення умов плину матеріалу інструмента:

$$\sigma_{екв} = \sqrt{\sigma_{N2}^2 + 3(\tau_K + \tau_2)^2} \leq \sigma_{Sl} / n_s, \quad (9)$$

де  $\tau_K$  – опір зрушенню в контактному шарі оброблюваного матеріалу;  $\tau_2$  – дотичні напруження на задній поверхні, викликані впливом навантаження на передній поверхні леза;  $n_s$  – коефіцієнт запасу пластичної міцності;  $\sigma_{Sl}$  – границя текучості матеріалу інструмента.

У якості завдання для подальшого дослідження можна представити гіпотезу, що при ПМО можуть складатися сприятливі умови для зниження інтенсивності руйнування та підвищення працездатності інструментів, у тому числі й внаслідок підвищення тендітної й пластичної міцності ріжучого клина. Це може дозволити здійснювати обробку з більшими перетинами зрізу й використовувати інструмент при більш високих величинах зношування, чому при звичайному різанні металів.

**Викладення матеріалу та результати.** Аналіз раніше опублікованих робіт і власних результатів досліджень [5, 6, 10, 17] дозволяє узагальнити характер і особливості зношування інструментів при ПМО. При різанні із плазмовим нагріванням оброблюваного матеріалу зношування різального інструменту відбувається, як і при звичайному різанні, по передній і задній поверхнях ріжучого леза. Зношування по передній поверхні домінує в тих випадках пластина, що коли ріже, виготовлена з менш міцного матеріалу. У цьому випадку на передній поверхні леза утворюється й інтенсивно збільшується лунка, яка може служити джерелом викривлення й руйнування ріжучої пластини.

Більш кращим є варіант експлуатації різального інструменту, коли домінує зношування по задній поверхні леза, а лунка зростає значно менш інтенсивно, ніж в першому випадку. Як правило, зношування робочих поверхонь тут відбувається суттєво повільніше, причому фаска зношування по задній поверхні інструмента може досягати значної величини, до половини товщини пластини твердого сплаву.

Спостереження за роботою інструмента в лабораторних і виробничих умовах показують, що при фізичній природі зношування поверхонь ріжучого леза по ПМО носить переважно абразивно-адгезійний або адгезійний характер [10].

Вивчення картини зношування пластин твердого сплаву ВК8 при точінні із плазмовим нагріванням показало, що при низьких швидкостях різання й недостатньому нагріванні оброблюваного матеріалу основним видом руйнування твердосплавних пластин є тріщини й відколи ріжучої кромки. Відколи утворюються в основному на передній поверхні пластин. Зі збільшенням швидкості різання й температури нагрівання відкол пластин зменшується, але на зношеній поверхні з'являються ділянки адгезійного схоплювання часток оброблюваного матеріалу із твердим сплавом.

Особливістю чорновий ПМО є нерівномірне зношування різних ділянок ріжучого леза інструмента (рис. 2). Характер процесу зношування й працездатність інструмента залежить від умов обробки, режимів різання й нагрівання, властивостей інструментального й оброблюваного матеріалів. Використання попереднього плазмового нагрівання заготовки в 2 ... 3 рази знижує рівень напруг, що виникають близько ріжучої крайки, запобігаючи тим самим її інтенсивне округлення.



**Рис.2.** Зношування твердосплавного різця по задній поверхні при ПМО сталі 110Г13Л ( $t=6$  мм;  $S=2,04$  мм/об;  $V=15$  м/хв;  $I=180$  А;  $U=140$  В)

Ще одна особливість зношування різальних інструмент при ПМО важкооброблюваних матеріалів полягає у відносно короткому часі прироблення інструмента й подальшої лінійної залежності величини фаски зношування по задній поверхні інструмента від часу. Лінійний характер залежності підтверджує, що на контактній поверхні твердого сплаву в основному відбуваються адгезійні процеси.

Викладене дозволяє скласти уявлення про вплив різних факторів на період стійкості інструмента при ПМО. Априорі, період стійкості інструмента при ПМО залежить від виду ріжучого матеріалу, елементів режиму різання, режиму нагрівання оброблюваного матеріалу. Установлене, що до деякої межі температура нагрівання металу  $\theta_h$  підвищує період стійкості  $T$  інструмента, а далі, зі збільшенням температури, період стійкості інструмента знижується. На-

приклад, максимум періоду стійкості при ПМО заготовок зі сплаву ХН75МБТЮ, відповідав температурам нагрівання порядку 880...900°C [6].

Оптимальне значення  $\theta_n$  залежить від властивостей оброблюваного, інструментального матеріалів і від режиму різання. Тому не може бути єдиних значень температур нагрівання, рекомендованих для забезпечення найбільшої стійкості інструмента, вони повинні зазнати оптимізації в кожному конкретному випадку для тих або інших умов ПМО.

Становлять практичний інтерес стійкісні залежності, представлені у вигляді формул для розрахунків швидкості різання при ПМО (табл.1). Розкид показників при змінних величинах пояснюється різними умовами, у яких проводилися експерименти й різним підходом до визначення критерію затуплення інструмента в дослідженнях. Це свідчить також про необхідність вироблення єдиної методики проведення стійкісних випробувань при ПМО.

Таблиця 1

Результати досліджень, та оптимальні режими різання

| Матеріал оброблюваної заготовки та інструмента | Діапазон зміни режимів різання та нагрівання                 | Формула                                                                  |
|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| 18Х2Н4МА<br>Т15К6                              | $t=3...5$ ; $S=0.8...1.2$ ;<br>$W=25...31$ ; $L=200$         | $V = \frac{710 \cdot W^{1.3}}{T^{1.54} t^{0.3} S^{0.43}}$                |
| 30Х2Н2МА<br>Т5К10                              | $t=4...7$ ; $S=0.5...1.6$ ;<br>$W=21...30$ ; $L=160...220$ ; | $V = \frac{2.46 \cdot 10^4 W^{0.6}}{T^{1.1} t^{0.49} S^{0.53} L^{0.49}}$ |

У процесі аналізу даних лабораторних експериментів і промислового освоєння ПМО, представлених різними авторами, реалізована можливість порівняльної характеристики по параметру зносостійкості в умовах ПМО ряду інструментальних матеріалів. Були випробувані: вольфрамкові однокарбідні тверді сплави ВК3М, ВК6 і ВК10, титановольфрамкові Т5К10 і Т15К6, тверді сплави Т17К12 і ТТ10К8Б, безвольфрамкові тверді сплави ТН-20 і КНТ-16. Результати досліджень дозволили встановити, що для чорного й напівчистового плазменно-механічного гостріння, фрезерування й стругання нержавіючих, маломанітних і високоміцних сталей, а також кобальтових і нікелевих сплавів найкращу працездатність показують тверді сплави марок Т5К10 і Т15К6 [3, 4, 6, 10, 17].

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Аналіз опублікованих результатів теоретичних розрахунків і експериментальних даних дозволяє зробити наступні висновки:

при різанні важкооброблюваних матеріалів попереднє плазмове нагрівання заготовки у два-три рази знижує рівень максимальних і середніх навантажень, що діють на лезо інструмента;

зниження нормальних навантажень супроводжується зменшенням розтягувальних напружень на передній поверхні ріжучого клина, що підвищує надійність інструмента й дає можливість збільшувати значення хвилинної подачі. Це дозволяє розширити діапазон інструментальних матеріалів, а також застосовувати інструменти з меншими кутами загострення;

викликане плазмовим нагріванням падіння максимальних нормальних контактних навантажень дозволяє запобігти тендітному руйнуванню ріжучої кромки твердосплавного інструмента за рахунок зниження інтенсивності наростання радіуса її округлення;

зміна умов навантаження леза при ПМО приводить до специфічного характеру його зношування, при якому зберігаються малі радіуси округлення ріжучої кромки, що дозволяє успішно експлуатувати інструмент із більшими фасками зношування по задній поверхні;

по своїй фізичній природі зношування інструмента при ПМО носить в основному адгезійний характер і має мінімальну інтенсивність на ділянці ріжучої крайки, відповідному до місця розташування плями нагрівання;

при переривчастих процесах різання в умовах плазмового нагрівання число циклів термо-механічного навантаження твердосплавної пластинки до утворення втомних тріщин у 1,5 ... 2 рази перевищує значення тієї ж характеристики при обробці холодної заготовки;

можливість успішної експлуатації інструмента зі значними фасками зношування дозволяє здійснювати ПМО в режимі інтенсивного зношування леза, доводячи розмір фаски по його задній поверхні до половини й більш товщини ріжучої пластини. Це відкриває додаткові можливості підвищення продуктивності процесу різання й визначає доцільність проведення подальших досліджень.

## Список літератури

1. Зорев Н.Н. Вопросы механики процесса резания металлов. – М., Машгиз, 1956. – 367 с.
2. Шатерин М.А., Коротких М.Т., Нечаев В.П. Плазмотрон для плазменно-механической обработки. – «Сварочное производство», 1986, №8, – с.27, 28.
3. Нечаев В.П., Рязанцев А.А. Особенности тепловых процессов при обработке заготовок с плазменным нагревом. – Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. – Вип.26. Кривий Ріг, 2010. – с.157-160.
4. Шатерин М.А., Коротких М.Т., Нечаев В.П. Плазменно-механическое торцовое фрезерование. – Машиностроитель, 1986, №9.
5. Патент №134189 Україна, МПК В23К 10/02 «Спосіб плазово-механічної обробки» / В.П.Нечасв, А.О. Рязанцев; заявник і патентовласник ДВНЗ «Криворізький національний університет», №U 2018 11200; заявл. 14.11.18; опубл. 10.05.19, бюл. №9.
6. Шатерин М.А. Медко В.С. Влияние предварительного плазменного нагрева заготовки на снижение силы резания / Технология, организация и техника машиностроительного производства. – 1985. – Вып. 11. – С.10-11.
7. Мрочек Ж. А., Кожуро Л. М., Хейфец М. Л. Плазменно-механическая обработка материалов. – Вестник ГГТУ имени П.О. Сухого. – Гомель, №4 (26) 2006. – с. 44-47.
8. Лолодзе Т.Н. Прочность и износостойкость режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1982. – 320 с.
9. Подураев В.Н. Автоматически регулируемые и комбинированные процессы резания. М.: Машиностроение, 1977. –304 с.
10. Нечасв В.П., Рязанцев А.О., Чернявська О.В., Лаухіна Л.І., Лавриненко Д.О. Вплив параметрів процесу плазово-механічної обробки на якість поверхневого шару деталей. - Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Вип.49. Кривий Ріг, 2019. – с.105-112.
11. Кунин В.С. Опыт внедрения плазменно-механической обработки. – Л.: ЛДНТИ, 1982. – 28с.
12. Резников А.Н., Резников Л.А. Энергетические расчеты при резании с плазменным подогревом обрабатываемого материала. – Энергомашиностроение, 1981, №11, с. 26-28
13. The PERA «Cutfast» plasma-assisted Hot-machining process. – Engineering Digest (Canada), 1977, 38, №7, p. 17.
14. Вакаса Х. Применение обработки резанием с плазменным подогревом. – Oyo kikai kogau (Mechanical Engineering Application), 1976, т. 17, №3, с. 54-59.
15. Шатуров, Г. Ф. Прогрессивные процессы механической обработки поверхностей / Г. Ф. Шатуров, Ж. А. Мрочек. – Минск : УП «Технопринт», 2001. – С. 460.
16. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов. М., «Машиностроение», 1975. – С.135-142.
17. Резников А.Н., Шатерин М.А., Кунин В.С., Резников Л.А. Обработка металлов резанием с плазменным нагревом. – М.: Машиностроение, 1986. – 232 с.
18. Sun S., Brandt M., Dargusch M.S. Thermally Enhanced Machining of Hard-to-Machine Materials. International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2010, Vol. 50(8), p. 663–680.
19. Madhavulu G., Ahmed B. Hot Machining Process for Improved Metal Removal Rates in Turning Operations. Journal of Materials Processing Technology. –1994, Vol. 44, p. 199–206.
20. Kitagawa T., Maekawa K. Plasma Hot Machining for New Engineering Materials. Wear. – 1990, Vol. 139(2), p. 251–267.
21. Leshock C.E.; Kim Jin-Nam, Shin Yung C. Plasma Enhanced Machining of Inconel 718: Modeling of Workpiece Temperature with Plasma Heating and Experimental Results. Int. J. Mach. Tools Manuf. 2001, №41. P. 877–897.
22. Chen S.H., Tsai K.T. Predictive Analysis for the Thermal Diffusion of the Plasma-Assisted Machining of Superalloy Inconel-718 Based on Exponential Smoothing, Advances in Materials Science and Engineering. 2018, Vol. 2018. Article ID 9532394, 9 pages.

УДК 622.8

О.Є. ЛАПШИН, д-р техн. наук, проф., А.К. ГАЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.,  
І.А. ГАЦЬКИЙ, асп.

Криворізький національний університет

## РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХОДІВ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИНИКНЕННІ АВАРІЙ У ГІРНИЧИХ ВИРОБКАХ ШАХТ НА ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ МОБІЛЬНОЇ КАМЕРИ ПОВІТРОПОСТАЧАННЯ

Стаття присвячена розробці та обґрунтуванню заходів безпеки при виникненні аварій, шляхом використання мобільної камери аварійного повітропостачання в підземних гірничих виробках залізрудних шахт та інших галузях гірничодобувної промисловості, що надасть можливість підвищити рівень безпеки працюючих, скоротити час про-

ведення ліквідації аварій гірничорятувальниками та знизити показники коефіцієнта частоти травмування та смертності робітників.

**Метою** цього дослідження є створення безпечних умов перебування робітників в підземних гірничих виробках під час аварій, до приїзду гірничих рятувальників та виконання оперативних дій з рятування працюючих та ліквідації аварій, за рахунок розробки та використання мобільної камери повітропостачання.

**Метод дослідження** – використано комплексний підхід, який включає аналіз і узагальнення науково-технічної інформації, щодо використання мобільної камери повітропостачання та забезпечення безпеки працюючих гірників.

**Новизна отриманих результатів** полягає у тому, що запропонована конструкція мобільної камери аварійного повітропостачання, має можливість автономно пересуватися по гірничим виробкам, мобільна камера обладнана засобами високочастотного зв'язку і приладами контролю параметрів мікроклімату, а також не потребує значного часу з її монтажу, в результаті чого заощаджується дорогий час на порятунок робітників.

**Практична цінність** від використання запропонованої конструкції мобільної камери аварійного повітропостачання, полягає в тому що, проведення робіт по порятунку людей та ліквідації аварій в підземних гірничих виробках шахт проводиться з мінімізацією ризиків травмування людей.

**Результат** від розробки та використання мобільної камери аварійного повітропостачання полягає у підвищенні безпеки працюючих під час аварій шляхом укриття їх в пересувній камері, утворення в ній нормального атмосферного тиску повітря, оптимальних параметрів мікроклімату, що унеможливує потрапляння отруйних газів із зовні всередину, застосування стійкого зв'язку з рятувальними бригадами та вивезення потерпілих пересувною камерою з осередків аварій.

**Ключові слова:** камера аварійного повітропостачання, гірничі виробки, безпека, травмування людей, аварія, мікроклімат, рятування працюючих.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-44-49

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Проблема питання полягає в тому, що під час ведення робіт в підземних гірничих виробках шахт відбувається порушення нормальних умов праці, яке спричиняється аварією, що призводить до загибелі працюючих та значних матеріальних витрат [1-3].

Для підвищення ефективності процесу ліквідації аварії потрібен новий комплексний метод, який знизить коефіцієнт частоти травмування та смертності робітників у підземних гірничих виробках, а саме миттєва можливість транспортування потерпілих із зони аварії, так як не завжди у травмованих є можливість добратися до стаціонарної камери аварійного повітропостачання в результаті завалів, пожеж, загазувань та інше. Зарубіжні та вітчизняні аналоги камер аварійного повітропостачання, не мають можливості автономно пересуватися по гірничим виробкам та потребують значного часу з їх монтажу, в результаті чого втрачається дорогий час на порятунок людей, та відсутня можливість транспортування потерпілих внаслідок аварії. Тому виникла потреба у розробці та проектуванні мобільної камери повітропостачання, яка надасть можливість підвищити рівень безпеки працюючих, скоротити час проведення ліквідації аварій гірничорятувальниками та знизити показники коефіцієнта частоти травмування та смертності робітників [4-6].

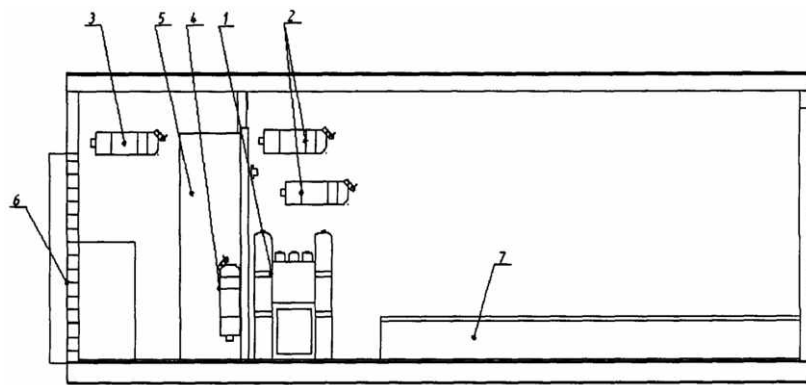
Дана проблема дуже тісно пов'язана з такими науковими та практичними завданнями як [7]:

дослідження небезпечних і шкідливих виробничих чинників, які виявляються при технологічних процесах і експлуатації машин, механізмів, що призводить до аварій, нещасних випадків та професійних захворювань;

методи і засоби захисту від дії шкідливих і небезпечних виробничих чинників, зокрема засоби індивідуального і колективного захисту працівників;

діагностування, прогнозування, моделювання екстремальних виробничих ситуацій з метою їх попередження. Методи, засоби та заходи попередження аварій на виробництві.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Для аналізу відомих камер аварійного повітропостачання можна розглянути патент на корисну модель RU №137567, «Аварійна і рятувальна камера блочно-модульного типу "АММА"» рис. 1. Камера блочно-модульного типу, призначена для захисту груп людей, що знаходяться в зонах з повітрям, непридатним для дихання, що представляє собою мобільне спорудження, що складається з повітряного шлюзу і основної камери, що включає систему повітряної завіси, розташовану навпроти входу, пристрій захисту дихальних органів, встановлене в основній камері, засоби індивідуального захисту, ряди лавок, відрізняється тим, що блок обладнаний системою автоматичного закривання і відмикання дверей, фільтруючі пристрої розташовані як у середині повітряного шлюзу, так і в основній камері, де передбачена система поповнення кисню[8].

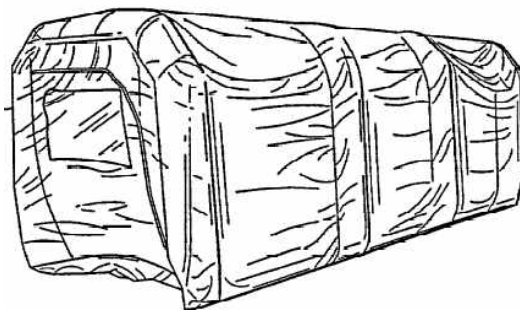


**Рис. 1.** Аварійна і рятувальна камера блочно-модульного типу «АММА»: 1 – пристрій захисту дихальних органів; 2, 4 – фільтруючі пристрої; 3 – вентиляційна система; 5 – внутрішні двері; 6 – повітряні завіси; 7 – лавка

Недоліком відомої камери є те, що вона не виключає потрапляння отруйних газів в середину при вимкненому електричному струмені, оскільки вентилятори, які

подають повітря і утворюють надлишковий тиск, будуть вимкнуті. До того ж конструкція камери є нерухомою спорудою, яку неможливо розмістити в гірничих виробках. Такі недоліки у цілому, не дозволяють застосовувати її під час аварій в гірничих виробках.

Також відомий такий патент на корисну модель, як RU № 2416723 «Камера аварійного повітропостачання і способу укриття» рис. 2. Винахід відноситься до камер аварійного повітропостачання, яку можна легко переміщати за допомогою вилочного навантажувача або фронтального торцевого навантажувача. Камера-притулок включає в себе намет, який розміщений в пересувному корпусі в нерозгорнутому стані, який розгортається і розширюється в напрямку від пересувного корпусу, в середині якого знаходиться набір балонів зі стислим повітрям і киснем, а також системи газоочищення і охолодження повітря для забезпечення нормальної атмосфери для шахтарів [9].

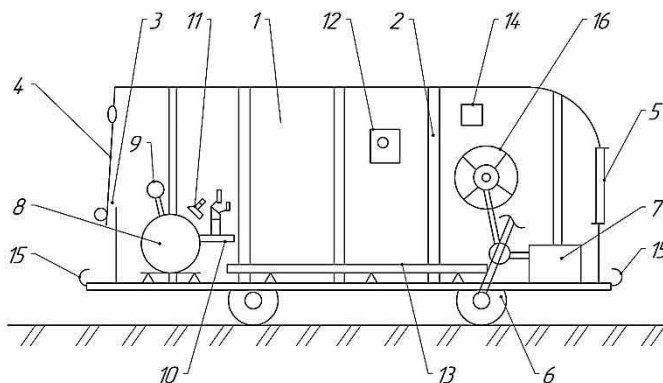


**Рис. 2.** Камера аварійного повітропостачання і способу укриття

Недоліком цієї камери є те, що вона обмежена за можливістю застосування, оскільки пересувається не автономно, а за допомогою інших транспортних засобів. До того ж, засоби газоочищення і охолодження, які обладнані в камері, за тривалий період в умовах шахти стають непридатними для забезпечення життєдіяльності людей, а засоби зв'язку з рятувальними бригадами не передбачені. Крім того,

ця камера не передбачена для перевезення потерпілих, які не мають можливості дістатися до неї самостійно.

Найбільш близькою за конструкцією є патент на корисну модель UA №145166 «Пересувна камера повітропостачання в гірничих виробках» рис. 3, що містить корпус, який встановлено на пересувній платформі і виконано з тканинного матеріалу, полотно якого натягнуто на ребра жорсткості, які закріплені на платформі [10,11]. При цьому корпус має дверний проріз зі шторою та вікно спостереження. Також на платформі закріплена ємкість зі стислим повітрям, яка обладнана манометром, редуктором і клапанним пристроєм, крім того на платформі встановлено двигун, з'єднаний кінематично з колісною парою.



**Рис. 3.** Пересувна камера повітропостачання в гірничих виробках: 1 – корпус камери; 2 – ребра жорсткості; 3 – дверний отвір; 4 – шторка; 5 – вікно спостереження; 6 – колісна пара; 7 – двигун; 8 – ємкість зі стиснутим повітрям; 9 – манометр; 10 – редуктор; 11 – клапанний пристрій; 12 – засоби високочастотного зв'язку; 13 – лавка; 14 – аптечка; 15 – гачки для зчеплення

Недоліком цієї камери є те, що вона недосконала за конструктивним виконанням. Так, з приміщення камери відбувається непродуктивна втрата повітря через нещільності в корпусі, що змен-

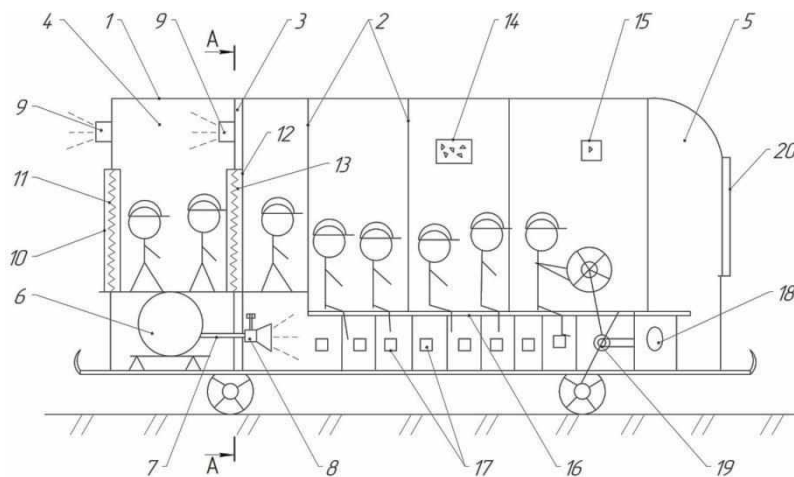
шує термін її захисної дії. Крім того, перебуваючи в камері тривалий час під надлишковим тиском, і виходячи з неї назовні, люди опиняються раптово від зниженим тиском, що небезпечно для серцево-судинної систем організму. До того ж, в середині камери обмежений термін перебування людей, який залежить від кількості стисненого повітря в ємкості розташованої в камері, а резервних засобів підтримання життєдіяльності не передбачено.

Виходячи з аналізу наведено вище, можна виділити такі основні вимоги до камер аварійного повітропостачання [12]: 1) це наявність чистого повітря в КАПП, за рахунок подачі стиснутого повітря у КАПП, або його регенерації; 2) розташовувати КАПП в місцях, найбільш близьких і найбільш доступних для максимального числа робітників дільниці при будь-яких можливих аваріях; 3) герметичність КАПП та підтримка тиску в її середині не менше ніж 50 Па, для не потрапляння отруйних речовин у камеру; 4) підтримка температурного режиму в КАПП за рахунок наявності охолоджувальних установок, аераторів тощо.

**Постановка завдання.** Головним завданням є сформулювати теоретичне обґрунтування та заходи нормалізації параметрів мікроклімату мобільної камери аварійного повітропостачання в гірничих виробках, розробити систему управління параметрами мікроклімату в КАПП. В основну моделі поставлено задачу вдосконалення камери аварійного повітропостачання шляхом забезпечення її клапанами випуску надлишкового повітря з камери очікування в тамбур, обладнання засобами високочастотного зв'язку і приладами контролю параметрів мікроклімату в приміщенні камери та забезпечення апаратами штучного дихання, що надасть нормальні умови життєдіяльності незалежно від атмосферного становища в камері.

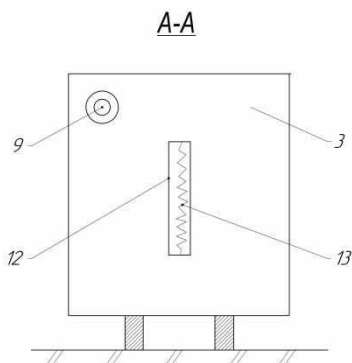
**Викладення матеріалу та результати.** Запропонована мобільна камера повітропостачання ілюструється на рис. 4, на якому зображено вертикальну проекцію мобільної камери повітропостачання в гірничих виробках та на рис. 5, зображено переріз камери в місці обладнання прогумованої перегородки.

Поставлена задача вирішується тим, що мобільна камера повітропостачання рис. 4, містить корпус 1, виконаний з тканинного матеріалу натягнутого на ребра жорсткості 2, який розділений прогумованою перегородкою 3, з утворенням тамбуру 4 і камери очікування 5. В тамбурі розташовано ємкість 6 з стисненим повітрям, випускний патрубок 7, який має на кінці вентиль 8, випускний клапан 9, вхідні отвори 10, 12 – замки типу «змійка»; 14 – засоби високочастотного зв'язку; 15 – прилади контролю параметрів мікроклімату; 16 – сидіння; 17 – апарати штучного дихання; 18 – двигун; 19 – коробка передач; 20 – вікно.



**Рис. 4.** Вертикальна проекція мобільної камери аварійного повітропостачання в гірничих виробках: 1 – корпус камери; 2 – ребра жорсткості; 3 – прогумована перегородка; 4 – тамбур; 5 – камера очікування; 6 – ємкість з стисненим повітрям; 7 – випускний патрубок; 8 – вентиль; 9 – випускний клапан; 10, 12 – вхідні отвори; 11, 13 – замок типу «змійка»; 14 – засоби високочастотного зв'язку; 15 – прилади контролю параметрів мікроклімату; 16 – сидіння; 17 – апарати штучного дихання; 18 – двигун; 19 – коробка передач; 20 – вікно

На рис. 5, зображена прогумована перегородка, яка має випускний клапан 9 і отвір 12 для проходу людей, який обладнаний замком 13 типу «змійка». Камера очікування обладнана засобами високочастотного зв'язку 14, приладами контролю параметрів мікроклімату 15, крім того в ній розташовані сидіння 16, які обладнані апаратами штучного дихання 17, які мають регенеративний патрон, що містить кисень.



**Рис. 5.** Переріз мобільної камери аварійного повітропостачання в місці обладнання прогумованої перегородки: 3 – прогумована перегородка; 9 – випускний клапан; 12 – вхідний отвір; 13 – замок типу «змійка»

повітря, розміщуються в ній на сидіннях. Кількість стисненого повітря, яке надходить в камеру з ємкості, регулюється шляхом відкриття вентиля в залежності від чисельності людей які перебувають на сидіннях.

Контроль параметрів мікроклімату (температури, вологості і атмосферного тиску) здійснюється за допомогою приладів (термометру, психрометру і барометру), а зв'язок з командиром рятувальної бригади і керівником з ліквідації аварії здійснюється за допомогою високочастотного зв'язку.

Після розміщення всіх працюючих у камері на сидіннях, керуючий рухом камери (гірничий майстер або бригадир) запрошує по високочастотному зв'язку дозвіл у командира рятувальної бригади і керівника з ліквідації аварії на евакуацію з осередку пожежі (загазування). Отримавши дозвіл водій вмикає двигун 18 (пневматичний або електричний), який має кінематичний зв'язок з системою коробки передач 19 та управлінням рухом, і камера повільно рухається із задимленої (загазованої) зони в напрямку пункту передбаченого планом ліквідації аварій (ПЛА). При русі камери гірничою виробкою водій спостерігає за оточуючим середовищем через вікно 20. Після зупинки камери в пункті, передбаченого ПЛА, працівники виходять з камери очікування крізь отвір в тамбур, в ньому вони зупиняються на деякий час для адаптації організму до зниженого тиску, а потім виходять з тамбура крізь отвір на свіже повітря.

На випадок, якщо стається аварія з обвалення гірської породи і шлях виходу із зони завалення відрізано, тоді приймається інший режим роботи камери, який полягає в наступному. Спочатку перекриваються випускні клапани, а вентиль переключається на економну витрату стисненого повітря. Після цього готуються апарати штучного дихання, та за потреби працівники вмикаються в них і контролюють власний стан органів дихання. За такого режиму роботи камери час перебування в ній працюючих не обмежується, оскільки термін ліквідації обвалення може бути тривалим.

Технічний результат від використання мобільної камери повітропостачання полягає в підвищенні безпеки людей, шляхом утворення в ній нормального атмосферного тиску, підтримання оптимальних параметрів мікроклімату і забезпечення апаратами штучного дихання на випадок змінення умов тривалого перебування в обмеженому просторі.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** В результаті використання мобільної камери повітропостачання, надається можливість підвищити рівень безпеки працюючих, скоротити час проведення ліквідації аварій гірничорятувальниками та знизити показники коефіцієнта частоти травмування та смертності робітників. Це вдається виконати за рахунок того, що камера аварійного повітропостачання є автономна, містить клапанами випуску надлишкового повітря з камери очікування в тамбур, обладнана засобами високочастотного зв'язку і приладами контролю параметрів мікроклімату та забезпечена апаратами штучного дихання, що забезпечують нормальні умови життєдіяльності незалежно від атмосферного становища в камері.

Подальший напрямок досліджень буде базуватися на питаннях розробки системи управління параметрами мікроклімату в мобільній камері повітропостачання, математичного моделювання повітрообміну та теплообмінних процесів в камері та ін

### Список літератури

1. Бизов В.Ф., Лапшин О.С. Охорона праці в гірництві: в 14 т.: підручник для вузів за напрямком "Гірництво". Т.7/ Бібліотека гірничого інженера. – Кривий Ріг: Мінерал, 2001. – 251 с.
2. Аерологія гірничих підприємств / А.О. Гурін, П.В. Бересневич, А.А. Немченко, І.Б. Ошмянський. – Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2007. – 461 с.
3. Гладышев Н.Ф., Гладышева Т.В., Дворецкий С.И. Системы и средства регенерации и очистки воздуха обитаемых герметичных объектов. – М.: Издательский дом «Спектр», 2016. – 204 с.
4. Основы горного дела: Учебник для вузов. — 2-е изд., стер./ П.В. Егоров, Е.А. Бобер, Ю.Н. Кузнецов [и др.] - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2006. — С. 78-79.
5. О направлении развития технологии сооружения горизонтальных и наклонных горных выработок в сложных горно-геологических условиях / В.В. Гамаюнов, В.П. Друцко, В.Г. Гнездилов, Б.В. Алферов, Ю.С. Шаповал // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. – Днепропетровск: ИГТМ НАНУ, 2004. – Вип. 51. – С. 92-102.
6. Конопелько Е.И. Коллективные средства защиты органов дыхания в системе спасения горняков при авариях в угольных шахтах. III Міжнародна науково-практична конференція «Технології і процеси у гірництві та будівництві» ДНВЗ «ДОННТУ», - Красноармійськ, 2015. - С. 4-8.
7. Постанова президії ВАК України від 12.12.2001 р. №20-08/10.
8. Аварийные и спасательные камеры блочно-модульного типа "амма". Патент на полезную модель RU №137567 E04H 9/04, опубл. Бюл. №5, 2014 г. Габбасов А.Ф., Антонов М.В., Семенова О.В.
9. Камера-убежище и способ. Патент на полезную модель RU № 2416723 E21F 11/00, опубл. Бюл. №11, 2011 г. Пэйтон-Эш Г., Бейтцель Д., Рор Б.
10. Запобіжне пересувне кріплення гірничих виробок. Патент на корисну модель UA №134900, E 21D 11/40, опубл. Бюл. № 11, 2019 р. Лапшин О.С., Гацький А.К., Гацький І.А., Сукач С.В.
11. Пересувна камера повітропостачання в гірничих виробках. Патент на корисну модель UA №145166, E21D 11/00, опубл. Бюл. № 22, 2020 р. Лапшин О.С., Лапшин О.О., Гацький А.К., Гацький І.А.
12. Система саморятівання гірників. Загальні вимоги. – К.: Стандарт Мінпаливноенерго України, 2004. – 26 с.

УДК 330.021.46

А.М. ТУРИЛО, А.А. ТУРИЛО, доктори екон. наук, професори  
С.М. ГОРСЬКА, асист.

Криворізький національний університет

### ПРОБЛЕМИ ЕКОНОМІЧНОГО БАЛАНСОВОГО РОЗВИТКУ В КООРДИНАТАХ «ЦІННІСТЬ ЛЮДИНИ (ЛЮДИНОЦЕНТРИЗМ) – СПРАВЕДЛИВІСТЬ – ЕФЕКТИВНІСТЬ»

**Мета.** Розвиток будь-якого суб'єкта господарювання є складним процесом. Він потребує всебічного дослідження й аналізу. Тільки таким чином можна визначити і забезпечити бажаний вектор розвитку суб'єкта господарювання.

Мета даної роботи полягає в тому, щоб дослідити і розкрити проблему економічного балансового розвитку суб'єкта господарювання в аспекті його зв'язку з сутністю таких категорій як цінність людини, соціальна справедливість і ефективність.

**Методи дослідження.** Авторами роботи використано метод узагальнюючого аналізу і науково-логічний підхід до розкриття сутності економічного балансу і його зв'язку з такими категоріями як цінність людини, соціальна справедливість і ефективність.

**Наукова новизна.** У роботі запропоновано ввести в науково-практичний обіг, для більш глибокого аналізу та системного управління економічним розвитком підприємства, таке поняття як «економічний баланс»; розбито підходи до трансформації якості економічного балансу підприємства з характеристикою відповідних станів економіки в процесі його розвитку з врахуванням зміни рівнів людського капіталу та ефективності діяльності підприємства.

**Практична значимість.** Використання розглянутих у роботі питань дозволить, по-перше, більш глибоко і системно здійснювати економічний аналіз діяльності підприємства в його статичі і динаміці, по-друге, є основою для розробки відповідних методик з метою більш детальних оцінок процесу формування і підтримання необхідного рівня економічного балансу на підприємстві.

**Результати.** Представлений авторами роботи теоретико-методичний матеріал розширює теоретичну і практичну бази стосовно дослідження, аналізу й управління економічною діяльністю підприємства. Розкрито зміст економічного балансу підприємства і процес його трансформації у часі відповідно рівня його якості. Показано зв'язок економічного балансу з такими важливими показниками комплексної оцінки діяльності підприємства, як рівень іннова-

ційності і рівень економічної ефективності в аспекті динамічного його розвитку. Відображено ключовий вплив обсягу і рівня людського капіталу на загальний рівень потенціалу підприємства, ефективність системи управління та рівень якості його економічного балансу, а також рівня людиноцентризму в цивілізаційному аспекті на прогресивний розвиток суспільства.

**Ключові слова:** економічний баланс, балансування, підприємство, людський капітал, ефективність, цінність людини.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-49-54

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Проблема полягає в тому, що в реальній економічній оцінці діяльності підприємства не використовується такий важливий її елемент як процес аналізу його економічного балансу. Такий аналіз є актуальним і співзвучним як науковим так і практичним завданням.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У наукових працях і економічній літературі питання сутності і конкретних досліджень стосовно оцінки категорії «економічний баланс» в діяльності підприємства не мають відповідних акцентів [1–11].

**Постановка задачі.** Ґрунтовна і системна оцінка економічної діяльності підприємства вимагає дослідження і розкриття сутності такої категорії як «економічний баланс». Більш того сучасний стан формування нової економіки, а саме інтелектуально-інноваційної економіки, не можливий без врахування місця і ролі в даному процесі людського капіталу.

**Викладення матеріалу та результати.** Суспільство, економіка та їх розвиток є надскладними явищами в аспекті дослідження їх сутності й оптимального розвитку.

Недостатня ефективність економіки, соціально-економічні проблеми, фінансово-економічні кризи, дефіцит енергетичних ресурсів, невирішеність процесів глобалізації і гармонізації життєдіяльності світового суспільства – це в багатьох випадках відсутність необхідного балансу.

Баланс може бути різним: планетарним, природно – людським, суспільним, екологічним, соціальним, економічним тощо.

У даній роботі розглядається економічний аспект процесу балансування. Стосовно понять «економічний баланс», «економічний баланс розвитку підприємства», «балансування економіки», «економічне балансування підприємства» тощо існує певна несправедливість відносно їх дослідження і використання в науковій, навчальній, навчально-освітній і практичній діяльності.

В економічній літературі, у наукових розробках переважно розглядаються такі дефініції як економічний (фінансовий) стан, рівновага, економічна (фінансова) стійкість, умови і межі розвитку тощо.

Вважаємо, що при дослідженні економічної сутності підприємства, закономірностей і особливостей його розвитку, шляхів забезпечення ефективної системи управління ним необхідно використовувати і оперувати такою категорією як «економічний баланс».

Більш того, ми вважаємо, виходячи із загального закону рівноваги, що:

економічний баланс – це об'єктивна економічна категорія;

економічний баланс – це закон економіки, і саме через таку призму треба розглядати процес функціонування всіх суб'єктів господарювання;

економічний баланс є конкретизованим виразом закону рівноваги і для суб'єктів господарювання має предметно-практичне значення.

Економічний баланс притаманний всім рівням господарювання.

Економічний баланс як економічний закон певного виду має свої форми дії і прояву в процесі діяльності суб'єктів господарювання.

На наш погляд, головний вид балансу для суспільства (для різних його рівнів) і для конкретної людини, зокрема, це баланс між правом на дію, прийнятим рішенням, отриманим результатом, з одного боку, і безумовною справедливою відповідальністю за таке право, рішення, результат, з іншого боку.

Система інституцій держави, активно-прогресивна частина суспільства, керуючись законами природи і суспільного розвитку, аналізуючи багатий історичний досвід і спираючись на передові наукові теорії прогресивно-гармонійного розвитку людства, повинна розробити механізм реалізації головного балансу суспільства як системи, що охоплює і бездоганно працює по всій вертикалі та горизонталі суспільного устрою.

Головний баланс суспільства діалектично визначає інші, похідні від нього, баланси в різних сферах діяльності суспільства, і у тому числі, виходячи із існуючої суспільно-економічної формації та ринкової моделі господарювання, такий вид балансу як економічний баланс.

Для економіки він є всеохоплюючим, багатограним і багаторівневим з позиції сутності та форм прояву в макро- і мікросередовищі.

На мікрорівні кожне підприємство (фірма, компанія, корпорація тощо) як незалежний суб'єкт господарювання вибудовує свою систему економічного балансу. При цьому економічний баланс певного підприємства може мати свою сукупність складових балансів (по вертикалі та горизонталі), яка визначається топ-менеджментом у відповідності з профілем, розміром і складністю виробничо-господарської діяльності підприємства. Виходячи із стратегії розвитку підприємства, змісту економічного менеджменту, особливостей і структури системи економічних планів, глибини і сутності аналітичної роботи, розуміння значимості формування і оцінювання економічних балансів на підприємстві і визначається балансовий підхід стосовно його економічної діяльності.

У принципі система економічних балансів підприємства може включати в себе не тільки економічний баланс підприємства, цеха, дільниці, бригади, відділу, а і навіть економічний баланс конкретного працівника (це може бути і у формі економічного самобалансу працівника підприємства).

Економічний баланс, як нове явище в діяльності суб'єктів господарювання, за логікою, змістом та своїм призначенням більше всього підходить і повинен стати гармонійною складовою процесу планової роботи, тобто економічний баланс повинен прийняти конкретні кількісно-якісні характеристики і контролюватися таким же чином, як це «класично» відбувається у процесі планової роботи на будь-якому підприємстві.

Таке втілення економічного балансу в процесі загальної планової роботи на підприємстві, дозволить виключити додаткові управлінські витрати стосовно інтеграції балансового підходу в систему планів підприємства.

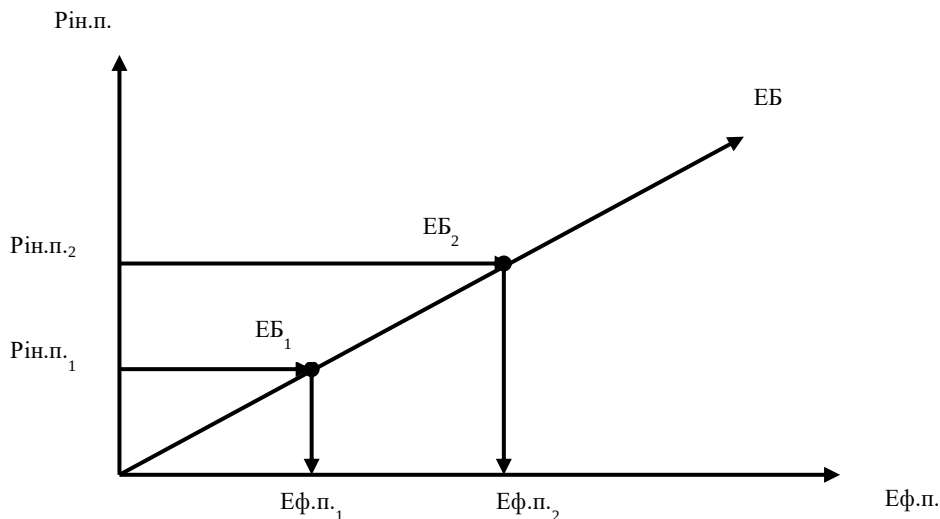
Економічний баланс у ринковій моделі господарювання як економічне явище є рухомою, динамічною субстанцією і в процесі економічної діяльності може змінюватися та набувати різних форм, що представлено на рис. 1.



Рис. 1. Трансформація і характерні ознаки якості економічного балансу підприємства

Закони ринку зобов'язують суб'єктів підприємницької діяльності постійно розвиватися, удосконалюватися, рухатися від однієї цілі до іншої, інакше можна зникнути з «ринкової мапи», бо «потяг конкуренції» не стоїть на місці, а напроти тільки нарощує свою швидкість.

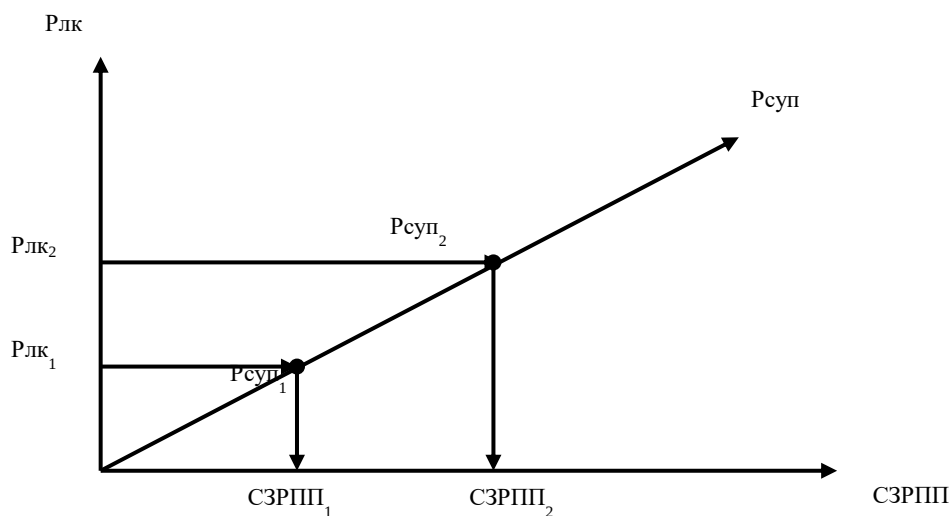
Перехід підприємства до нової цілі у будь-якому її виді (прибуток, рівень інноваційності, розмір підприємства, обсяг продаж, рівень економічної безпеки, рівень людського капіталу, частка ринку тощо) вимагає від нього необхідних адекватних зусиль. Наприклад, щоб досягти певного рівня економічного балансу і його підтримання потрібна сукупність постійних обґрунтованих рішень і дій. Перехід з одного рівня інноваційності підприємства (Рін.п.1) на більш високий рівень (Рін.п.2) потребує розроблення реальних заходів по забезпеченню не тільки нового рівня інноваційності підприємства, а і пов'язаного з ним нового економічного балансу (рис. 2).



**Рис. 2.** Спрощена умовна залежність рівня ефективності від рівня інноваційності підприємства при відповідній зміні рівня його економічного балансу: Рін.п. – рівень інноваційності підприємства (Рін.п.<sub>1</sub>, Рін.п.<sub>2</sub> – рівні інноваційності підприємства відповідно до моментів часу  $t_1$  і  $t_2$ ); Еф.п. – рівень ефективності підприємства (Еф.п.<sub>1</sub>, Еф.п.<sub>2</sub> – рівні ефективності підприємства відповідно до моментів часу  $t_1$  і  $t_2$ ); ЕБ – рівень економічного балансу підприємства (ЕБ<sub>1</sub>, ЕБ<sub>2</sub> – рівні економічного балансу підприємства відповідно до моментів часу  $t_1$  і  $t_2$ )

Саме наявність нового економічного балансу за вибраним критерієм буде вказувати на правильність заходів по забезпеченню інноватизації підприємства (Рін.п.<sub>2</sub>).

Аналогічна залежність і відповідний їй зміст представлено на рис. 3, коли додаткові витрати в зростання рівня людського капіталу на підприємстві (від Рлк<sub>1</sub> до Рлк<sub>2</sub>) призведуть через більш ефективну систему управління (від Рсуп<sub>1</sub> до Рсуп<sub>2</sub>) до підвищення рівня потенціалу підприємства і рівня ефективності його використання (від СЗРПП<sub>1</sub> до СЗРПП<sub>2</sub>).



**Рис. 3.** Спрощена умовна залежність ступеня зростання і реалізації потенціалу підприємства від рівня людського капіталу підприємства при відповідній зміні рівня системи управління на ньому: Рлк – рівень людського капіталу підприємства (Рлк<sub>1</sub>, Рлк<sub>2</sub> – рівні людського капіталу підприємства відповідно до моментів часу  $t_1$  і  $t_2$ ); СЗРПП – ступінь зростання і реалізації потенціалу підприємства (СЗРПП<sub>1</sub>, СЗРПП<sub>2</sub> – ступені зростання і реалізації потенціалу підприємства відповідно до моментів часу  $t_1$  і  $t_2$ ); Рсуп – рівень системи управління підприємством (Рсуп<sub>1</sub>, Рсуп<sub>2</sub> – рівні системи управління підприємством відповідно до моментів часу  $t_1$  і  $t_2$ )

Формування й оцінювання економічного балансу на макрорівні дозволить не тільки підвищити ефективність використання всіх державних ресурсів, а й поступово, еволюційно в процесі соціального і прогресивного розвитку будь-якої країни, призведе до свідомо-об'єктивного формування суспільного підходу до значимості біосфери і ноосфери для всього людства (рис. 4).

Людина як найвища цінність суспільства, а категорія «цінність людини» як головна характерна ознака такого суспільства у гармонії з балансовим підходом у системі управління і розвитку соціальної й економічної сфер – це найефективніший шлях до якісно-прогресивного розвитку людини, суспільства, біосфери і ноосфери.

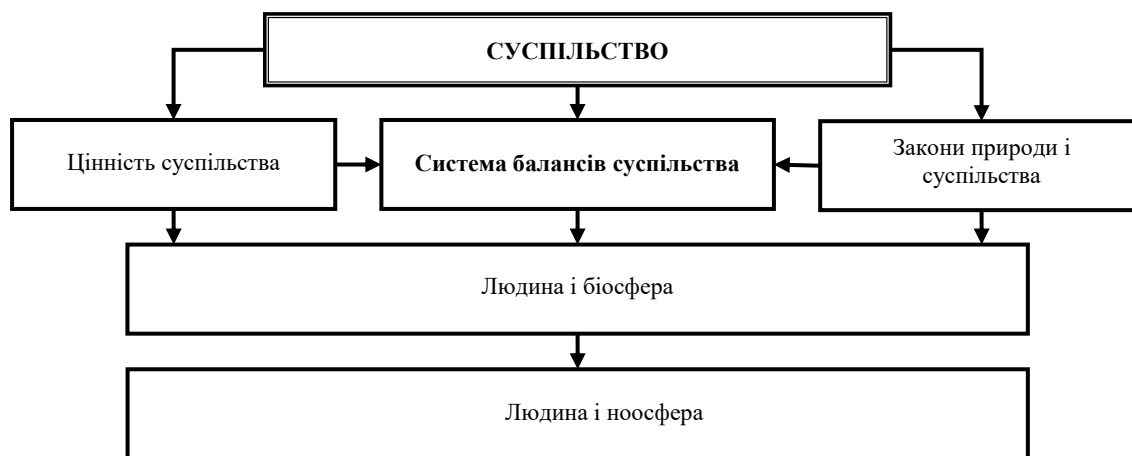


Рис. 4. Баланси в системі перспективного розвитку суспільства

Зростання всебічної якості суспільного розвитку закономірно підвищить рівень людиноцентризму в суспільстві (рис. 5), реально поставить цінність людини в центр суспільної діяльності.

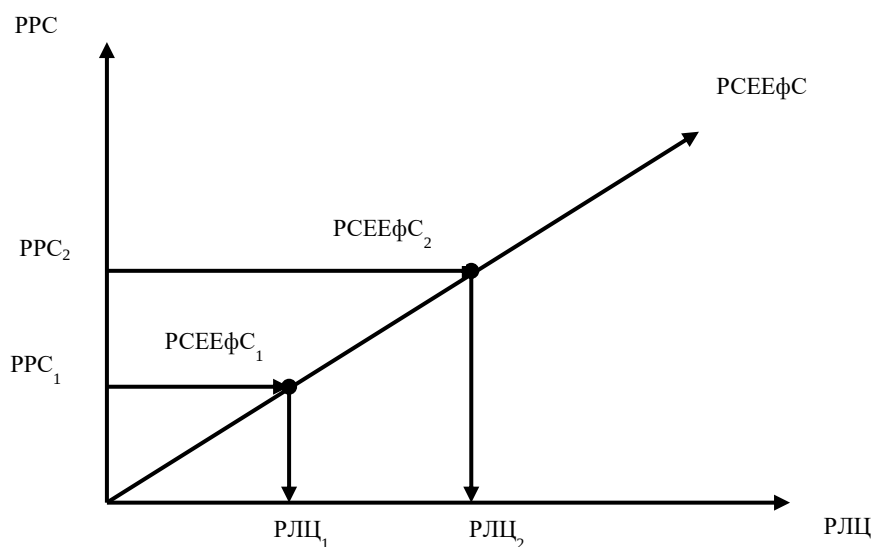


Рис. 5. Спрощена умовна залежність рівня людиноцентризму від рівня якості розвитку суспільства при відповідній зміні рівня соціально-економічної ефективності суспільства: РРС – рівень розвитку суспільства ( $РРС_1$ ,  $РРС_2$  – рівень розвитку суспільства відповідно до моментів часу  $t_1$  і  $t_2$ ); РЛЦ – рівень людиноцентризму в суспільстві ( $РЛЦ_1$ ,  $РЛЦ_2$  – рівні людиноцентризму в суспільстві відповідно до моментів часу  $t_1$  і  $t_2$ ); РСЕЕФС – рівень соціально-економічної ефективності суспільства ( $РСЕЕФС_1$ ,  $РСЕЕФС_2$  – рівні соціально-економічної ефективності суспільства відповідно до моментів часу  $t_1$  і  $t_2$ )

**Висновок та напрямок подальших досліджень.** Таким чином, розглянуті в даній роботі теоретико-філософські підходи, судження і бачення дозволять більш глибоко та акцентовано підійти до вирішення проблеми взаємозв'язку розвитку суспільства і економіки зі значимістю, добробутом та гармонізацією життя конкретної людини, враховуючи при цьому об'єктивні закономірності щодо забезпечення процесів економічного балансування.

Даний матеріал потребує подальших досліджень в ракурсі розробки певних методик стосовно розрахунку і використання на практиці показників, що характеризують економічний баланс підприємства.

## Список літератури

1. Турило А. М., Турило А. А., Короленко С. М. Фінанси підприємства та їх місце в його інвестиційно-витратній діяльності. *Вісник КНУ*. 2019. № 49. С. 64-69.
2. Андрушків Б. М., Кузьмін О. Є. Основи менеджменту. Львів: Світ, 1995. 307 с.
3. Ансофф И. Стратегическое управление. М.: Экономика, 1989. 405 с.
4. Бедринцев М. Д. Ефективність діяльності суб'єктів підприємництва в сучасних умовах господарювання. *Бізнес Інформ*. 2013. № 4. С. 183–190.
5. Будзан Б. Менеджмент в Україні: сучасність і перспективи. К.: Основи, 2001. 207 с.
6. Жук М. В. Міжнародні стратегії економічного розвитку: навч. посіб. К.: Паливода А. В., 2006. 245 с.
7. Турило А. М. Адаптація – об'єктивний економічний закон, парадигма і умова конкурентного розвитку. *Економіка та митно-правові відносини*. 2019. Вип. 13-14. С.45-49.
8. Турило А. М., Короленко Р. В. Людський капітал як основне джерело економічного зростання. Проблеми економічної освіти і науковий прогрес: матеріали міжвуз. наук.-практ. конф., 30 лист. 2007 р. Кривий Ріг, 2007. С. 111.
9. Турило А. А., Турило А. М. Оцінка результативності, ефективності, продуктивності, збитковості підприємства : монографія. Кривий Ріг: Етюд-Сервіс, 2009. 196 с.
10. Поддєрьогін А. М. Фінанси підприємств : підручник. К. : КНЕУ, 2013. 460 с.
11. Шарко В. В. Шляхи, основні напрямки та інструменти механізму інтенсифікації виробництва промислового підприємства. *Економіка і управління*. 2012. № 4. С. 64–69.

УДК 621.9.01

М.В. КІЯНОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., Н.І. ЦИВІНДА, канд. техн. наук, доц.,  
Л.І. ЛАУХІНА, О.В. ЧЕРНЯВСЬКА, старші викладачі, І.О. ЗУЄВ, студ.  
Криворізький національний університет

## АНАЛІЗ ПРИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ЗА ВИРОБНИЧНИМИ КРИТЕРІЯМИ

**Мета** – визначення можливості підвищення продуктивності механічної обробки деталей із високомарганцевих сталей за рахунок розробки оптимальних параметрів технологічної системи ВПД (верстат – пристосування – інструмент–деталь): жорсткості та власної частоти коливань елементів системи ВПД.

**Методи дослідження** – були використані теорія різання металів, статистичного аналізу, статистичних рішень, теорії ймовірності, математичного аналізу, теорії коливань, віброакустичної діагностики, теорії розпізнавання технічних станів.

Проведені дослідження обробки броней дробарок при обробці токарно-карусельних верстатах показали, що на жорсткість та вібростійкість системи ВПД впливають режими різання. Установлено, що критерієм оцінки режимів різання, що застосовуються на заводах, є коефіцієнт нормативної зміни швидкості різання. Визначені основні параметри технологічної системи ВПД, від яких залежить стійкість різального інструменту. Загалом статистичні дані спостережень на підприємстві показують, що майже 70% деталей виготовляють зі швидкостями різання нижче нормативних в 1,3...2,0 рази. При обробці на заводах броней, різноманітних за розмірами, коефіцієнт  $K_n$  нормативної зміни швидкості різання може знижуватись до 0,25, тобто допустима швидкість різання може бути в 4 рази менше нормативної. Це пояснюється не тільки специфічними властивостями високомарганцевої сталі, але й недостатньою жорсткістю і вібростійкістю технологічної системи ВПД. Це затруднює застосування різального інструменту з пластинами з Кубічного нітриду бору.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в тому, що за встановленою [11] сталого діагностичною ознакою початку інтенсивного руйнування ріжучої частини інструменту з ПНТМ на основі КНБ в діапазонах технологічних параметрів обробки деталей, можливо визначити оптимальні режими різання.

**Практичне значення** отриманих результатів полягає в тому, що при впровадженні методу і технологій діагностичного контролю працездатності системи верстат-пристосування-інструмент-деталь при обробці деталей із високомарганцевих сталей вирішується задача запобігання процесам прискореного пошкодження інструментальних пластин і збільшення їх ресурсу.

**Результат** – подальші дослідження віброакустичних реакцій змін технічних станів елементів системи ВПД у процесах обробки броней з високомарганцевих сталей нададуть можливість розробити критерії стійкості різців та впровадити їх у виробництво.

**Ключові слова:** технологічна система ВПД, продуктивність процесу токарної обробки, броні, високомарганцева сталь, різальний інструмент, КНБ, режими різання, швидкість різання.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-54-58

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Підвищення ефективності механічної обробки різанням є традиційно важливою задачею машинобудування, де за останні роки збільшилися обсяги обробки деталей із високомарганцевих сталей, що входять до складу гірничо-металургійного обладнання [1].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Найбільш актуальним на сьогодні є напрям наукових досліджень, направлений на вивчення і розробку оптимальних параметрів технологічної системи ВПД (верстат – пристосування – інструмент–деталь): жорсткості та власної частоти коливань [2-6].

Спостереження за роботою токарно-карусельних верстатів по обробці броней дробарок на підприємствах Кривого Рогу з дослідженням параметрів системи ВПД, що впливають на продуктивність, показують, що при вдосконаленні цієї системи продуктивність значного числа верстатів може бути підвищена на 20-30% (рис.1).

**Постановка задачі.** Вплив технологічної системи ВПД на продуктивність процесів різання полягає в тому, що дійсна швидкість різання в зоні різання безперервно змінюється з частотою коливання системи від нульового чи майже нульового її значення, в 5 разів більше окружної швидкості деталі. В нормативах режимів різання її називають швидкістю різання.

Зменшити границі зміни дійсної швидкості різання чи довести цю границю до стану, коли коливальний процес не впливає на стійкість різця і окружна швидкість деталі стане рівною швидкості різання, можна шляхом підвищення жорсткості системи ВПД. Жорсткість системи, яка практично не впливає на стійкість, називається оптимальною чи ідеальною жорсткістю.

**Викладення матеріалу та результати.** На режими різання, що призначаються на заводах, впливає жорсткість та вібростійкість системи ВПД. Нормативні режими, що установлюються при оптимальній жорсткості, завжди вище режимів, що використовуються, коли жорсткість системи ВПД нижче оптимальної.

Нормативні режими є максимально можливими для визначених різальних властивостей інструменту деталі, що оброблюється різанням. Такі режими є ідеальними, до них слід прагнути при виготовленні деталей шляхом забезпечення відповідних технологічних умов і по рівню цих режимів слід оцінювати доцільність режимів різання, що застосовуються на заводах і ступінь досконалості системи ВПД.

Тому критерієм оцінки на режимів різання що застосовуються на заводах є коефіцієнт нормативної зміни швидкості різання

$$K_H = \frac{V_z}{V_H}, \quad (1)$$

де  $V_z$  – швидкість різання, що застосовується;  $V_H$  – нормативна швидкість різання.

Значення швидкості різання  $V_z$  установлюють технологи з врахуванням стійкості різця, а нормативне значення швидкості різання  $V_H$  визначають за формулою

$$V_H = \frac{C_v}{T_0^m \times s^x \times t^y} \times K_v, \quad (2)$$

де  $C_v$  – коефіцієнт, що враховує умови обробки;  $T_0$  – період оптимальної стійкості інструменту, хв;  $s$  – подача, мм/об;  $t$  – глибина різання, мм;  $m$ ,  $x$ ,  $y$  – показники степені;  $K_v$  – узагальнений поправковий коефіцієнт, що враховує зміни умов обробки до табличних.

Оптимальну стійкість  $T_0$  визначають за формулою

$$T_0 = T \times \delta\sigma / \delta z, \quad (3)$$

де  $T$  – період стійкості інструменту, хв;  $\delta\sigma$  – зношення різця, яке планується під час роботи;  $\delta z$  – реальне зношення різця під час роботи.

При обробці на заводах броней, різноманітних за розмірами, коефіцієнт  $K_H$  нормативної зміни швидкості різання згідно з (1) та (2) може знижуватись до 0,25, тобто допустима швидкість різання може бути в 4 рази менше нормативної. Статистичні дані спостережень на підприємстві показують (рис. 2), що майже 70% деталей виготовляють зі швидкостями різання нижче нормативних в 1,3...2,0 рази. Це пояснюється недостатньою жорсткістю і вібростійкістю технологічної системи ВПД.



Рис. 1. Оброблення броні конусної дробарки на токарно-карусельних верстатах

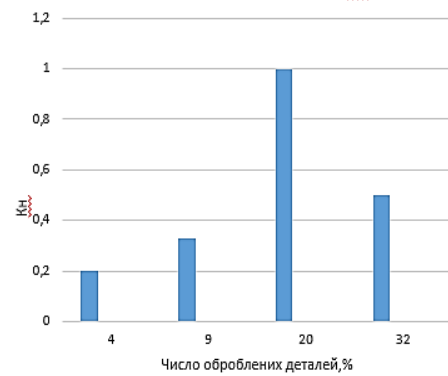


Рис. 2. Діаграма зміни коефіцієнту  $K_n$

Раніше проблему можна було вирішити тільки шляхом розробки і впровадження технологічних режимів різання, тобто режимів з врахуванням технологічних умов обробки деталей і з застосуванням різноманітних методів і засобів підвищення жорсткості та вібростійкості системи ВПД.

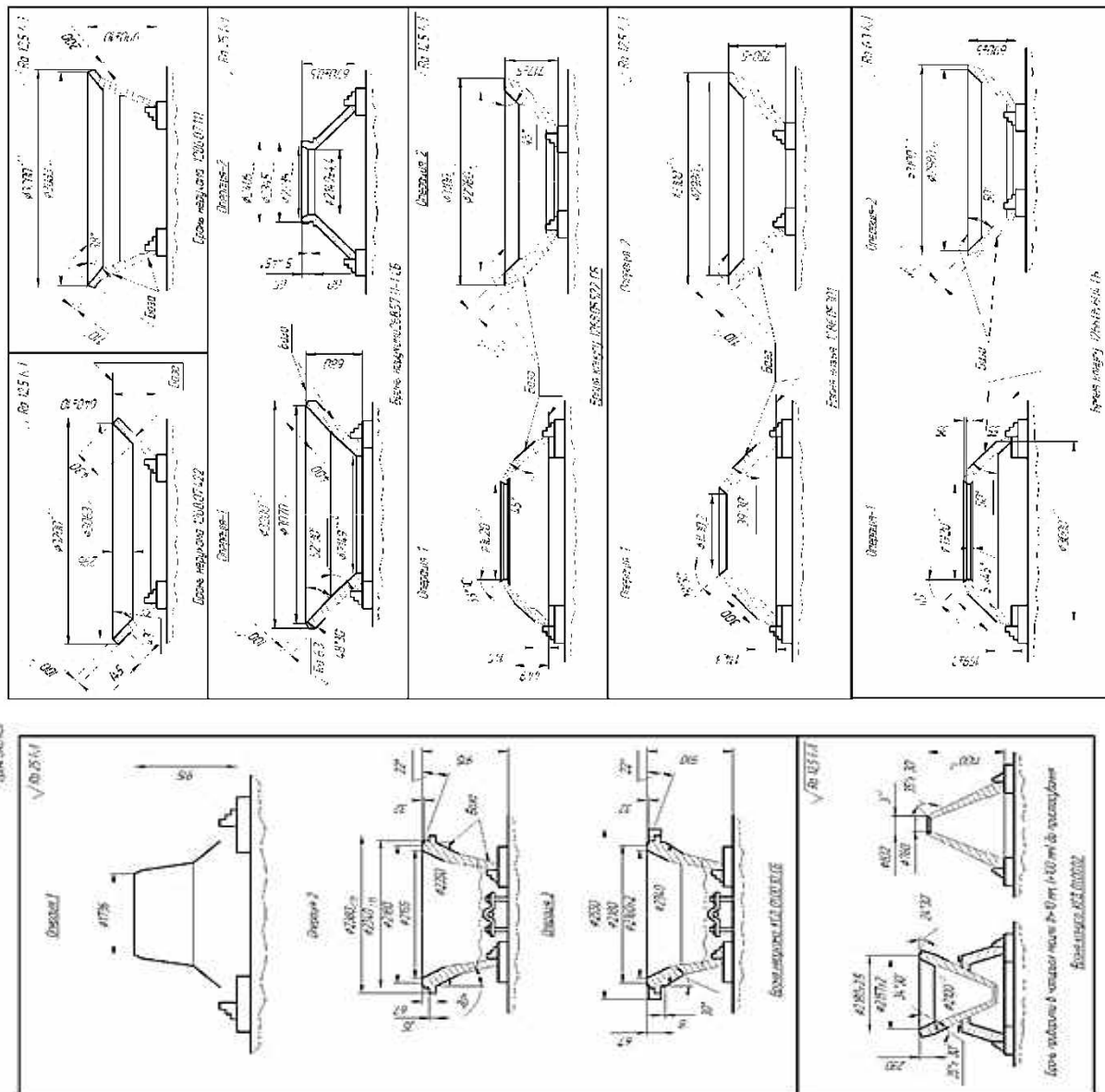


Рис. 3. Приклад установки броней на токарно-карусельних верстатах

Було досліджено технологічний процес обробки на токарно-карусельному верстаті 17-ти броней з високомарганцевої сталі (рис. 3). Границя міцності при розтягненні 110Г13Л у загартованому стані такі:  $\sigma_b = 800-1000$  МПа. За Бетанелі опір оброблююмого матеріалу різанню характеризується дотичними напругами на умовній площині здвигання  $\tau_{\phi}$ . Величина  $\tau_{\phi}$  для сталі 110Г13Л дорівнює  $1480 \text{ МН/м}^2$ , тоді як для сталі Х18Н10Т тільки  $592 \text{ МН/м}^2$ . Значення коефіцієнту  $K_n$  за виробничими критеріями дорівнює 0,25. При таких умовах роботи максимальна стійкість різців ВК8 відповідає швидкості різання  $9 \text{ м/хв}$ .

Вплив жорсткості на стійкість різців при точінні броней з високомарганцевої сталі така: з зміною жорсткості елементів системи токарно-карусельного верстату від 5000 до 25000 Н/мм стійкість інструменту підвищується в 8-10 разів. Що особливо актуально при застосуванні пластин з КНБ для токарних різців [7]. Дослідження показали, що при точінні броні дробарки зі сталі 110Г13Л інструментом з пластинами, оснащеними ПНТМ на основі КНБ, зусилля різання майже на порядок нижче, ніж при обробці різцями ВК8, що збільшує строк служби унікальних металорізальних верстатів (при обробці твердим сплавом зусилля різання досягають 125 000Н, а при обробці пластинами ПНТМ на основі КНБ RNMN 190700Т - 8 000-10 000 Н). Швидкість різання можна підвищити до 70-120 м/хв [8,9].

Проблема полягає в тому, що основним недоліком ріжучого інструменту з КНБ є висока вартість та нездатність витримувати ударні навантаження. Тому питання стійкості ріжучого інструменту з КНБ, яка на пряму залежить від жорсткості верстату – основна причина обмеження застосування в виробничих умовах, що впливає на термін експлуатації інструменту і на собівартість виготовлення деталей.

Трудомісткість обробки броней дробарок, співставима з ресурсом інструменту. Зупинка процесу по причині зношення інструменту часто означає брак деталі високої вартості [10].

**Висновок та напрямок подальших досліджень.** На основі досліджень було виявлено, що вплив жорсткості та вібростійкості системи ВППД на рівень режимів різання пояснюється фізико-механічними якостями оброблююмих і інструментальних матеріалів, тобто залежністю сили різання від швидкості різання. Вплив фізико-механічних властивостей оброблююмих матеріалів на нестабільність процесу різання для можливості застосування високовартісних інструментальних матеріалів можливо повністю виключити, якщо забезпечити оптимальну жорсткість системи ВППД.

Все ще низька стійкість, а відповідно і ефективність використання пластин з ПНТМ на основі КНБ, пояснюється відсутністю достатніх засобів і технологій діагностування процесів різання, відсутністю методів запобігання руйнуванню інструментальних пластин при обробці високомарганцевих сталей, що стримує можливості адаптивного керування процесами обробки на верстатах з ЧПК і збільшення ресурсу інструментальних матеріалів. Подальші дослідження віброакустичних реакцій змін технічних станів елементів системи ВППД у процесах обробки броней з високомарганцевих сталей нададуть можливість розробити критерії стійкості різців та впровадити їх у виробництво[11].

Таким чином розробка і впровадження оптимальних режимів різання з врахуванням конкретних технологічних умов обробки високомарганцевих сталей та інших важкооброблююмих матеріалів, тобто технологічних режимів, має велике значення для виробництва та дозволить на 15-20% підвищити продуктивність праці.

#### *Список літератури*

1. Цивінда Н.І., Цівко О.Ф. Визначення раціональних методів механічної обробки деталей гірничого обладнання з високомарганцевих сталей // Вісник КТУ: Збірник наукових праць. – Кривий Ріг.: Вип.5(15).– 2006. – С.85-89
2. Цивінда Н.І. Аналіз вибору інструментального матеріалу для обробки важкооброблююмих матеріалів гірничого машинобудування //Вісник КТУ Збірник наукових праць вип. 24, Кривий Ріг-2009р.-С. 70-73
3. Кіянновський М. В., Цивінда Н. І. Вибір найбільш інформативних методів діагностування процесів обробки марганцевих сталей // Вісник КТУ: збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2010. – Вип. 26. – С. 178–181.
4. Цивінда Н. І. Експериментальні дослідження віброакустичних реакцій змін технічних станів елементів інструментальних систем в процесах обробки високомарганцевих сталей / Н. І. Цивінда // Вісник КТУ : збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2011. – Вип. 29. – С. 153–157.
5. Цивінда Н. І. Вплив стійкості різців з пластинами з ПНТМ на основі КНБ на ймовірність завершення технологічної операції/ Н. І. Цивінда // Вісник КТУ : збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2012. – Вип. 30. – С.
6. Цивінда Н.І. Чернявська, О. В. Лаухіна Л.І., Федусов В.І Аналіз факторів, що впливають на стійкість різального інструменту при обробці марганцевих сталей/Актуальні проблеми технічних і електромеханічних систем,

будівельних комплексів та урбаністики – 2019, Міжвузівська науково-практична конференція молодих вчених та студентів, Кривий Ріг, 19 квітня 2019 р. С.20-22

7. **Клименко С. А.** Концепция повышения износостойкости и производительности инструмента, оснащенного ПСТМ на основе КНБ / С. А. Клименко, М. Ю. Копейкина // Процеси механічної обробки в машинобудуванні. – 2009. – Вип. № 6. – С. 119–129.

8. **Кіяновський М. В., Цивінда Н. І.** Виробничі дослідження стійкості інструментальних матеріалів при обробці деталей гірничо-металургійного комплексу // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2010. – Вип. 26. – С. 360–366.

9. **Цивінда Н. І.** Оцінка ефективності методів статистичного аналізу для діагностики станів ріжучої кромки пластин з КНБ при обробці високомарганцевих сталей / Н. І. Цивінда // Наукові нотатки. – Луцьк, 2011. – Вип. 32. – С. III Міжнародній науково-практичній конференції «Теоретичні і експериментальні дослідження в технологіях сучасного матеріалознавства та машинобудування» (м. Луцьк, ЛНТУ, 2011)

10. **Цивінда Н.І., Кіяновський М.В., Петров С.О.** Забезпечення розмірної стійкості інструмента при обробці великогабаритних деталей оболонкового типу з твердосплавним покриттям поверхонь підвищеної точності // Сучасні технології в промисловому виробництві. Науково-технічна конференція. Матеріали конференції, м. Суми, 2015р.- С.34-35.

11. **Кіяновський , Н.І. Цивінда, Третьак В. В.** Експериментальні дослідження керування стійкістю ріжучої кромки інструментів із ПСТМ/ М.В. // ADDITION FOR PROCEEDINGS XXVIII INTERNATIONAL CONFERENCE «NEW LEADING TECHNOLOGIES IN MACHINE BUILDING» Научное издание. Труды Двадцать восьмой международной конференции «Новые технологии в машиностроении» KOBLEVO – KHARKOV, UKRAINE SEPTEMBER 2 – 8 2018 COLLECTION OF THE SCIENTIFIC PAPERS, KOBLEVO – KHARKOV, 2018– С.8-10.

УДК 629.083:656.13

В.І. ПАХОМОВ, канд. техн. наук, доц., І.В. ГІРІН, ст. викл.,  
В.Ю. ТИЩЕНКО, наук. співроб., О.А. ЖАЛДАЧЕНКО, студ.  
Криворізький національний університет

## ОБҐРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ ОРГАНІЗАЦІЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КАР'ЄРНИХ АВТОСАМОСКИДІВ

**Мета.** Основною метою роботи є встановлення закономірностей, що пов'язують гірничотехнічні умови експлуатації кар'єрних автосамоскидів з організаційними заходами їх використання для обґрунтування методів управління їх ресурсом в екстремальних умовах ведення гірських робіт, що дозволить підвищити ефективність транспортних систем в процесі розвитку кар'єра.

**Методи дослідження.** У роботі використовувався комплексний метод досліджень, що включає аналіз і наукове узагальнення науково-технічної інформації. Застосовані програмно-цільовий метод, логічний і математичні методи, на яких базувалася методологія теоретичних досліджень роботи. На підставі аналізу досліджень розглянута ефективність використання нових технічних рішень, спрямованих на підвищення продуктивності кар'єрного автомобільного транспорту. Також застосовується ряд приватних методів: структурно-статистичний і програмно-цільовий аналіз, гіпотетичний і аксіоматичний методи, а також метод інтерпретації

**Наукова новизна.** Наукову цінність представляють: - запропонована класифікація умов експлуатації систем кар'єрного автотранспорту по комплексному критерію, заснована на структурному взаємозв'язку науково-технічних рішень щодо забезпечення ефективності системи кар'єрного автотранспорту глибоких кар'єрів; - методичні засади оцінки і формування якості кар'єрних самоскидів, а також вибору оптимальної моделі для конкретних гірничотехнічних умов експлуатації; - встановлені кількісні значення і закони розподілу показників надійності автосамоскидів, використання яких в методиці розрахунку продуктивності вантажно-транспортних комплексів дозволяє обґрунтовано визначати необхідну кількість обладнання і ймовірність виконання виробничої програми кар'єра при оперативному плануванні.

**Практична значимість** роботи полягає в тому, що розроблена методика збору та обробки інформації, що дозволяє враховувати працездатність кар'єрного автотранспорту в заданих гірничотехнічних умовах з урахуванням схеми розстановки і типу автомобілів-самоскидів. На підставі методики структурно-статистичного аналізу виявлено деталі і вузли, що лімітують надійність кар'єрних автосамоскидів.

**Результати:** розроблені алгоритмічне забезпечення та методика оптимізації ефективності експлуатації великовантажних автосамоскидів і якості організації транспортного процесу, впровадження яких в умовах ПрАТ «Північний ГЗК» дозволяє скоротити до мінімуму втрати робочого часу на виконання допоміжних операцій і зменшити в 1,2 рази загальне число постів ТО і ТР, а також збільшити коефіцієнт використання календарного фонду часу на 14-17%.

**Ключові слова:** великовантажні автосамоскиди, організація допоміжних робіт, внутрішньокар'єрний пункт.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-58-64

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Процес транспортування гірничої маси автомобілем-самоскидом складається з повторюваних циклів. Крім операцій, що входять в цикл перевезень гірської маси, слід виділити операції, що належать до змінного циклу експлуатації автомобілів-самоскидів. До цих допоміжних операцій відносяться подача автомобіля з автотранспортного цеху для роботи в кар'єрі і повернення в нього, згідно добовому режиму роботи кар'єра. Автомобіль-самоскид заправляють паливом при подачі його з автотранспортного цеху або при поверненні в нього, а також при роботі в кар'єрі.

Процеси підтримки працездатності та експлуатації автомобілів-самоскидів великої вантажопідйомності при відпрацюванні глибоких горизонтів кар'єрів характеризуються такими особливостями:

через скорочення парку машин в значній мірі втрачаються властивості однорідності і масовості при виконанні ТО і ТР;

зі збільшенням глибини кар'єру і погіршенням гірничотехнічних умов експлуатації безперервно зростає питома вага ремонтно-профілактичних робіт, що призводить до скорочення тривалості перебування автомобілів-самоскидів в роботі, а також зростає нерівномірність вимог на виконання ремонтних робіт;

разом зі збільшенням обсягів робіт по ТО і ТР автомобілів-самоскидів зростає тривалість підготовчо-допоміжних операцій і втрати робочого часу, обумовлені збільшенням віддаленості місця роботи автомобілів від автотранспортного цеху.

Збільшення сумарної трудомісткості ТО і ТР автомобілів-самоскидів викликано не тільки ускладненням гірничотехнічних умов експлуатації, але також і недосконалою організацією експлуатації автотранспортних засобів. У цих умовах витрати змінного часу на щозмінне обслуговування, заправку паливом, на ТО, ТР і очікування ремонту потрібно оптимізувати. Комплексна оцінка всього процесу експлуатації автосамоскидів в даний час відсутня, але ж саме вона дозволила б істотно поліпшити техніко-експлуатаційні показники роботи кар'єрного автотранспорту і забезпечити обґрунтоване їх планування.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Науковим вирішенням завдань щодо запропонованих в статті питань займалися багато вчених: А.А. Кулешов, Ю.А. Монастирський, В.В. Кривда, Е.В. Горшков, П.В. Артмане, В.П. Смирнов, М.В. Дадонов, А.Ф. Клебанов, А.В. Буянкін, І.А. Луйк, І.В. Кузнецов і багато інших фахівців. У роботах цих авторів вирішуються питання підвищення ефективності експлуатації великовантажного автотранспорту, розробки і вдосконалення методів проведення ТО і ремонту кар'єрних автосамоскидів з урахуванням капіталомісткості цих процесів. Однак аналіз перерахованих робіт показав, що до теперішнього часу немає економічно обґрунтованих рекомендацій по методиці організації допоміжних робіт кар'єрного автотранспорту, які враховують гірничотехнічні умови експлуатації і типаж рухомого складу, що застосовується при транспортуванні гірської маси.

**Постановка завдання.** Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні завдання:

виявлення пріоритетних напрямків підвищення рівня якості експлуатації парку кар'єрних автосамоскидів і перевірка ефективності їх реалізації у виробничих умовах на гірничодобувних підприємствах Кривбасу;

обґрунтування номенклатури показників якості експлуатації кар'єрних автосамоскидів, які враховують специфіку їх роботи в залежності від гірничотехнічних умов;

розробка методики науково-обґрунтованого планування і прогнозування основних техніко-експлуатаційних показників роботи кар'єрних автосамоскидів в умовах ведення відкритих гірничих робіт на рудниках Кривбасу.

**Викладення матеріалу та результати.** Максимальна ефективність при перевезенні гірської маси автомобілями-самоскидами з глибоких горизонтів кар'єрів може бути досягнута за рахунок раціональної організації основних (навантаження, транспортування, розвантаження) і допоміжних операцій.

Проектуванню режимів експлуатації автомобілів-самоскидів повинна передувати розробка різних варіантів організації допоміжних робіт з урахуванням конкретних гірничотехнічних умов. Варіанти організації допоміжних робіт повинні передбачати скорочення нульового пробігу автомобілів, усунення непродуктивних витрат праці на щозмінне технічне обслуговування,

заправку пально-мастильними матеріалами, заміну автошин і презмінок водіїв автомобілів-самоскидів.

Найважливішим елементом розробки раціональної організації допоміжних робіт є створення спеціального внутрішньокар'єрного пункту. Внутрішньокар'єрні пункти для великовантажних автомобілів-самоскидів в зоні кар'єру призначені для заправки пально-мастильними матеріалами, щозмінного технічного обслуговування, деяких видів ремонту, заміни автошин, прийому і здачі зміни водіїв.

Залежно від призначення і обсягу виконуваних робіт внутрішньокар'єрним пункти можуть бути відкритими або в виробничому корпусі, а в залежності від кількості автомобілів-самоскидів можуть бути одно- і багатопостовими.

На глибоких горизонтах кар'єрів одним з найбільш обмежених технологічних умов є ширина робочих майданчиків. Мінімальна ширина площадки для пристрою багатопостового внутрішньокар'єрного пункту визначається габаритними розмірами автомобілів-самоскидів і схемою їх розміщення (рис. 1) і розраховується за формулою

$$B_{\min} = \frac{B_a \cdot K_p}{K_{np}}, \quad (1)$$

де  $B_a$  - габаритна ширина автомобіля, м;  $K_p$  - коефіцієнт, що враховує число рядів розміщення автомобілів-самоскидів і схему їх розміщення на майданчику;  $K_{np}$  - коефіцієнт приведення, що враховує проїзди і захисну зону, рівний  $0,3 \div 0,4$ .

Мінімальна ширина майданчика для створення внутрішньокар'єрного пункту з урахуванням схеми розстановки і типу автомобілів-самоскидів приведена в табл. 1.

Таблиця 1

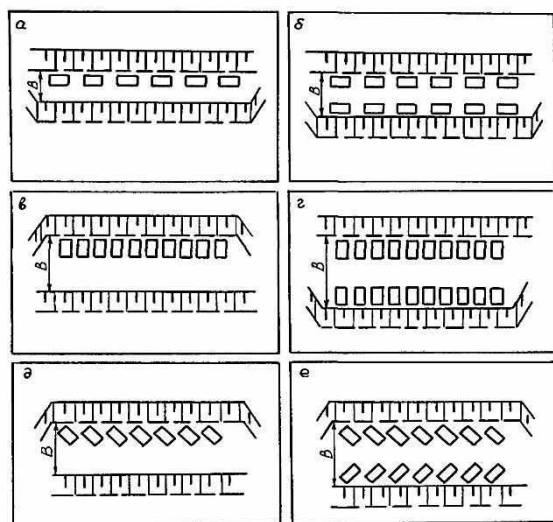


Рис. 1. Схеми розміщення автомобілів-самоскидів на майданчику для презміни водіїв: а, б – поздовжня одно- і дворядна; в, г – поперечна одно- і дворядна; д, е – діагональна одно- і дворядна

Мінімальна ширина площадки для внутрішньокар'єрного пункту

| Розстановка автомобілів-самоскидів | Коефіцієнт розстановки, $K_p$ | Вантажопідйомність автомобіля-самоскида, т |      |      |      |
|------------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------|------|------|------|
|                                    |                               | 75                                         | 110  | 130  | 180  |
| Поздовжня однарядна                | 1,0                           | 14,8                                       | 17,4 | 18,5 | 21,8 |
| Поздовжня дворядна                 | 1,25                          | 18,6                                       | 21,8 | 22,9 | 27,3 |
| Поперечна однарядна                | 2,0                           | 29,6                                       | 34,9 | 36,6 | 43,6 |
| Поперечна дворядна                 | 2,5                           | 37,0                                       | 43,6 | 45,7 | 54,6 |
| Діагональна однарядна              | 1,9                           | 28,0                                       | 33,1 | 34,7 | 41,5 |
| Діагональна дворядна               | 2,25                          | 33,3                                       | 39,2 | 41,4 | 49,1 |

Необхідна площа для внутрішньокар'єрного пункту визначається за виразом

$$F_{в.п} = N_M \cdot f_a + N_{об} \cdot f_{об} + f_n, \quad (2)$$

де  $N_M$  - кількість машино-місць, які влаштовуються на внутрішньокар'єрному пункті;  $f_a$  - площа в плані на один автомобіль-самоскид,  $m^2$ ;  $N_{об}$  - кількість технологічного обладнання, що розміщено на внутрішньокар'єрному пункті;  $f_{об}$  - середня площа на одиницю технологічного обладнання,  $m^2$ ;  $f_n$  - площа, відведена під проїзди, маневрування і захисну зону, визначається з виразу

$$f_n = \frac{N_M \cdot f_a}{K_{np}}. \quad (3)$$

На внутрішньокар'єрному пункті розміщення заправного устаткування виконується відповідно до розроблених схем, які представлені на рис. 2. Для захисту від розльоту окремих шматків підірваної породи це обладнання необхідно заглиблювати в ґрунт, обваловувати піском або перекривати захисною металевою сіткою.

Необхідна довжина внутрішньокар'єрного пункту визначається за формулою

$$L_{B.П} = \frac{F_{B.П}}{B_{\min}} \quad (4)$$

Будівництво внутрішньокар'єрного пункту обумовлює виконання додаткових робіт з розкриття, обсяги яких визначаються за формулою

$$\Delta Q_B = B_{\min} \cdot L_{B.П} \cdot K_{y\partial} \cdot h_y \cdot n_y, \quad (5)$$

де  $K_{y\partial} = L_{y\partial} / L_{B.П}$  - коефіцієнт удлиннения, учитывающий увеличение длины площадки, вызванной уширением рабочей площадки при подборе уступа экскаватором;  $K_{y\partial}$  - коефіцієнт подовження, що враховує збільшення довжини майданчика, викликаного розширенням робочої площадки при підборі уступу экскаватором;  $h_y$  - висота уступу;  $n_y$  - кількість вище розташованих уступів.

Розроблена конструкція однопостового внутрішньокар'єрного пункту, на якому можливе виконання до 26-30% обсягу робіт з технічного обслуговування автомобілів-самоскидів, представлена на рис. 3. Так як габаритні розміри однопостового пункту становлять  $15 \times 12,5$  м, то його розміщення на глибоких горизонтах зумовить мінімум додаткових обсягів розкриття.

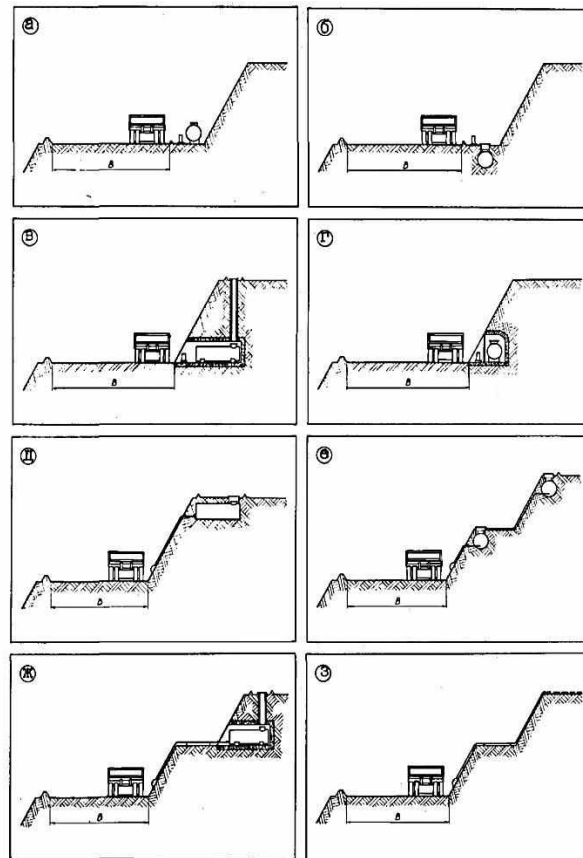


Рис. 2. Схеми розташування обладнання для заправки паливом автомобілів-самоскидів на внутрішньокар'єрному пункті: а, б, в, г – з примусовою роздачею палива; д, е, ж, з – з самопливною роздачею палива

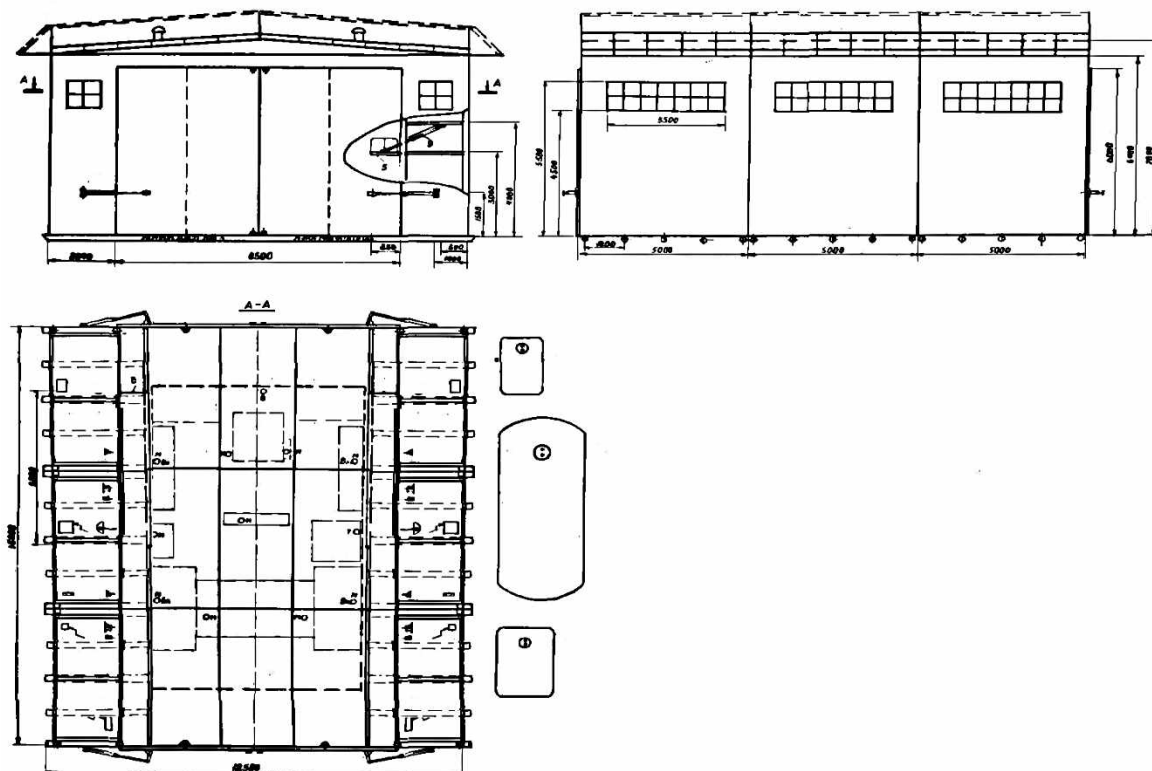


Рис. 3. Загальний вигляд і планування однопостового внутрішньокар'єрного пункту

При доопрацюванні кар'єра, а також в умовах відсутності на глибоких горизонтах майданчиків необхідних розмірів, розроблений внутрішньокар'єрний пункт, який може розміщуватися в борту кар'єра. Конструкція цього пункту представлена на рис. 4. Цей спосіб розміщення внутрішньокар'єрного пункту дозволяє звести до мінімуму додаткові обсяги розкривних робіт

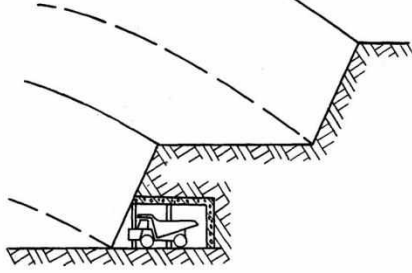


Рис. 4. Однопостовий пункт у борті кар'єра

При великих просторових розмірах кар'єра витягнутої форми доцільно влаштовувати два внутрішньокар'єрних пункти поруч з протилежними виїзними траншеями. Розроблені конструкції внутрішньокар'єрних пунктів дозволяють у міру розвитку гірничих робіт здійснювати їх перенесення на нижче розташовані горизонти протягом 15-20 днів.

Виконані дослідження організації експлуатації автомобілів-самоскидів в умовах глибоких кар'єрів дозволяють порівняти результати реальної системи і імітаційної моделі, які представлені на рис. 5 у вигляді залежності зміни коефіцієнта використання календарного часу автотранспорту від глибини кар'єра.

Особливістю встановленої залежності є взаємозв'язок тривалості перебування автомобілів в роботі з тривалістю перебування в обслуговуванні, ремонті і простоях з організаційних причин. Так скорочення нульових пробігів при створенні внутрішньокар'єрного пункту для допоміжних робіт викликає збільшення часу перебування автомобілів-самоскидів в роботі, однак, дещо менше (графік 2, рис. 5), ніж отримано за імітаційної моделі (графік 3). Так як тривалість перебування автомобілів-самоскидів в різних станах збалансована в часі, то збільшення часу їх в роботі викличе відповідне збільшення часу перебування їх в технічному обслуговуванні і поточному ремонті. Тому реальні резерви використання в часі автотранспорту відповідно до імітаційної моделі будуть менше теоретично можливих показників на величину різниці між графіками 3 і 2.

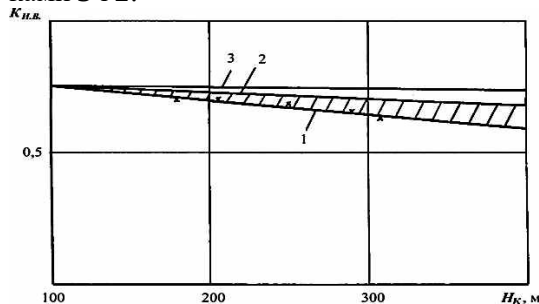


Рис. 5. Залежність зміни коефіцієнта використання календарного фонду часу автомобілів-самоскидів  $K_{к.в}$  від глибини кар'єра  $H_{к, м}$ : 1 – фактична робота автотранспорту з організацією допоміжних робіт у автотранспортному цеху; 2 – фактична робота автотранспорту з організацією допоміжних робіт на внутрішньокар'єрному пункті; 3 – за результатами імітаційної моделі з організацією допоміжних робіт на внутрішньокар'єрному пункті

Порівняння результатів імітаційної моделі і реальної системи показують, що розбіжність становить 2,5%.

Встановлені залежності режимів експлуатації автомобілів-самоскидів від глибини кар'єра, а також виявлені потенційні резерви автомобільного транспорту дозволяють стверджувати, що використання на нижніх горизонтах розробленого внутрішньокар'єрного пункту для виконання допоміжних операцій дозволяє підвищити річну продуктивність автомобілів-самоскидів на 13-15%.

**Висновки і напрямки подальших досліджень.** Забезпечення раціонального змінного режиму експлуатації автомобілів-самоскидів вимагає організаційних умов, при яких скорочуються до мінімуму втрати робочого часу на виконання допоміжних операцій, деякої частини робіт технічного обслуговування, ремонту і перезміни водіїв. Це досягається створенням на нижніх горизонтах кар'єра спеціального внутрішньокар'єрного пункту.

Моделювання експлуатації автотранспорту за вихідними даними Північного ГЗК як систем масового обслуговування і оптимізації багатопараметричних систем методом найшвидшого спуску показує, що найкращим варіантом організації експлуатації автомобілів-самоскидів в умовах глибоких кар'єрів є організація з використанням внутрішньокар'єрного пункту для виконання допоміжних операцій. При наявності такого внутрішньокар'єрного пункту сумарні питомі приведені витрати на одне обслуговування знижуються на 4,4%.

Реалізація кращого варіанту організації експлуатації автотранспорту в умовах Північного ГЗК дозволила зменшити в 1,2 рази загальне число постів ТО і ТР і збільшити коефіцієнт використання календарного фонду часу на 14-17%. Це дозволило підвищити на 13-15% річну продуктивність автотранспорту та знизити собівартість 1 ткм на 10-12%.

## Список літератури

1. Монастырский Ю.А. Современное состояние технологического автотранспорта железорудных карьеров / Ю.А. Монастырский, А.С. Вивчарык, И.В. Бондарь, Т.А. Климов // Новітні шляхи створення, технічної експлуатації, ремонту і сервісу автомобілів: всеукраїнської наук.-практ. конф., 8-11 вер. 2015 р.: збірник тез доповідей. – Одеса, 2015. – С. 165-166.
2. Вуейкова О.Н. Исследование параметров влияния на производительность карьерного автотранспорта на примере Сарбайского карьера АО «ССГПО» / О.Н. Вуейкова // Алдамжаровские чтения – 2010: сб. докладов междунар. научно-практ. конференции. – Костанай, 2010. – С. 48–56
3. Ларин О.Н. Оценка влияния горнотехнических факторов на эксплуатационные параметры карьерных автосамосвалов / О.Н. Ларин, О.Н. Вуейкова // Транспорт: наука, техника, управление. – 2011. – №7. – С. 34–36.
4. Лель Ю. И. Методы расчета параметров устойчивой работы автотранспорта глубоких карьеров: дис. д-ра техн. наук / Ю. И. Лель; УГГГА. Екатеринбург, 1999. – 292 с.
5. Артамонов П.В. Расчет напряженно-деформированного состояния элементов несущих металлоконструкций, карьерных автосамосвалов в среде T-FLEX. / Артамонов-П.В. // Вестник КузГТУ.-Кемерово, 2010,- №4-С. 15-18.
6. Довженко А. С. Повышение эффективности карьерного автомобильного транспорта совершенствованием параметров его подсистем с использованием энергетического критерия: автореф. дис. . канд. техн. наук / А. С. Довженко; СПГИ(ТУ). СПб, 1992. – 20 с.
7. Стенин Ю. В. Обоснование производительности технологического автомобильного транспорта железорудных карьеров: дис. канд. техн. наук / Ю. В. Стенин; ИГД МЧМ СССР. Свердловск, 1983. – 228 с.
8. Вуейкова О.Н. Анализ технико-эксплуатационных факторов работы карьерных самосвалов АО «ССГПО» / О.Н. Вуейкова // Алдамжаровские чтения – 2010: сб. докладов междунар. научно-практ. конференции. – Костанай, 2010. – С. 43–48..
9. Бахтурин Ю. А. Вопросы адаптации генеза транспортных систем карьеров / Ю. А. Бахтурин // Геотехнологические проблемы комплексного освоения недр. Екатеринбург, 2004. – С. 378 - 388. – (Сб. науч. тр./ИГД УрО РАН. - Вып. 2(92).
10. Вуейкова О.Н. Исследование функциональных зависимости эксплуатационных параметров карьерных самосвалов от горнотехнических факторов / О.Н. Вуейкова // Проблемы и перспективы развития Евразийских стран: сб. докладов трет. междунар. научно-практ. конференции. – Челябинск, 2011. – С. 55–61.
11. Егоров А. Н. Силовые агрегаты карьерных автосамосвалов / А. Н. Егоров, В. Т. Войтов // Горный журнал. 2004. - Специальный выпуск к № 8. - С. 75 - 77.
12. Осипов О.В. Оптимизация программно-целевого планирования перевозок большегрузными карьерными автосамосвалами: диссертация кандидата технических наук / О.В. Осипов // – Оренбург: 2009. – 161 с.
13. Горшков Э. В. Обоснование рациональных параметров технологического автотранспорта при повышенных уклонах карьерных автодорог: дис. канд. техн. наук / Э. В. Горшков; ИГД МЧМ СССР. -Свердловск, 1984. 178 с.
14. Ларин О.Н. Вопросы повышения эффективности работы карьерного автотранспорта/ О.Н. Ларин, О.Н. Вуейкова // Вестник ОГУ. – 2011. – №10 (129). – С. 20–25.
15. Потапов М.Г. Направления развития карьерного транспорта, Горная промышленность,- 2002. - №6[Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.mining-media.ru/ru/article/transport/1644-napravleniya-razvitiya-karernogo-transporta>.
16. I. N. Varakin. Application of ultracapacitors as traction energy sources / I. N. Varakin et al // Thesis of 7th International Seminar on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 8-10, 1997. Florida: Deerfield Beach, 1997.-P. 87-91.
17. Спиваковский А. О. Транспортные машины и комплексы открытых горных работ / А. О. Спиваковский, М. Г. Потапов // М.: Недра, 2003. -383 с.
18. Wayne K. Schroeder. Energy regeneration for surface-mine haulage trucks / K. Schroeder Wayne // Mining Magazine. 1993. - Vol. 148. - №6. - P. 456 -463.
19. Монастырский Ю. А. Оптимизация параметров экскаваторно-автомобильных комплексов для стесненных условий глубоких карьеров / Ю. А. Монастырский, А. В. Веснин, В. А. Систук // Проблемы и пути эффективной отработки алмазоносных месторождений: междунар. науч.- практ. конф., 11-15 апр. 2011 г.: сб. тезисов докл. – Мирный, 2011. – С. 56
20. Зырянов Н.В. Методика определения влияния условий эксплуатации на долговечность конструкций карьерных автосамосвалов /Зырянов Н.В.// Цветная металлургия. - 1994. - № 4-5. - С. 22 - 23.
21. Андреева Л. И. К вопросу о повышении эффективности ремонтной службы горнодобывающего предприятия / Л.И. Андреева, В.Ю. Мартынов, Ю.Ю. Ушаков // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XIV междунар. науч.-техн. конф. «Чтения памяти В.Р. Кубачека»/УГТУ.– Екатеринбург, 2016.–С. 427-434.
22. Kuo Y. Highway earthwork and pavement production rates for construction time estimation // Ph.D. Thesis, University of Texas, USA. – 2004.
23. Крейсман Е.А. Аналіз гірничо-технічних умов експлуатації та режимів руху великовантажних самоскидів Криворізького регіону / Крейсман Е.А., Монастирський Ю.А., Веснін А.В., Гальченко А.В. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Науково-виробничий збірник / АДІ ДонНТУ. –2012. – № 1(14). – С. 115-119.
24. Дриженко А.Ю. Карьерные технологические горнотранспортные системы: моногр. / А.Ю. Дриженко.// – Д.: НГУ, 2011. – 542 с

O. SLIPYCH, cand. of Tech. Sci., doc., LLC "Industrial Construction Group",  
 K. ROMANENKO, cand. of Tech. Sci., doc., D. KRAVTSOVA, cand. of Phys. and Math. Sci.,  
 O. BONDAR, cand. of Tech. Sci., doc., Kryvyi Rih National University

## INSTALLATION OF A STATIONARY HYDRAULIC HAMMER AT A HEIGHT

**Purpose.** The article presents a non-standard project for the installation of heavy dynamic equipment at a height - stationary hydraulic hammer.

**Research method.** It has been illuminated the result of visual and instrumental flaw detection performed by special tools of non-destructive testing and laboratory tests and measurements of constructive elements of a building in which it is necessary to install the hammer. The calculations are made in the software complex "LIRA CAD 2013", which implements the finite element method in displacements.

**Scientific novelty.** It has been demonstrated the loads calculation on the foundation of the hammer and the plan for its installation at mark of 13,640 meters. It has been analyzed current methods and recent studies of beam reinforcement.

**Practical value.** After analyzing current methods and recent studies of beam reinforcement, the authors conclude that reinforcement of beams with metal clamps is the most appropriate in this case. First of all, metal can withstand dynamic loads; it does not crumble under tensile forces. Secondly, economic indicators have played a significant role in the selection of the material: the reinforcement project was ordered in the region of iron ore and steel production, so the cost of metal is much lower than the cost of carbon-fiber tapes.

**Results.** Necessity has been substantiated: (I) strengthening reinforced concrete beams MB52-1 at the mark +13,640 in the axes 4-6 and E-F; (II) installation of steel beams under the foundation of the hammer; (III) installation of shields of the fixed formwork of the hammer foundation. Some recommendations were given.

**Key words:** install at the height, strengthening reinforced concrete beams, dynamic load, stationary hydraulic hammer.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-64-70

**Problem and its connection with scientific and practical tasks.** At modern mining enterprises there is a need for additional crushing of large debris of a rock near a crusher when they get stuck in a hopper. For this, stationary hydraulic hammers are used. Its installation at the plant requires careful calculation of the supporting structure due to the large weight of the hammer and its foundation and the presence of dynamic loads. Especially non-standard task is to install it at the height at the operating enterprise.

The purpose of the work is the project of installing a stationary hydraulic hammer ALTA GR-158 at a mark of +13,640 in the building of the large crushing corps of the mining processing plant in the Poltava region of Ukraine. The free space in the building is the unused mounting cavity between the crushers' hoppers. This building is not designed for such equipment. The tasks are: checking existing structures, calculating loads and designing the installation of heavy dynamic equipment at a height that meets the requirements [1-7].

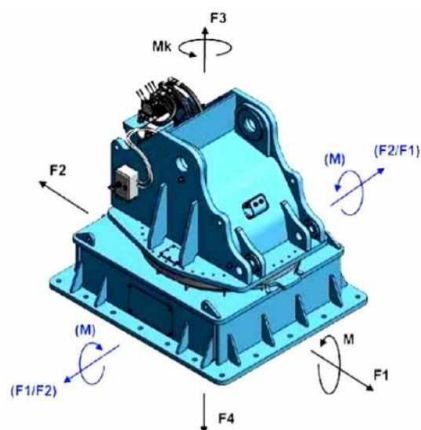


Fig. 1. Scheme of load on the foundation of the hammer GR-158

**Methodology and problem statement.** The level of the clean surface of the first floor of the building is taken as a mark of 0.000. The building of large crushing corps is a building with a developed underground part with a mark -17,800 to +13,640. The load-bearing elements of the building are reinforced concrete well with monolithic reinforced concrete ceilings, crusher foundations and hoppers. From the mark +13,640 to +38,250 the building is a steel frame enclosed with profiled sheets.

We carried out the construction inspection by methods of computational and analytical diagnostics, which use data from visual and instrumental flaw detection performed by special tools of non-destructive testing and laboratory tests. They allowed determining the physical and mechanical properties of construction materials with a sufficient precision and with-

out destruction. List of works performed during inspection: detection and fixation of visible defects and damage; determination of parameters of the environment of operation; creating a description, sketches and photographs of defective areas; drawing up of schemes and information of defects and

damages; detection of characteristic deformations of buildings (deflections, rolls, bends, distortions, faults, etc.) and emergency areas. In addition, verticality and parallelism of load-bearing elements were checked. In reinforced concrete structures we identified signs of corrosion of reinforcement and embedded parts, the condition of the protective layer, the presence and measurement of cracks.

The main elements that will be considered additional loads are monolithic reinforced concrete beams MB52-1 intersection of 500×1500 mm and monolithic reinforced concrete bunker walls MBSS-1 in the thickness of 1000 mm. At the time of construction inspection, the general state of ceiling at +13.640 in the axes 4-6 and D-G of the building is stable. The state of construction and assemblies, their connections are without changing the geometric characteristics of the constructive scheme. According to the requirements [8], the inspected building structures of the ceiling on the mark +13,640 in axes 4-6 and D-G can be classified as satisfactory. The constructions are in a state of effective condition. Damage and defects affecting the load-bearing capacity are absent.

In most cases, hydraulic hammers are equipment for hydraulic excavators. The principle of operation is the same as a hand-held jackhammer, but the impact energy is more than a thousand times. Most often they are used for loosening of frozen soil, destruction of pavements, crushing of oversized rocks, concrete structures, etc. In crushing factories, the hydraulic hammers are installed stationary above the level of the crushers, but, firstly, these are isolated cases, and secondly, the installation requires individual design.

Table 1

The load on the ceiling at the mark +13,640

| Load type                                                                          | Normative load  | Load reliability coefficient $\gamma_f$ | Dynamic coefficient $\varepsilon$ | Calculated load |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| Situation 1 (active rolling stock and inactive hammer)                             |                 |                                         |                                   |                 |
| Temporary on the railway, kN/r.m.                                                  | 140             | 1,3                                     | 1,1                               | 200             |
| Temporary on removable shields and free areas of concrete floor, kN/m <sup>2</sup> | 4               | 1,2                                     |                                   | 4,8             |
| Static from the hammer, kN                                                         | 280             | 1,2                                     |                                   | 340             |
| Situation 2 (inactive rolling stock and active hammer)                             |                 |                                         |                                   |                 |
| Temporary on removable shields and reinforced concrete ceilings, kN/m <sup>2</sup> | 4               | 1,2                                     |                                   | 4,8             |
| Static from the hammer, kN                                                         | 264             | 1,2                                     |                                   | 317             |
| Temporary from the hammer (F1-F4, M, Mk), kN, kN·m                                 | Fig. 1, table 2 |                                         | 2,5                               |                 |

Table 2

Normative load on the foundation of the hammer GR-158 (F1-Mk - dynamic load, G - static load)

| GR 158 (fig. 1) | F1<br>kN | F2<br>kN | F3<br>kN | F4<br>kN | M<br>kN·m | Mk<br>kN·m | G<br>kN |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|-----------|------------|---------|
| Max F1          | 345      |          | 149      |          | -424      | 158        | 250     |
| Max F2          |          | 1189     |          | 92       | 1307      | 158        | 250     |
| Max F3          | 120      |          | 456      |          | -438      | 158        | 250     |
| Max F4          |          | 261      |          | 1130     | 1260      | 158        | 250     |
| Max M           |          | 1017     |          |          | 1625      | 158        | 250     |
| Max -M          | 283      |          |          |          | -548      | 158        | 250     |

A base hammer plate with bolts (2145 kg) is supplied by the manufacturer of hammer ALTA GR-158 (28000 kg).

We took into account the results of diagnostics, hammer characteristics and calculated the MB52-1 beam at the +13,640 mark on the 4-6 and F-E axes, which will handle additional loads. The purpose of the calculations was to determine the stress-strain state of beams from constant and temporary loads, the nature of the distribution of internal forces, the zones of concentration of the greatest stresses. The calculations are made in the software complex "LIRA CAD 2013", which implements the finite element method in displacements. As results table 1 and table 2 show the load on the ceiling on the mark +13,640 without specifying the weight of the structures. It shows that monolithic reinforced concrete beams MB52-1 will not withstand the additional load from the hammer at the mark +13,640 in the axes 4-6 and E-F because the load-bearing capacity of the beams in transverse force is exhausted. In view of all this, to install the stationary hydraulic hammer GR-158 at +13.640, reinforced concrete beams MB52-1 must be strengthened. In addition, installation of shields of the fixed formwork of the hammer foundation is need.

However, in previous works, stationary loads were applied to the experimental beams. Dynamic loads are applied in our task and paper [14]. Authors [14] were described that the building was subjected to unidirectional and three-dimensional incremental seismic excitations and dual CFRP/PTMS (Post-Tensioned Metal Straps) retrofitting of columns and joints were effective at restoring the lateral stiffness of the building by 75%.

**Main statement and results.** After analyzing current methods and recent studies of beam reinforcement, the authors conclude that reinforcement of beams with metal clamps is the most appropriate in this case. First of all, metal can withstand dynamic loads; it does not crumble under tensile forces. Secondly, economic indicators have played a significant role in the selection of the material: the reinforcement project was ordered in the region of iron ore and steel production, so the cost of metal is much lower than the cost of carbon-fiber tapes.

Figure 10.10 is a plan view of the bridge deck showing the layout of the mounting cavity and foundation beams. The diagram includes dimensions for the mounting cavity (2250 x 2250), foundation beams (600 x 1000), and struts. It also shows the location of the crushers' axis and the railway track axis. The plan view is divided into sections G, F, E, and D, and 4, 5, and 6.

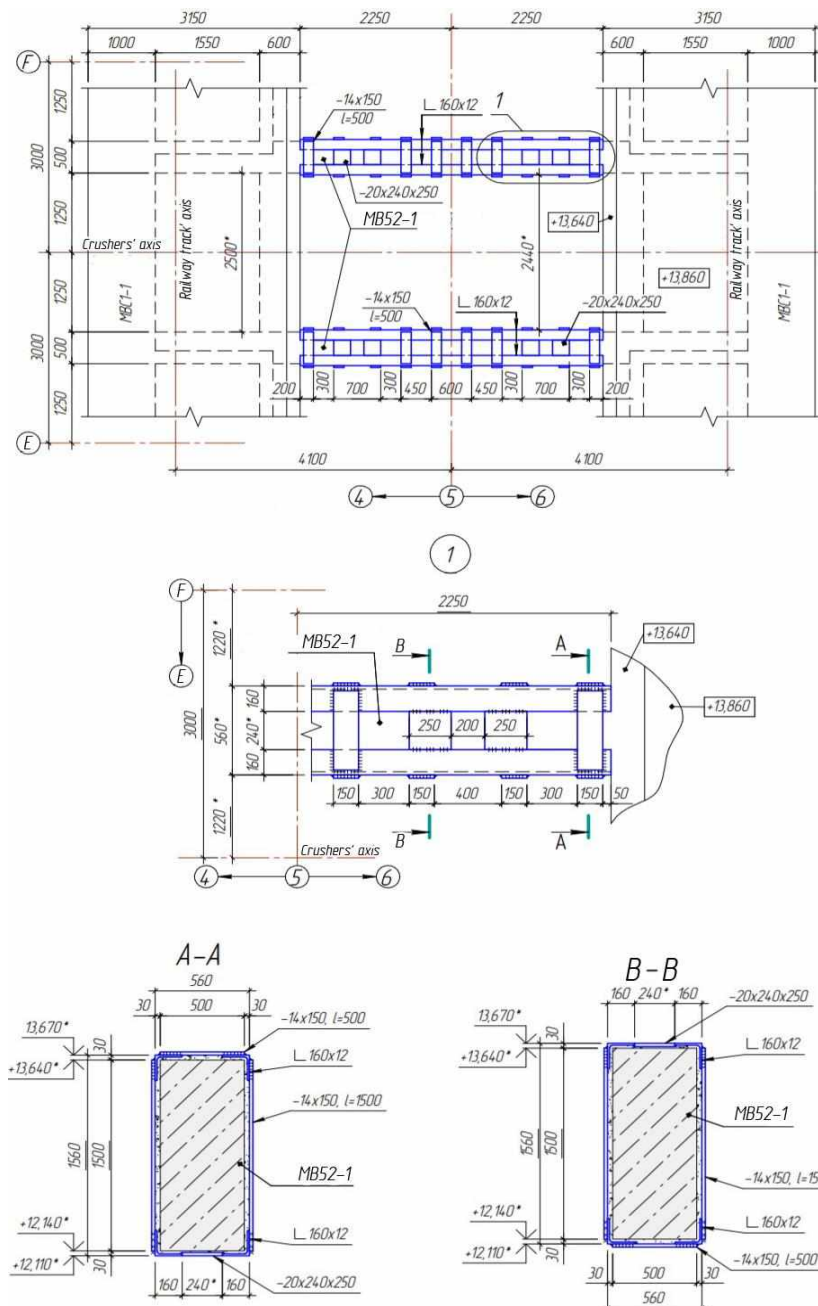
Вісник Криворізького національного університету, вип. 52, 2021

**Fig. 3.** Cross section 1-1 of fig. 2. The scheme of placement of strengthening elements, beams and shields of the formwork of the foundation of the hammer GR-158 at the mark +13,640

Table 3

| Rolled metal products         |                             |                   |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------|
| Metal products                | Designations in the drawing | Total weight, ton |
| Hot-rolled steel strip metal  | -150×14                     | 1.22              |
| Hot-rolled steel sheet metal  | -20×240×250                 | 2.01              |
| Hot-rolled steel corner metal | └ 160×12                    | 1.3               |

Fig. 4 shows scheme of installation of the clamps on the beams MB52-1. Different types of rolled metal products are used here (table 3). All structural elements are steel C245, which is analog E235-B (Fe360-B).



The proposed strengthening elements will withstand own weight of the hammer foundation and its dynamic load or own weight of the hammer foundation and load from the railway rolling stock. But the strengthening elements will not withstand the dynamic loads of the hammer and movement the railway rolling stock at the same time. Therefore, the entrance of railway transport to neighboring hammer railways is prohibited during the operation of the hammer.

Figs. 5-7 show the plan for the installation of the hammer with an indication of its working radius at the marks +6,450 and +13,640. In accordance with the above plan, crushers' hoppers are located in the working area of the hammer.

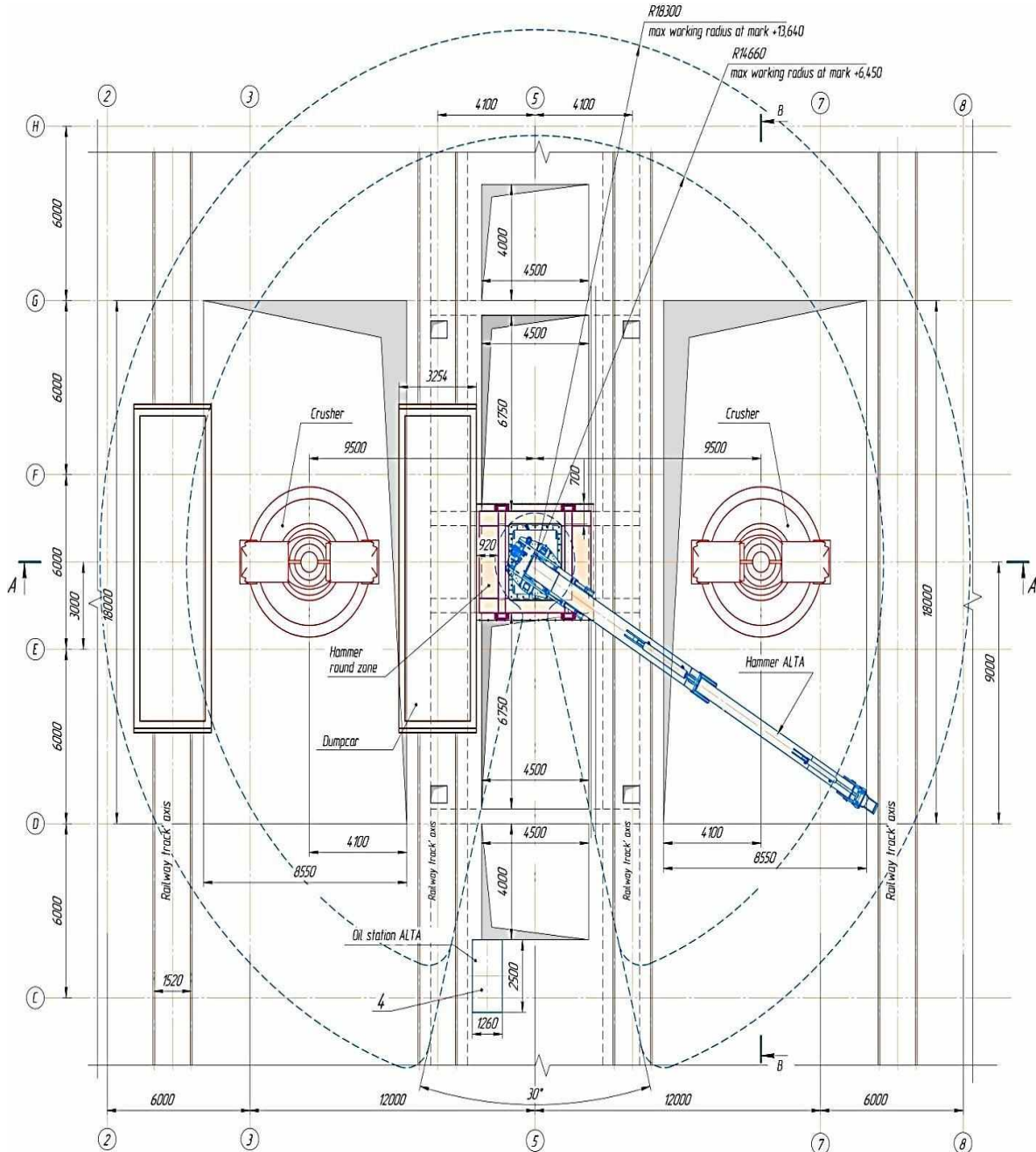


Fig. 5. The plan for the installation of the hammer GR-158 at the mark +13,640

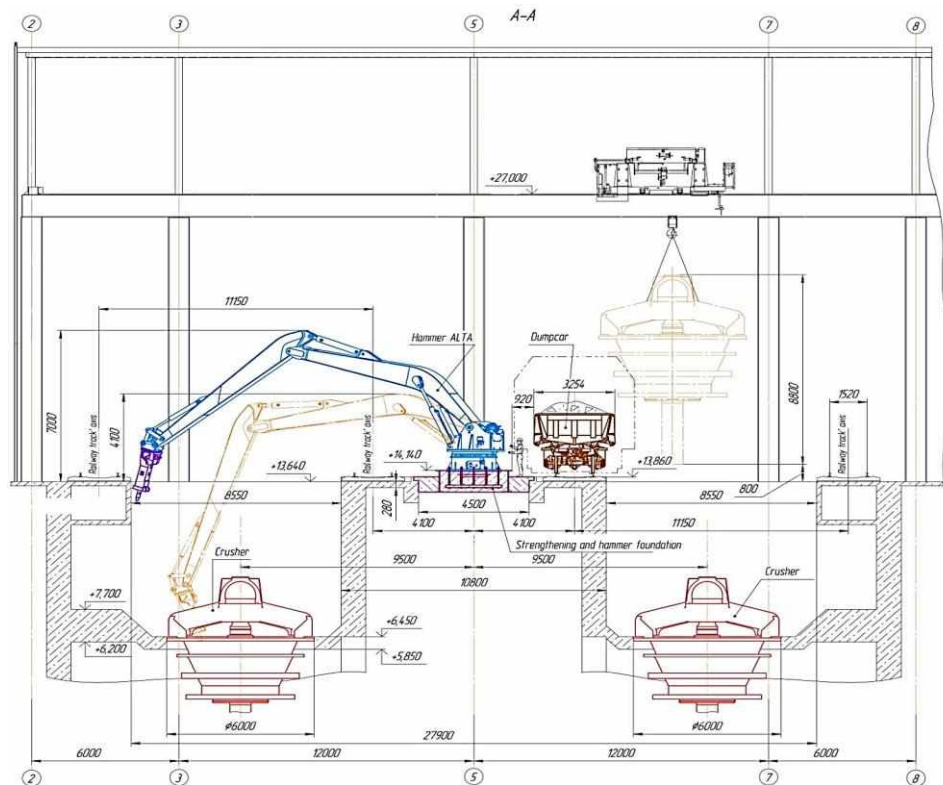


Fig. 6. The plan for the installation of the hammer GR-158 at the mark +13,640. Cross section A-A of fig. 5

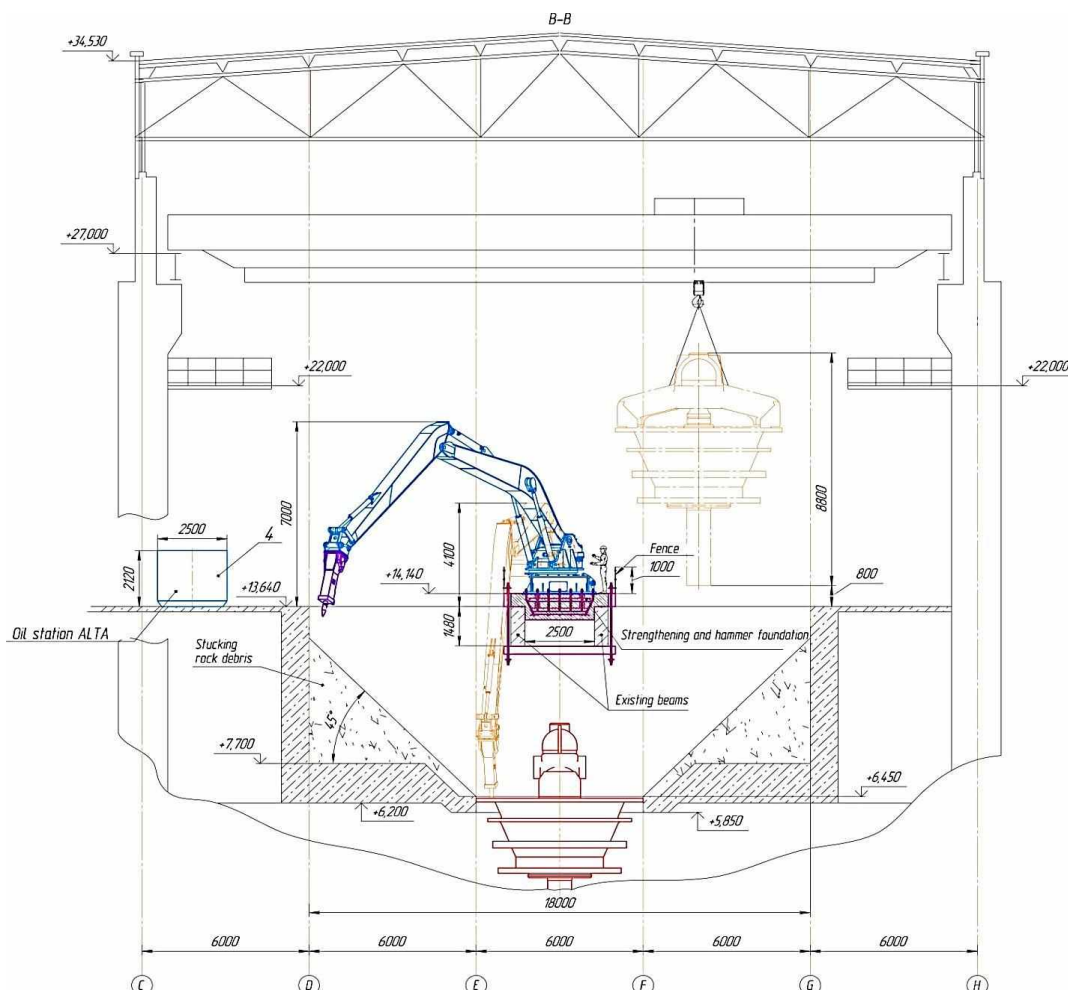


Fig. 7. The plan for the installation of the hammer GR-158 at the mark +13,640. Cross section B-B of fig. 5

**Conclusions and future work.** It was decided to install stationary hydraulic hammer ALTA GR-158 between the crushers' hoppers in the mounting cavity, which is not used during repair work, at the mark of +13,640 in the building of the large crushing corps of the mining processing plant in the Poltava region of Ukraine.

Necessity has been substantiated: (I) strengthening reinforced concrete beams MB52-1 at the mark +13,640 in the axes 4-6 and E-F; (II) installation of steel beams under the foundation of the hammer; (III) installation of shields of the fixed formwork of the hammer foundation.

The installation project, which ensures the stability of steel structures at all stages of work, must be developed in advance. After installation the entrance of railway transport to neighboring hammer railways is prohibited during the operation of the hammer.

#### References

1. **Turkstra C.J.** Theory of Structural Design Decisions, SM Studies Series No. 2. Ontario, Canada: Solid Mechanics Division, University of Waterloo. 1970.
2. Eurocode - Basis of structural design : EN 1990:2002+A1. - Brussels : Management Centre, 2002. - 116 c. - (European Standard).
3. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: EN 1992-1-1:2004.- Brussels: Management Centre, 2008. - 225 c. - (European Standard).
4. EN 1991-1-3. Eurocode 1 – Actions on structures. Part 3: Actions induced by cranes and machinery – Brussels: CEN, 2003. – 43 P.
5. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 4-1: Silos : EN 1993-4-1. – Brussels : Management Centre, 2007. – 114 c. – (European Standard).
6. **Barashikov A.Y., Malyshev O.M.** Estimation of technical condition of building structures, buildings and structures. - K.: NMC Derzhnaglyadodohoronpraci Ukrainy, 1998. - 23 p.
7. DBN V.3.1-1-2002. Repair and strengthening of bearing and enclosing building constructions and bases of industrial buildings and constructions.. State Committee on Construction and Architecture of Ukraine. Kiev. 2003 - 82 pp. - (State building codes of Ukraine).
8. **Gulvanessian H. and Holicky M.** Eurocodes: Using Reliability Analysis to Combine Action Effects. Proceedings of the Institution of Civil Engineers Structures & Buildings. August 2005, vol. 158, no. SB4, pp. 243—252.
9. **Skuturna, T., & Valivonis, J.** (2016). Experimental study on the effect of anchorage systems on RC beams strengthened using FRP. Composites Part B: Engineering, 91, 283-290. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2016.02.001>
10. **Demir, A., Ercan, E., & Demir, D. D.** (2018). Strengthening of reinforced concrete beams using external steel members. Steel and Composite Structures, 27(4), 453-464. ) DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2018.27.4.453>
11. **Helal, Y., Garcia, R., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., & Hajirasouliha, I.** (2016). Strengthening of short splices in RC beams using post-tensioned metal straps. Materials and Structures, 49(1-2), 133-147. DOI 10.1617/s11527-014-0481-6
12. **Jin, F., & Lees, J. M.** (2019). Experimental Behavior of CFRP Strap-Strengthened RC Beams Subjected to Sustained Loads. Journal of Composites for Construction, 23(3), 04019012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000936](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000936)
13. **Lee, H. Y., Jung, W. T., & Chung, W.** (2017). Flexural strengthening of reinforced concrete beams with pre-stressed near surface mounted CFRP systems. Composite Structures, 163, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.12.044>
14. **Garcia, R., Pilakoutas, K., Hajirasouliha, I., Guadagnini, M., Kyriakides, N., & Ciupala, M. A.** (2017). Seismic retrofitting of RC buildings using CFRP and post-tensioned metal straps: shake table tests. Bulletin of Earthquake Engineering, 15(8), 3321-3347. <http://dx.doi.org/10.1007/s10518-015-9800-8>
15. **Yang, S. H., Cao, S. Y., & Gu, R. N.** (2015). New technique for strengthening reinforced concrete beams with composite bonding steel plates. Steel and Composite Structures, 19(3), 735-757. <https://doi.org/10.12989/scs.2015.19.3.735>

УДК 621.311.1

І. О. СІНЧУК, С. М. БОЙКО, І. В. КАСАТКІНА, кандидати техн. наук, доценти,  
О. В. ДОЗОРЕНКО, асп., Криворізький національний університет

#### АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ВІТРОЕНЕРГЕТИКИ В УМОВАХ ЗАЛІЗОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ

**Мета.** Метою даної роботи є розробка тактики визначення вітрового потенціалу в умовах залізорудних підприємств з подальшим втіленням цього підходу до впровадження вітроенергетичних установок, як джерел автономного живлення в структурах систем електропостачання цих видів підприємств.

**Методи дослідження.** У статті для реалізації мети досліджень використовувалися методи аналізу та синтезу статистичних методів та елементи математичної статистики.

**Наукова новизна** полягає в розробці тактики визначення вітрового потенціалу в умовах залізрудних підприємств, що дозволить враховувати специфіку кожного підприємства галузі з подальшим втіленням цього підходу до впровадження вітроенергетичних установок в структурах систем електропостачання цих підприємств з реорганізацією їх структур з варіанту централізованого живлення електромереж до варіанту з розосередженою генерацією.

**Практична значимість.** Встановлені фактори, що впливають на визначення вітрового потенціалу локальної ділянки земної території залізрудного підприємства з урахуванням особливостей, що характерні для аналізованої проблеми та мають вплив на енергетичні характеристики вітроенергетичної установки як автономного джерела живлення. Модернізовано відомі методи визначення вітрового потенціалу, які інтегруються в універсальний метод оцінювання рівня енергоефективності вітроенергетичних установок згідно специфіки тих чи інших умов їх використання. Результати досліджень рекомендуються для використання при визначенні вітрового потенціалу залізрудних підприємств з метою розробки автономних джерел генерації електричної енергії.

**Результати.** Залізрудні підприємства України володіють незадіяним потенціалом вітрової енергії, що може бути задіяний для генерування електричної енергії автономними джерелами живлення у складі систем електропостачання цих підприємств. Запропонована тактика оцінювання вітрового потенціалу в умовах залізрудних підприємств України, що дозволяє визначати проєктні встановлені електричні потужності вітроустановок в умовах специфіки енергетичних комплексів і систем цих підприємств.

**Ключові слова:** електропостачання, вітроенергетичні установки, вітровий потенціал, залізрудні підприємства.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-70-77

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Біля 30 % від загальнопромислового обсягу споживання електричної енергії (ЕЕ) в Україні відноситься до підприємств гірничорудної промисловості [1]. Це значні обсяги, які дозволяють вищезгаданим підприємствам вносити значний вклад в економіку держави. Водночас, енергетичний тягар є відчутним для економіки даних видів підприємств і без прийняття відповідних заходів щодо зниження енергоємності видобутку корисних копалин, і перш за все залізної руди, підприємства галузі, як і держава в цілому втратить своє пріоритетне місце в еліті держав – лідерів на світовому ринку залізрудної сировини (ЗРС) для металургійного виробництва.

Тобто, енергетична проблема гірничовидобувних підприємств формується як загальнодержавна і потребує прийняття ефективних заходів для її рішення.

Одним із реальних спрямувань в зниженні енергоємності видобутку ЗРС є застосування автономних джерел живлення в структурах систем електропостачання цих видів підприємств. Для цього, як свідчать результати проведених досліджень [1-2], в технології їх функціонування в достатній кількості є власні енергетичні ресурси [2-4].

Як доповнення до цієї тези додамо, що в останні роки, як у світі, так і в Україні, спостерігається стійке зацікавлення проблемами використання відновлювальних джерел енергії, серед яких значна увага приділяється вітроенергетичним установкам (ВЕУ). Частка таких систем в енергобалансі всіх технічно розвинених країн світу зростає [5].

Така спрямованість обумовлена світовою ситуацією в економіці та екології [3]. Згідно останнього, то спорудження ВЕУ потребує значних обсягів земельних відчужень. І в цьому аспекті гірничорудні підприємства мають свій позитив, оскільки технологія ведення гірничих робіт передбачає складування «пустої» породи, яка знімається з поверхні землі на шляху видобутку корисних копалин. Ця порода складається в так званих відвалах.

У породних відвалах Кривбасу на період 2020 року заскладовано більше 14 млрд т розкритих порід, а площі, які вони займають, сягають більше 8 тис. га. На сьогоднішній день ні один із відвалів не рекультивовано, оскільки підприємства вважають це економічно недоцільним, адже рекультивація 1 га відвальних порід коштує 60-70 тис. доларів США. Тобто, як резюме, потрібно розуміти, що ці площі назавжди виведені з земельного обороту і не несуть перспективи їх вторинного використання для землекористування в подальшому. Тобто, по факту, це площі, які вже в своїй логіці готові для розбудови на них вітрогенеруючих систем.

Окрім цього, додатковим кінцевим моментом у цьому аспекті є і те, що висота таких відвалів сягає більше 100 м над землею поверхнею, а як відомо, збільшення енергетичного потенціалу з висотою пояснюється зростанням швидкості вітру, яка в приземному шарі змінюється за степеневим законом [4].

Разом з тим, зазначимо, що включення як вітрових так і інших видів генеруючих потужностей в структури систем електропостачання промислових підприємств створює новий тип електроенергетичних систем – системи з джерелами розосередженої генерації (ДРГ) ЕЕ [6].

Як свідчать дослідження, децентралізовані енергосистеми з використанням ДРГ є актуальними для впровадження, у тому числі, в структури електропостачання промислових підприємств і особливо їх енергоємних видів. Впровадження ДРГ дозволить зменшити втрати ЕЕ у внутрішніх електричних мережах, що сьогодні сягають майже 30 %, зменшити рівень сплати за її споживання, оскільки електрична енергія вироблена з власних ресурсів буде дешевше мінімум в 4 рази від тієї, що постачається централізовано, та, що не менш важливо, забезпечити необхідний ступінь надійності та безперебійності електропостачання.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У ряді відомих досліджень їх автори обґрунтовують необхідність оптимізації режимів роботи електричного обладнання різних типів та видів підприємств при застосуванні ДРГ, за критеріями економічності та ефективності, що, в свою чергу, передбачає формування ефективних режимів функціонування енергетичного комплексу підприємства в умовах постійного зростання навантаження електроспоживачів та збільшення реальної складової спожитої ЕЕ, згенерованої при використанні ДРГ [7-14].

У працях [7-10] запропоновано впровадження відновлюваних джерел енергії в умовах загальнопромислових підприємств. Запропоновано схему оптимізації режимів функціонування енергоємних споживачів ЕЕ. Обґрунтовано, що кожний параметр загальної оптимізації вибору режимів роботи енергетичного обладнання має різний ступінь впливу.

У працях [11-20] розглянуто та запропоновано методи визначення вітрового потенціалу з врахуванням кліматичних та метеорологічних факторів. Результати цих досліджень мають певний позитив для подальшого пошуку ефективних видів ВЕУ в структурах систем електропостачання підприємств.

Між тим, в роботах залишається не розглянутим питання методології визначення вітрового потенціалу з врахуванням специфіки технологічного процесу підприємств та їх локації.

Відзначаючи значимість для вирішення проблеми підвищення енергоефективності підприємств шляхом застосування автономних джерел живлення, зазначимо, що згідно сформованої дослідниками мети досліджень, в контексті їх робіт прослідковується певна одновекторність схеми досліджень, яка є достатньою для даного дослідницького варіанту, але не є такою для застосування в інших умовах, в тому числі для підприємств зі змінними параметрами технології ведення робіт, до яких відносяться гірничі підприємства взагалі та залізрудні зокрема. На заповнення цього пробілу в аналізованій науковій сфері і спрямоване дане дослідження.

**Постановка задачі.** Задачею даного дослідження є розробка тактики визначення вітрового потенціалу для умов залізрудних підприємств (ЗРП) з подальшим втіленням цього підходу в практику створення та функціонування ВЕУ в умовах цих видів підприємств, як автономних джерел живлення в структурах систем електропостачання з розподільчою генерацією ЕЕ.

**Виклад матеріалу та результати.** Валовий потенціал локально досліджуваної узагальненої території для розбудови ВЕУ розраховується як сумарна енергія системи вітроустановок висотою  $h$ , розподілених рівномірно по території на відстанях, що виключають взаємний вплив енергоустановок. Зазвичай вважається, що збурений вітровий потік повністю відновлюється на відстані, рівному  $20h$  від ВЕС [15-17]. Ця умова визначає місця розміщення вітроустановок на мапі території підприємств. Тоді, на території площею  $S$  ( $m^2$ ) протягом часу  $T$  (зазвичай рік), повна вітрова енергія всіх установок визначиться як

$$W_B = P \cdot T \cdot \frac{S}{20} = \frac{1}{40} \cdot \rho \cdot T \cdot S \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot t_i, \quad (1)$$

або

$$W_B = \frac{1}{40} \cdot \rho \cdot T \cdot S \cdot \int_0^\infty V^3 \cdot f(V) dV, \quad (2)$$

де  $V_i, t_i$  – градації швидкості вітру і їх відносна тривалість.

Технічний вітровий потенціал території може бути визначений з врахуванням двох обставин [15].

Перша – площа території, яка придатна по хазайських і технологічних умовах для розміщення ВЕС. Тоді площа території  $S_T$ , придатної для використання вітрової енергії, рівна  $S_T = q \cdot S$ , де  $q$  – коефіцієнт, коефіцієнт який залежить від конкретного регіону.

Фактично  $S_T$  – це частина території  $S$ , яка може бути задіяна.

При визначенні технічного вітрового потенціалу території рекомендується притримуватись певних правил:

для вітроенергетичних станцій (ВЕС) великої потужності (більше 100 кВт), що об'єднують у собі декілька ВЕУ, коефіцієнт використання встановленої потужності повинен бути не нижче 20 %;

ефективність використання вітрової енергії збільшується з ростом потужності ВЕУ (в теперішній час їх потужність сягає 4-6 МВт);

зазвичай для розміщення ВЕС може використовуватися не більше 30 % від відведеної для цього території.

Друга обставина полягає в технічному рівні сучасних ВЕУ, який характеризує генеруючу потужність в залежності від швидкості вітру. Для мережевих ВЕС зазвичай використовують вітротурбіни з горизонтальною віссю обертання на висоті мачти 50 м. Крім технічних характеристик власне електростанцій, необхідно враховувати порядок їх розміщення по умові максимального використання енергії вітру.

Потужність ВЕС  $P(V)$  з діаметром вітротурбіни  $D$  визначається за виразом

$$P(V) = \frac{\pi}{8} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot V^3 \cdot \eta(V), \quad (3)$$

де  $\eta(V)$  – коефіцієнт корисної дії установки для швидкості вітру  $V$ .

Середньостатистичне значення потужності визначається як

$$P_{\text{сеп.}} = \frac{\pi}{8} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot t_i. \quad (4)$$

На рис. 1а зображена карта вітроенергетичного потенціалу України. Як видно з рисунку Україна здатна ефективно використовувати енергію вітру в окремих зонах при середньорічній швидкості вітру понад 5 м/с. Криворізький регіон знаходиться в зоні з середньорічною швидкістю вітру близько 4-4,5 м/с. Цієї швидкості достатньо для роботи ВЕУ, але одночасно замало для ефективного використання, що свідчить про можливість впровадження в даних регіонах ВЕУ, але для більш ефективної роботи вітроустановок необхідна більша швидкість вітру [15].

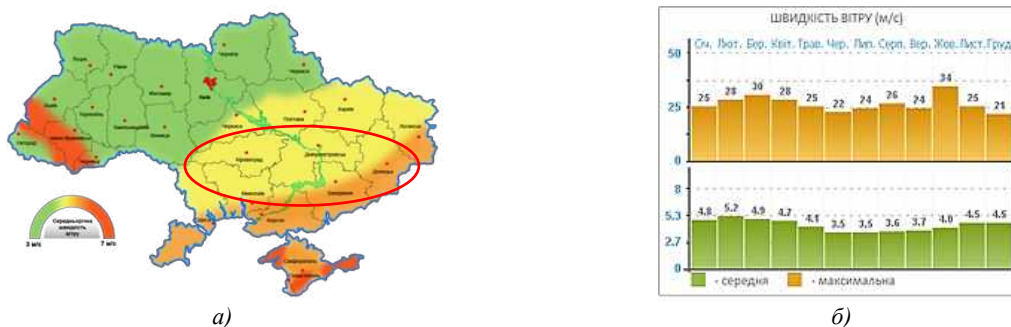


Рис. 1. Карта розподілу середньорічних вітроенергетичних ресурсів України (а) та середньомісячна швидкість вітру по метеостанції м. Кривий Ріг (б)

Тобто, зростає необхідність у виявленні найперспективніших місць використання вітрової енергії, базуючись на її кліматичному потенціалі та показниках його можливої утилізації.

Використовуючи статистичні дані було проведено аналіз середніх значення швидкості вітру по метеостанції м. Кривий Ріг (рис. 1б) [18]. Виходячи з аналізу метеоданих, можна зробити висновок, що середньорічна швидкість вітру у м. Кривий Ріг складає близько 4,25 м/с.

Дослідження аеродинамічних характеристик відвалів кар'єрів дозволило скласти наступну картину. Інтенсивність природного провітрювання кар'єрів ЗРП вітром знаходяться в залежності від швидкості вітрового потоку, що діє над кар'єром, і в зворотній від об'єму зони рециркуляції. Скорочення об'єму зони рециркуляції може бути досягнуте зменшенням кутів укосу бортів кар'єру за рахунок раціональної черговості відробітку уступів.

Раніше, в попередніх дослідженнях авторів, була розглянута можливість розташування електроенергетичної вітроустановки на відвалах кар'єрів гірничих підприємств та схема раціонального розташування горизонтальноосових БЕУ на відвалах, що дозволяє досягти збільшення коефіцієнту використання вітрового потоку при будь-якому напрямі вітру на поверхні [17].

Так як встановлення БЕС планується на відвалах ЗРП, то середньоперіодні швидкості вітру повинні бути перераховані на задану висоту відвалу ( $H$ ) за формулою

$$V_H = V_n \cdot \left(\frac{H}{h}\right)^m, \quad (5)$$

де  $m$  – показник степені, який залежить від швидкості вітру, і для Криворізького регіону розраховується як  $m=0,6(V_n)^{-0,77}$  і складає 0,2;  $V_n$  – середньоперіодна швидкість вітру на висоті Флюгера ( $h$ ).

Власне вироблення ЕЕ БЕС протягом кожного місяця і року розраховується за формулами

$$W_{BEC}^{mic} = \sum_{i=1}^k W_{BEC}(V_i) \cdot t_i(V_i) \cdot T_{mic}, \quad (6)$$

де  $T_{mic}$  – число годин в розрахунковому місяці.

$$W_{BEC}^{pik} = \sum_{i=1}^k W_{BEC}(V_i) \cdot t_i(V_i) \cdot T_{pik}, \quad (7)$$

де  $T_{pik} = 8760$  год.

Проектна висота відвалів ПАТ «Північний ГЗК» складає близько 100 м (висота відвалів інших ГЗК Криворізького регіону корегує з показниками даного комбінату). Згідно (5) швидкість вітру на відвалі складатиме, м/с

$$V_{від.} = 4,25 \cdot \left(\frac{100}{10}\right)^{0,2} = 6,75.$$

Для визначення рентабельності і окупності БЕС існує критерій, згідно якого середньорічна швидкість вітру повинна знаходитися в межах 5,1...5,9 м/с [2]. Важливою характеристикою є вертикальний профіль вітру, тобто зміни його швидкості по висоті в приземному шарі. Вплив земної поверхні на швидкість і напрям вітру зменшується у міру збільшення висоти. Тому швидкість звичайно зростає, а поривчаста і прискорення потоку знижуються.

Розрахункова швидкість вітру для великих БЕС звичайно приймається на рівні 11...15 м/с. В умовах гірничих відвалів, як наведено раніше, швидкість атмосферного повітря може сягати зазначеного діапазону та перевищувати ці показники, з залежності від швидкості атмосферних потоків повітря. Взагалі, як правило, чим більша потужність агрегату, тим на більшу швидкість вітру він розраховується. Однак у зв'язку з мінливістю швидкості вітру велику частину години БЕС виробляє меншу потужність.

Для максимального використання вітрового потоку авторами рекомендується розміщувати БЕС рядами перпендикулярними переважному напрямку вітру на відстанні  $4D$  одна від одної (рис. 2а). Зате у випадку поздовжнього вітру ( $\varphi 0 - \varphi \approx 0^\circ$ ) їх показники значно гірші. Так, втрата швидкості вітру на 20-30 % спричинить зменшення потужності БЕС на 30-40 % і більше, залежно від абсолютних значень швидкості вітру. Якщо ж напрям вітру може рівномірно змінюватися, то БЕС доцільно розміщувати в шаховому порядку між сусідніми станціями  $4D$  (рис. 2б) [19].

Тому це є дуже важливим питанням, так як остаточна величина втрат виробітку ЕЕ залежить від того, наскільки переважаючий напрям вітру відповідає розташуванню рядів БЕС.

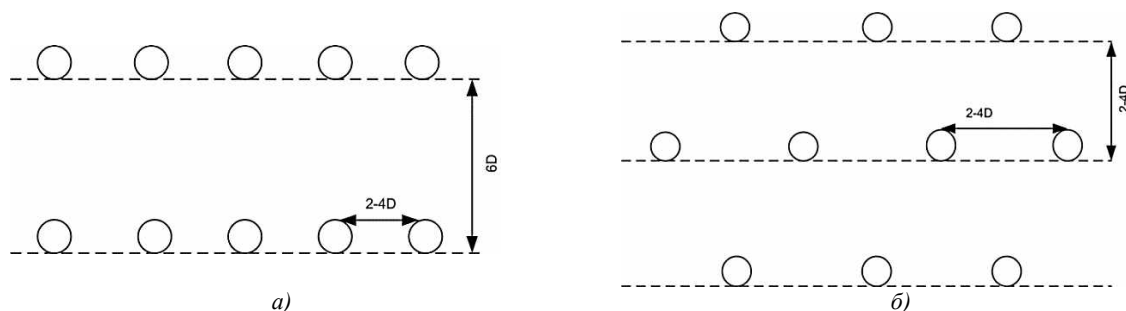


Рис. 2. Схеми розміщення БЕУ в складі БЕС на вітрополі: а – лінійна двохрядна; б – лінійна шахова рівномірна

Тоді, в першому випадку на площі  $S_T$  можна розмістити  $S_T/(20D)^2$  установок, які дозволять отримати за рік ( $T = 8760$  год.) енергію, яка рівна

$$W_T = \frac{P_{сep.}}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{(20D)^2}, \quad (8)$$

або

$$W_T = \frac{\pi}{8000} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot t_i \cdot T \cdot \frac{S_T}{(20D)^2}. \quad (9)$$

У другому випадку можна розмістити  $S_T/(100D^2)$  установок, яка забезпечать технічний потенціал енергії вітру території

$$W_T = \frac{P_{сep.}}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{100D^2}, \quad (10)$$

або з урахуванням градації вітру  $V_i$

$$W_T = \frac{\pi}{8000} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n V_i^3 \cdot \eta(V_i) \cdot t_i \cdot T \cdot \frac{S_T}{100D^2}. \quad (11)$$

Як бачимо технічний потенціал вітрової енергії не залежить від діаметру і як наслідок від одиничної потужності вітроустановок [19].

По метеостанції м. Кривий Ріг [18], напрям вітру може рівномірно змінюватися, тому рекомендовано встановлювати ВЕУ в шаховому порядку.

Так як гірничозбагачувальні комбінати дуже енергоємні підприємства, які споживають тисячі ГВт ЕЕ щорічно, зі встановленою одиничною потужністю електроприймачів близько декількох МВт, то розглядати класичний вибір потужності ВЕС в залежності від споживача не раціонально в даному випадку.

Для наглядності та більшої конкретики, розрахуємо потужність повітряного потоку на прикладі одного з відвалів ПАТ «Північний ГЗК» за формулою [2]

$$P_{II} = 0,5 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot S, \quad (12)$$

де  $\rho$  – густина повітря;  $v$  – середньорічна швидкість вітру;  $S$  – площа.

Враховуючи те, що площа одного з відвалів Північного ГЗК складає 2500 тис. м<sup>2</sup>, то робоча площа відвалу буде  $S_{роб.} = 3/4 \cdot S = 1875$  тис. м<sup>2</sup>, а з технічних міркувань так як відвал робочий, то ВЕС зможуть зайняти не більше половини цієї площі, тис. м<sup>2</sup>

$$S_{роб.} = 0,5 \cdot 1875 = 937,5.$$

Тоді потужність повітряного потоку на відвалі становитиме, ГВт

$$P_{II} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 6,75^3 \cdot 937,5 = 0,176.$$

Як інший конкретний приклад, ПАТ «Полтавський ГЗК» має два відвали: Східний та Західний. Беручи до рахунку те, що середня швидкість вітру за рік по найближче розташований метеостанції в м. Світловодськ складає 4,1 м/с, а висота східного відвалу 130 м, західного – 152 м, то за (5) можна вирахувати середню швидкість за рік на відвалах, отримаємо, м/с

$$V_{сх.} = 4,1 \cdot \left(\frac{130}{10}\right)^{0,2} = 6,848,$$

$$V_{зах.} = 4,1 \cdot \left(\frac{152}{10}\right)^{0,2} = 7,065.$$

Враховуючи те, що площа східного і західного відвалів 5200 тис. м<sup>2</sup> та 7166 тис. м<sup>2</sup>, то робоча площа відвалів становитиме, тис. м<sup>2</sup>

$$S_{роб.сх.} = \frac{3}{4} \cdot 0,5 \cdot 5200 = 1950,$$

$$S_{роб.зах.} = \frac{3}{4} \cdot 0,5 \cdot 7166 = 2687.$$

Згідно (12) потужність повітряного потоку на відвалах становитиме, ГВт

$$P_{II.сх.} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 6,848^3 \cdot 1950 = 0,383,$$

$$P_{II.зах.} = 0,5 \cdot 1,226 \cdot 7,065^3 \cdot 2687 = 0,58.$$

Виходячи з аналізу, лише вищезазначених відвалів, більша частина площі яких незадіяна, в залежності від типу та характеристик вітроустановок, можна констатувати, що тут реально встановити ВЕС потужністю близько 2,5-3 МВт.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Залізрудні підприємства України володіють незадіяним потенціалом вітрової енергії, котрий може бути задіяний для генерування електроенергії вітроенергетичними установками, як автономними джерелами живлення у складі систем електропостачання цих підприємств.

Визначення потенціалу вітрової енергії в умовах залізрудних підприємств має ряд особливостей, які визначаються з специфіки технологічного процесу та локації кожного конкретного підприємства галузі.

Запропонована тактика оцінювання вітрового потенціалу в умовах відвалів залізрудних підприємств України дозволяє визначити проектні встановлені електричні потужності вітроустановок в умовах специфіки цих підприємств.

#### Список літератури

1. Державна служба статистики України [Електронний ресурс] : [Веб-сайт]. – Електронні дані. – Режим доступу: [http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/energ/pve/arh\\_pve\\_u.htm](http://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/energ/pve/arh_pve_u.htm)
2. **Бойко С.М.** Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств. Монографія, під редакцією доктора техн. наук, професора О.М. Сінчука. – Кременчук, 2020. – 263 с.
3. Відновлювані джерела електричної енергії в структурах систем електропостачання залізрудних підприємств. (Аналіз, перспективи, проекти): Монографія / **Сінчук О.М., Сінчук І.О., Бойко С.М., Караманиць Ф. І., Ялова О.М., Пархоменко Р.О.**; Кривий Ріг: Видавництво ПП Щербатих О.В., 2017. 152 с.
4. **І. О. Сінчук**, Коментар до стану електроенергетики залізрудних підприємств як сегмента їх конкурентоспроможності. Кременчук, Україна: ПП Щербатих О. В., 2018. – 166 с.
5. **Шидловський А.К.** Геоелектроенергетика та геополітика України / **Шидловський А.К., Півняк Г.Г., Рогоза М.В., Випанасенко С.І.** Навчальний посібник. – Д.: Національний гірничий університет. 2002. – 282 с.
6. Системы электроснабжения с источниками распределенной генерации: Монография / **А.Ф. Жаркин, С.П. Денисюк, В.А. Попов**; за ред. С.Е. Ноткиной; Институт электродинамики НАН Украины. – Киев: Вид. Нова думка, 2017. – 231 с.
7. World Energy Outlook –2019, OECD/IEA, Paris.
8. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних та нетрадиційних джерел енергії України / **Кудря С.О., Яценко Л.В., Душина Г.П.** та інші. – НАН України, державний комітет України з енергозбереження. – К. : 2001. – 41 с.
9. **О. Н. Сінчук, И. О. Сінчук, Э. С. Гузов, А. Н. Ялова, и М. А. Баулина**, «Оценка потенциала и тактика повышения электроэнергоэффективности подземных железорудных производств», Технологический аудит и резервы производства, № 3/4(17), с. 34-39, 2014.
10. Площини для вітрових електростанцій. Метеорологічні дослідження характеристик вітру: ГКД 341.003.003.006:2000 – Офіц. вид. К.: Мін-во палива та енергетики України, 2001. – 30 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
11. **Попов В.А.** К вопросу рациональной интеграции источников распределенной генерации [Текст] / **В.А. Попов, Е.С. Ярмолюк, В.В. Ткаченко, С. Банузиде Сахрагард** // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України / Збірник наукових праць. – К.: Інститут електродинаміки НАН України, 2011. – Спеціальний випуск. Ч.1 – С. 111 – 121.
12. **Renne D.S.** Meteorological field measurements at potential and actual wind turbine sites / **D.S.Renne, W.F.Sandusky, D.L.Hadley**; Pacific Northwest Laboratory. – Richland, Washington, 1982.: [Electronic sources]: <http://redc.nrel.gov/wind/pubs/candidate/>
13. **Akpınar S.** Estimation of wind energy potential using finite mixture distribution models / **S.Akpınar, E.Akpınar** // Energy Conversion and Management. – 2009. – N. 50. – P. 877–884.
14. «Wind Turbine Acoustic Noise», Renewable Energy Research Laboratory, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Massachusetts at Amherst. June 2002, Amended January 2006.
15. Effects of the wind profile at night on wind turbine sound//Journal of Sound and Vibration, Received 22 January 2003; accepted 22 September 2003.
16. **Кінаш Р.І.** Вітрове навантаження і вітроенергетичні ресурси в Україні / **Р.І.Кінаш, О.М.Бурнаєв**. – Львів: Видавництво науково-технічної літератури, 1998. – 1152 с.
17. **Шевченко В.В.** Оценка технической и экологической перспективы развития энергетики Украины // Якість технологій та освіти. Збірник наукових праць, – Харьков, УИПА – 2011. – ISSN 2409-9295. Вісник НТУ «ХПІ». 2014. № 38 (1081) 145 №. 2. – С. 19–25.
18. Патент на корисну модель UA 86427 Спосіб розташування електроенергетичної вітроустановки на відвалах кар'єрів та шахт. **Сінчук О.М., Бойко С.М., Дяченко В.С., Кривоус А.О.** 25.12.2013.
19. [Електронний ресурс] Режим доступу: [https://rp5.ua/Архів\\_погоди\\_в\\_Кривому\\_Розі\\_\(аеропорт\)](https://rp5.ua/Архів_погоди_в_Кривому_Розі_(аеропорт)).
20. **Кузнєцов М. П.** Вплив розташування групи ВЕС на рівномірність їх сумісної роботи / **М. П. Кузнєцов** // Відновлювана енергетика XXI століття: XIV міжнар. конф., 16–20 вересня 2013 р.: тези доп. – АР Крим, 2013. – С. 334–339.

УДК 621.383.52

І.А. КОЗАКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., К.В. БУДНІКОВ, асп.  
Криворізький національний університет

## ПРЕДИКТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТРИФАЗНИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ

**Мета** роботи полягає у розвитку предиктивних засобів керування для трифазних інверторів напруги у складі систем автоматизованого електроприводу шляхом прогнозової оцінки змінних стану на наступному інтервалі дискретності системи.

**Методи дослідження.** У роботі використано теоретичний аналіз схеми заміщення системи «інвертор напруги – навантаження» з використанням законів електротехніки, дослідження можливих станів ключів інвертора з використанням методу комутуючих функцій, розробка дискретної прогнозуючої моделі з використанням методу Ейлера, дослідження системи предиктивного керування трифазним інвертором напруги з використанням методів математичного моделювання та аналіз показників синусоїдальності вихідного струму за допомогою методів швидкого перетворення Фур'є.

**Наукова новизна.** Доведено, що використання методів предиктивного керування трифазними інверторами напруги є раціональною альтернативою існуючим підходам на базі широтно-імпульсної модуляції, оскільки інвертор представляє собою елемент з кінцевою кількістю станів, що дозволяє здійснити прогнозування поведінки системи при застосуванні кожного з цих станів.

**Практична значимість.** Предиктивні системи керування можуть знаходити своє втілення у вигляді алгоритмічного та програмного забезпечення мікропроцесорних систем автоматизованих електроприводів.

**Результати.** Представлено аналіз схеми заміщення системи «інвертор напруги – навантаження», розроблено дискретну прогнозуючу модель, що може використовуватися в предиктивних системах керування та проаналізовано варіант функції витрат, що застосовується для оцінки відповідності кожного з варіантів подальшої поведінки системи до бажаної. Складено математичну модель системи у середовищі Matlab/Simulink, що містить предиктивний алгоритм у вигляді S-файлу.

**Ключові слова:** предиктивне керування, інвертор напруги, функція витрат, комутаційний стан, керування струмом

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-77-82

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** Трифазний дворівневий інвертор напруги є найбільш популярною схемою у складі автоматизованих частотно-керованих електроприводів [1-5]. Найчастіше в існуючих дослідженнях предиктивне керування перетворювачами електричної енергії розглядається на рівні підсистеми керування струмом.

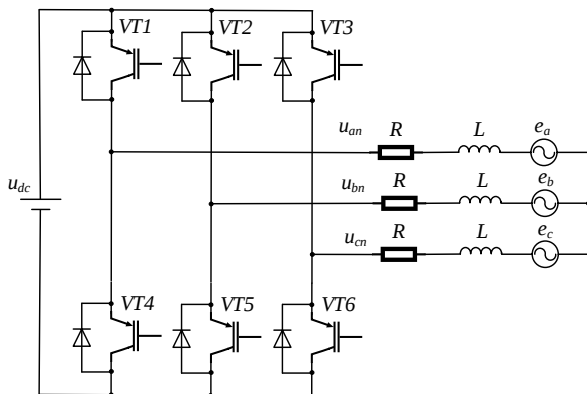
Предиктивне керування перетворювачами базується на кінцевому наборі можливих комутаційних станів силових ключів, що дає можливість з використанням моделі динамічної системи прорахувати зміну основних змінних стану для кожного варіанту включення ключів. При цьому важливим є визначення показників, за якими здійснюватиметься оцінка відповідності поведінки системи бажаній. До цих показників, перш за все, відноситься функція витрат, яка розраховується для всіх можливих варіантів включення ключів перетворювача з використанням прогнозних значень змінних стану. Прогнозування стану динамічної системи здійснюється для кожного з варіантів стану інвертора, що аналізується, а вибір комбінації включення ключів, що буде використано на наступному дискретному інтервалі, здійснюється таким чином, щоб мінімізувати функцію витрат. Отже, для синтезу системи предиктивного керування необхідно оцінити усі можливі комутаційні стани інвертора; розробити математичну модель перетворювача, на основі якої розробити алгоритми прогнозування стану системи та визначити вигляд функції витрат.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Системи керування трифазними інверторами [6-12] широко розглядаються в літературі як в контексті частотно-керованих електроприводів, так і в контексті керування мережевими інверторами джерел розосередженої генерації. У [6] розглядається перетворювач, що живиться від однієї фази та дозволяє жити трифазне навантаження. Його особливістю є відсутність конденсаторів в ланцюзі постійного струму, що, за твердженням авторів, призводить до вищої стійкості, вищого коефіцієнту потужності та меншої вартості. Однак управління ускладнюється через коливання напруги в ланцюзі постійного струму. У роботі пропонується метод управління вхідним струмом інвертора із замкнутим контуром для зменшення гармонік вхідного струму. Пропонований спосіб порівнюється із традиційним методом і експериментальні результати підтверджують його ефективність. Проте, представлені

матеріали не доводять більшу стійкість такої системи у порівнянні з існуючими. У [7] представлено активне керування відхиленням від збурень для інвертора напруги. Порівнюючи запропонований підхід та ПІ-керування доводиться, що представлений підхід має кращі характеристики, забезпечуючи стійкість системи навіть при наявності значних збурень. В той же час, у даній роботі розглядаються лише мережеві інвертори, в той час як автономні інвертори автоматизованих частотно-керованих електроприводів залишаються поза увагою.

**Постановка завдання.** Мета роботи полягає у розвитку предиктивних засобів керування для трифазних інверторів напруги у складі систем автоматизованого електроприводу шляхом прогнозування оцінки змінних стану на наступному інтервалі дискретності системи. Для досягнення поставленої мети було поставлено та розв'язано наступні задачі: проаналізувати схему заміщення системи «трифазний інвертор напруги – навантаження» та визначити основні аналітичні залежності, що описують динаміку змінних стану системи; визначити основні можливі стани інвертора та виконати розробку прогнозування моделі, що дозволяє визначити зміну вихідного струму інвертора в залежності від його комутаційного стану; розробити математичну модель системи предиктивного керування трифазним інвертором напруги та дослідити її функціонування; проаналізувати якість форми вихідного струму шляхом його спектрального аналізу.

**Викладення матеріалу та результати.** Отже, на першому етапі необхідно розглянути роботу трифазного інвертора (рис. 1) та скласти рівняння, що дозволили б виконувати прогнозування величини вихідного струму для майбутніх інтервалів дискретності системи.



**Рис. 1.** Схема заміщення системи «автономний інвертор напруги – навантаження»

Як видно зі схеми заміщення, в кожному плечі інвертора знаходиться два IGBT-ключі з антипаралельними діодами. Дані ключі (при нехтуванні «мертвим» часом, який є необхідним для безпечної їх комутації) працюють в інверсному режимі, оскільки одночасне включення обох ключів в одному плечі призведе до виникнення короткого замикання ланцюга постійного струму. Це дозволяє розглядати не шість окремих сигналів керування даними ключами, а лише три, по одному

для кожного плеча інвертора. Тоді керуючі сигнали можна сформувати таким чином

$$S_a = \begin{cases} 0, & \text{якщо } VT1 \text{ вимкнений, а } VT4 \text{ вкнений;} \\ 1, & \text{якщо } VT1 \text{ вкнений, а } VT4 \text{ вимкнений;} \end{cases} \quad (1)$$

$$S_b = \begin{cases} 0, & \text{якщо } VT2 \text{ вимкнений, а } VT5 \text{ вкнений;} \\ 1, & \text{якщо } VT2 \text{ вкнений, а } VT5 \text{ вимкнений;} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_c = \begin{cases} 0, & \text{якщо } VT3 \text{ вимкнений, а } VT6 \text{ вкнений;} \\ 1, & \text{якщо } VT3 \text{ вкнений, а } VT6 \text{ вимкнений.} \end{cases} \quad (3)$$

Умовно розділимо джерело живлення на два джерела з напругами  $u_{dc}/2$  для отримання штучної нульової точки. Тоді вихідні напруги інвертора в залежності від стану комутаційних сигналів  $S_a$ ,  $S_b$  та  $S_c$  можна записати так

$$u_{an} = u_{dc}S_a - \frac{u_{dc}}{2}; \quad (4)$$

$$u_{bn} = u_{dc}S_b - \frac{u_{dc}}{2}; \quad (5)$$

$$u_{cn} = u_{dc}S_c - \frac{u_{dc}}{2}, \quad (6)$$

де  $u_{an}$ ,  $u_{bn}$  та  $u_{cn}$  – напруги між відповідними вихідними фазами інвертора та нульовою точкою.

Використаємо теорію узагальнених векторів для отримання узагальненого вектору вихідної напруги інвертора  $u$ . При такому підході використовується оператор повороту на кут  $120^\circ$   $a = e^{\frac{2\pi}{3}j}$ . Тоді

$$u = \frac{2}{3}(u_{an} + au_{bn} + a^2u_{cn}). \quad (7)$$

Проаналізувавши можливі комбінації значень комутаційних сигналів, отримано значення векторів напруги, що відображені у табл. 1.

Таким чином, існує вісім комбінацій включення ключів інвертора, що можуть застосовуватися для створення необхідної вихідної напруги. При використанні алгоритмів широтно-імпульсної модуляції дані вектори напруги включаються на таку розраховану тривалість, щоб за період модуляції середнє значення вихідної напруги відповідало заданому. Отже, в такому випадку інвертор, нехтуючи запізненням, можна розглядати як лінійний елемент динамічної системи. При використанні предиктивного керування інвертор розглядається як дискретний елемент, що має сім різних станів, оскільки два з восьми векторів призводять до створення нульової вихідної напруги.

Розглянемо побудови прогнозуючої моделі системи. Для цього слід записати рівняння, отримані за другим законом Кірхгофа, для схеми заміщення

$$u_{an} = Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a; \quad (8)$$

$$u_{bn} = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b; \quad (9)$$

$$u_{cn} = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c, \quad (10)$$

де  $R$  – активний опір навантаження;  $L$  – індуктивність навантаження,  $e_a$ ,  $e_b$  та  $e_c$  – фазні значення протиЕРС навантаження.

По аналогії до узагальнюючого вектору вихідної напруги інвертора можна записати узагальнюючі вектори струму та протиЕРС навантаження

$$i = \frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c); \quad (11)$$

$$e = \frac{2}{3}(e_a + ae_b + a^2e_c). \quad (12)$$

Тоді рівняння (8) – (10) можна записати так

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} + e. \quad (13)$$

Отже, процеси у системі інвертор – навантаження можна описати диференціальним рівнянням (13). Проте, для подальшого синтезу системи предиктивного керування необхідно отримати рівняння стану системи у дискретній формі з урахуванням періоду дискретизації  $\Delta t$ . Таке рівняння необхідне для того, щоб виконувати прогнозування зміни величини струму навантаження при прикладанні кожного з можливих векторів напруги. Для отримання дискретних форм рівнянь стану системи існує низка математичних підходів. Оскільки в даному випадку розглядається просте навантаження, то отримане диференціальне рівняння є рівнянням першого порядку, тому дискретна форма запису рівняння (13) може бути отримана наближеним обчисленням операції диференціювання. При цьому слід врахувати, що такий підхід є можливим лише для оцінки базових властивостей предиктивного керування і у випадку більш складних систем може призводити до виникнення помітних похибок, а, отже, до необхідності використання більш розвинених підходів до дискретизації диференціальних рівнянь.

Отже, похідна узагальненого вектору струму за часом з використанням методу Ейлера може бути обчислена так

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i[k+1] - i[k]}{\Delta t}. \quad (14)$$

Підставимо рівняння (14) у (13). Отримуємо

$$u[k] = Ri[k] + L \frac{i[k+1] - i[k]}{\Delta t} + e[k]. \quad (15)$$

Таблиця 1  
Значення комутаційних сигналів та узагальнюючі вектори вихідної напруги інвертора

| Номер вектору | $S_a$ | $S_b$ | $S_c$ | Узагальнюючий вектор вихідної напруги інвертора |
|---------------|-------|-------|-------|-------------------------------------------------|
| 1             | 0     | 0     | 0     | 0                                               |
| 2             | 0     | 0     | 1     | $2/3u_{dc}e^{\frac{4\pi}{3}j}$                  |
| 3             | 0     | 1     | 0     | $2/3u_{dc}e^{\frac{2\pi}{3}j}$                  |
| 4             | 0     | 1     | 1     | $2/3u_{dc}e^{\pi j}$                            |
| 5             | 1     | 0     | 0     | $2/3u_{dc}e^{0j}$                               |
| 6             | 1     | 0     | 1     | $2/3u_{dc}e^{\frac{5\pi}{3}j}$                  |
| 7             | 1     | 1     | 0     | $2/3u_{dc}e^{\frac{\pi}{3}j}$                   |
| 8             | 1     | 1     | 1     | 0                                               |

Виразимо з рівняння (15) величину  $i[k + 1]$ , яка є значенням струму навантаження на наступному інтервалі дискретності

$$i[k + 1] = i[k] + \frac{\Delta t}{L} (u[k] - Ri[k] - e[k]). \quad (16)$$

Оскільки вимір значень фазних протиЕРС може бути не передбачений наявними технічними засобами, то доцільно здійснювати оцінки даних величин непрямым чином, базуючись на вимірі струму та напруги. Виразимо величину ЕРС з (15)

$$e[k] = u[k] - Ri[k] - L \frac{i[k+1]-i[k]}{\Delta t}. \quad (17)$$

Отже, для визначення величини протиЕРС на дискретному інтервалі  $k$  необхідно знати значення струму навантаження на дискретному інтервалі  $k+1$ , який відноситься до майбутніх періодів часу. В той же час, можна врахувати те, що протиЕРС змінюється з частотою, що є порівняно низькою по відношенню до частоти дискретності цифрової системи керування. Це дозволяє прийняти допущення, що  $e[k] \approx e[k - 1]$ .

Тоді оцінку величини протиЕРС можна здійснити так

$$e[k] \approx u[k - 1] - Ri[k - 1] - L \frac{i[k]-i[k-1]}{\Delta t}. \quad (18)$$

Розглянемо вибір функції витрат. Оскільки на рівні системи керування трифазним інвертором напруги розглядається предиктивне керування струмом, то задачею такої системи є мінімізація величини похибки між задаючим сигналом струму та реальною величиною струму, що протікає в навантаженні. Дана задача системи керування повинна знайти своє втілення у формулюванні функції витрат. У випадку використання двофазної нерухомої системи відліку  $\alpha\beta$  вона формується з використанням похибок величин струму по осям  $\alpha$  та  $\beta$

$$c = |i_{\alpha}^*[k + 1] - \hat{i}_{\alpha}[k + 1]| + |i_{\beta}^*[k + 1] - \hat{i}_{\beta}[k + 1]|, \quad (19)$$

де  $i_{\alpha}^*[k + 1]$ ,  $i_{\beta}^*[k + 1]$  – проекції вектору завдання струму перетворювача  $i^*[k + 1]$  на осі нерухомої системи відліку  $\alpha\beta$ ;  $\hat{i}_{\alpha}[k + 1]$ ,  $\hat{i}_{\beta}[k + 1]$  – прогнозні значення проекцій струму перетворювача на осі нерухомої системи відліку  $\alpha\beta$ .

Оскільки в сучасних цифрових системах керування електроприводами використовуються високопродуктивні цифрові сигнальні процесори, то інтервал дискретності є досить малим, а тому суттєвої зміни задаючого сигналу протягом даного інтервалу не відбувається, що дозволяє вважати, що  $i^*[k + 1] \approx i^*[k]$ . Таке допущення може призводити до виникнення запізнення в системі керування величиною один інтервал дискретності, але з огляду на його мінімальне значення це не призводить до помітного погіршення загальних показників якості керування.

Таким чином, загальна структура системи предиктивного керування струмом автономного інвертора напруги показана на рис. 2. Результати математичного моделювання роботи системи показані на рис. 3. Форма вихідних струмів (рис. 3а) та його спектр (рис. 3б) доводять, що вищі гармонічні складові є незначними.

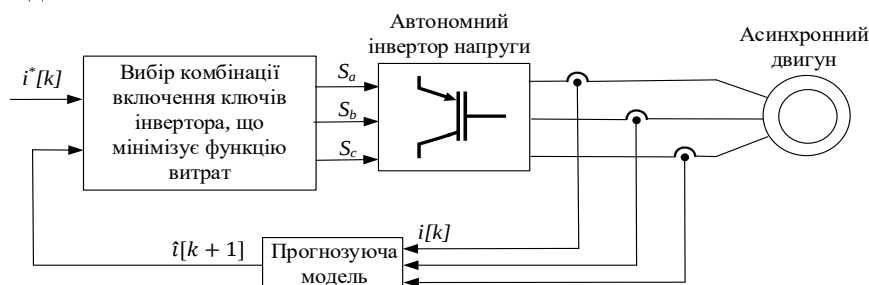
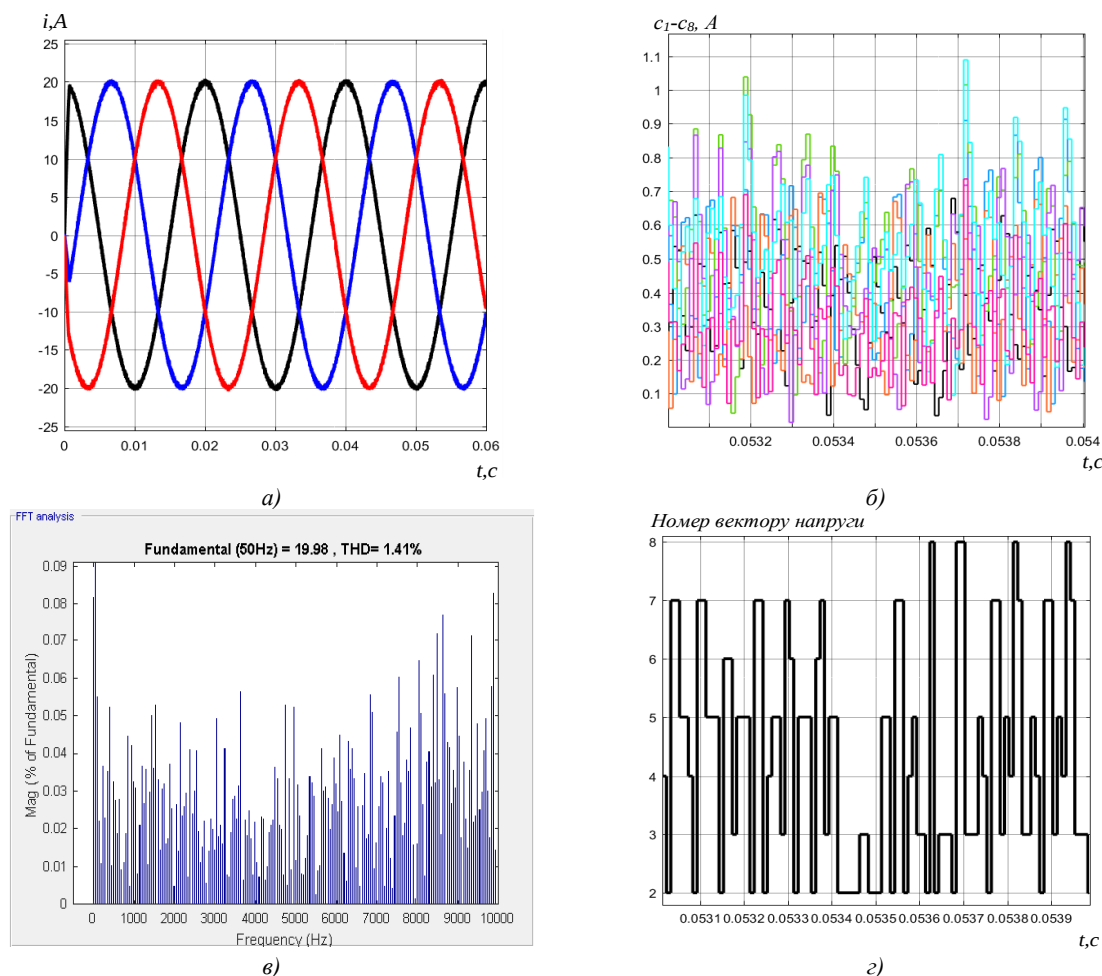


Рис. 2. Загальна структура предиктивного керування струмом трифазного інвертора напруги



**Рис. 3.** Результати моделювання роботи предиктивної системи керування струмом трифазного інвертора: *а* – форма вихідних струмів; *б* – функції витрат для можливих векторів напруги, що генерується інвертором; *в* – спектр вихідного струму інвертора, побудований за допомогою інструменту FFT Analysis середовища Matlab Simulink; *г* – номер вектору напруги, що обирається системою керування

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Таким чином, розглянутий підхід до реалізації предиктивного керування струмом трифазного інвертора може розглядатися як альтернатива до існуючих методів широтно-імпульсної модуляції, дозволяє отримувати вихідний струм з низькими гармонічними спотвореннями. До сильних сторін такого принципу керування відноситься можливість інтеграції у загальну структуру предиктивного керування автоматизованим електроприводом. До слабких сторін такої системи відноситься необхідність визначення параметрів навантаження та більші обчислювальні витрати з боку мікропроцесорної системи керування.

#### Список літератури

1. Сінчук І.О. Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізрудних підприємств / І.О. Сінчук, І.А. Козакевич, М.Л. Барановська, Т.М. Берідзе, І.І. Пересунько // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2020. – Вип. 50. С. 142-147.
2. Козакевич І.А. Система енергоефективного керування динамічним компенсатором викривлень напруги / І.А. Козакевич, А.А. Кондратенко // Гірничий вісник. – 2019. – Випуск 105. С. 154-159.
3. Козакевич І.А. Дослідження роботи синхронного двигуна з постійними магнітами в гібридних тягових електроприводах / І.А. Козакевич, І.В. Касаткіна, Л.В. Єрьоменко // Гірничий вісник. – 2018. – Випуск 104. С. 106-110.
4. Козакевич І.А. Система керування вентилями реактивними двигунами / І.А. Козакевич, І.І. Шевченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 135-138.
5. Козакевич І.А. Керування потоками потужності гібридних транспортних засобів / І.А. Козакевич, Ю.Г. Осадчук, Р.А. Ільченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 124-129.
6. Jiang H. An Inverter Input Current Closed-loop Control Scheme for IPMSM Drives Fed by Electrolytic Capacitorless Converter / H. Jiang, Y. Zhang, L. Huang, J. Liu // IEEE 9th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC2020-ECCE Asia). – Nanjing, China, 2020. – Pp. 1795-1799.

7. **Han Y.** The anti-disturbance performance study of voltage source inverter with active disturbance rejection control / **Y. Han, H. Xiong** // IEEE 8th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC). – Chongqing, China, 2019. – Pp. 1101-1105
8. **Lee H.** Accurate Neutral Current Control for Neutral Point Voltage Balancing in Three-Level Inverters Considering Digital Control and PWM Delay / **H. Lee, S. Kim and Y. Yoon** // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). – Baltimore, USA, 2019. – Pp. 4795-4800
9. **Mohammed L.A.** Voltage to Frequency Speed Control of Induction Motor using Cascaded Multilevel inverter / **L.A. Mohammed** // 2nd International Conference on Electrical, Communication, Computer, Power and Control Engineering (ICECCPCE). – Mosul, Iraq, 2019. – Pp. 148-152
10. **Hao W.** Droop Control Method of Inverter Based on Variable Virtual Impedance / **W. Hao, C. Zheng, Q. Wang, T. Rui** // 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). – Xi'an, China, 2019. – Pp. 1167-1172

УДК 621.926.23.001.2

В.І. КЛЯЦЬКИЙ, канд.техн.наук, доц., Л.А. БУГАЙ, ст. викл.,  
Н.С. ЗАПОРОЖЕЦЬ, студ.  
Криворізький національний університет

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОНУСНОЇ ДРОБАРКИ МІЛКОГО ДРОБЛЕННЯ

**Мета.** Експериментальна розробка конструкції футировочної броні дробарки дрібного дроблення, що утворюють камеру дроблення, і вплив її на технологічні параметри.

**Методи досліджень.** У роботі застосовані загальноприйняті методи теорії дроблення, варіаційного обчислення, статистичної обробки експериментальних і теоретичних досліджень, великим об'ємом лабораторних експериментів з використанням сучасних методик і вимірювальної апаратури. Для проведення експериментів застосовувалося рототабельне планування другого порядку з наступною обробкою результатів на ЕОМ.

**Наукова новизна.** Дослідження методів і засобів підвищення ефективності роботи конусних дробарок базується на більш-менш повному обсязі обліку діючих факторів і призводить до необхідності розгляду цілого комплексу причин. Проведено експериментальні дослідження, що включають визначення впливу профілю камери дроблення, твердості гірських порід, величини розвантажувальної щільності, на продуктивність і якість продукту дроблення. Встановлено математичну модель у вигляді рівнянь регресії, отриманих статистичними методами на базі експериментів, зібраних безпосередньо при проведенні експериментів. Для вирішення поставлених завдань було використано метод рототабельного планування другого порядку, який дозволив поряд з отриманням математичної моделі процесу, провести статистичну оцінку отриманих результатів. При плануванні експериментів в якості змінних факторів прийняті: обсяг камери дроблення, міцність подрібнювальних руд, розмір розвантажувальної щільності, довжина зони калібрування.

**Практична значимість.** На моделі конусної дробарки дрібного дроблення (М 1: 5) проведено експериментальні дослідження по визначенню впливу профілю камери дроблення при різних значеннях розвантажувальної щільності дробарки, що переробляє різну по міцності руду на продуктивність дробарки і вихід готового класу продукту дроблення.

**Результати.** Отримано оптимальні значення обсягу камери дроблення, розмір розвантажувальної щільності, довжина зони калібрування при різних конструктивно-механічних параметрах моделі конусної дробарки дрібного дроблення з різними профілями камери дроблення.

**Ключові слова:** конусна дробарка, камера дроблення, профіль.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-82-85

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** При експериментальних дослідженнях, що включають визначення впливу профіля камери дроблення, міцності переробляємих руд, величини розвантажувальної щільності, на продуктивність і якість продукту дроблення, раціонально застосувати планування експерименту [1]. Цим методом визначається математична модель не у вигляді рівнянь динаміки, а в вигляді регресії отриманих статистичним методом на базі інформації, зібраної безпосередньо при проведенні експерименту. Метод рототабельного планування другого порядку [2] поряд з отриманням математичної моделі процесу дозволяє скоротити об'єм експериментальних досліджень і провести сувору статистичну оцінку отриманих результатів.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Кількісні і якісні показники роботи дробильної фабрики на сучасних ГЗК в значній мірі визначаються ефективністю роботи дробарок середнього і дрібного дроблення [3]. Величина продукту дроблення і його гранулометричний склад є головними показниками, що характеризують якісну сторону процесу дроблення. З закономірностей процесу дроблення в дробарках середнього і дрібного дроблення значний інтерес представляють залежності між гранулометричним складом дробленого продукту і параметрами профілю простору, що дробить. Для забезпечення ефективної роботи конусних дробарок камера дроблення їх повинна задовольняти ряду вимог [4]: за одиницю часу в камеру дроблення не повинно надходити матеріалу більше, ніж в ній може бути роздроблено і може розвантажитися за цю ж одиницю часу; в камері дроблення, нижче його приймальної зони, розташовуватися з зазором між окремими шматками; шматки руди, що потрапили в зону дроблення в якийсь із циклів прийому, не повинні спиратися на шматки руди, що потрапили в зону дроблення циклом раніше; камера дроблення повинна мати зону дроблення і зону калібрування продукту. Характеризуватися такими параметрами: (кількістю) роздробленої руди в кожному перетині по глибині камери дроблення; інтенсивністю лінійного зношування робочих поверхонь рухомої і нерухомої броней; довжиною шляху руху шматків руди в камері дроблення за один оборот ексцентрика; величиною наклепу робочих поверхонь броней від силового впливу шматків руди при їх роздавлюванні, твердістю по Бринелю НВ; фізико-механічними властивостями подрібнюваністю гірської маси і матеріалу робочих поверхонь броней, що виготовляються зі сталі 110М13Л [5]. Зазначені параметри визначають ефективність процесу дроблення, а від деяких з них залежить процес зношування робочих поверхонь рухомої і нерухомої броней, що утворюють камеру дроблення. Дослідження методів і засобів підвищення ефективності роботи конусних дробарок базується на повному обліку діючих факторів і призводить до необхідності розгляду цілого комплексу причин ефективної роботи [6].

**Постановка задачі.** Застосування методу рототабельного планування другого порядку з метою встановлення експериментально деяких параметрів моделі конусної дробарки.

**Виклад матеріалу і результати.** З використанням цього методу проведені дослідження процесу дроблення руди на моделі дробарки дрібного дроблення з різними профілями камери дроблення. В якості змінних факторів прийняті такі параметри: обсяг камери дроблення, міцність руди, що подрібнюється; розмір розвантажувальної щілини і довжина зони калібрування. Як функції відгуку прийняті такі визначальні показники, як продуктивність дробарки, крупність продукту дроблення. Рівняння регресії, отримане на підставі експерименту має вигляд:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_ix_i + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + \dots + b_{ii}x_i^2 + b_{12}x_1x_2 + \dots + b_{ij}x_ix_j, \quad (1)$$

де кодована змінна  $x_i$  пов'язана з натуральною змінною  $X_i$  формулою

$$x_i = \frac{X_i - x_i^0}{S_i} \quad (2)$$

де  $x_i^0$  – значення змінної на нульовому рівні;  $S_i$  – одиниця варіювання натуральної змінної.

Після перетворень, розкриваючи значення кодових змінних згідно (2), отримаємо рівняння регресії з натуральними змінними

$$y = B_0 + B_1X_1 + B_2X_2 + \dots + B_iX_i + B_{11}X_1^2 + B_{22}X_2^2 + \dots + B_{ii}X_i^2 + B_{13}X_1X_3 + \dots + B_{ij}X_iX_j \quad (3)$$

Продиференціювавши (3) по кожній змінній і прирівнявши вираз нулю, отримаємо систему диференціальних рівнянь, при вирішенні яких на ЕОМ отримаємо оптимальне значення змінного фактора.

Оцінка адекватності отриманих результатів проводиться за допомогою критерію Фішера. Оскільки промислова дробарка дрібного дроблення не придатна для проведення тривалих експериментальних досліджень в силу великої продуктивності, був створений лабораторний стенд, який представляє модель конусної дробарки 2200, виконану з коефіцієнтом геометричної подоби  $C=5$  [7]. Залежно від характеру руху і сил, що проявляються при цьому, можливі різні масштабні часово-просторові співвідношення між параметрами моделі і натурної машини.

Часово-просторові співвідношення знаходяться в тому випадку, коли є функціональні залежності між окремими параметрами машини.

Швидкість обертання валу-ексцентрика виражається формулою

$$n = \sqrt{\frac{69(\sin \gamma - f \cos \gamma)}{D_k}}, \quad (4)$$

де  $\gamma$ - кут нутації конуса, що дробить;  $D_k$  – діаметр основи конуса.

Між величинами швидкостей натурної машини і моделі існує співвідношення

$$C_n = \frac{n_n}{n_m} = \frac{60 \sqrt{\frac{69(\sin \gamma - f \cos \gamma)}{D_{кн}}}}{60 \sqrt{\frac{69(\sin \gamma - f \cos \gamma)}{D_{км}}}} = \sqrt{\frac{D_{кн}}{D_{км}}} = \frac{1}{\sqrt{C_r}} \quad (5)$$

де  $C_r$  – коефіцієнт геометричної подібності.

Робочий процес конусної дробарки визначає наступні величини: міцність дробленого матеріалу на стиск –  $\sigma$  (МПа); число обертів валу – ексцентрика –  $n$ , об/с; діаметр основи конуса –  $D_k$ , м; продуктивність –  $Q$ , н/с; зусилля дроблення –  $R$  (МН); потужність –  $N$  (Вт).

Загальна функціональна залежність, що характеризує процес дроблення, може бути записана в вигляді

$$f(\sigma, n, D_k, Q, R, N) = 0. \quad (6)$$

Аналітичне отримання цієї залежності практично неможливо, а експериментальне визначення трудомістке. Завдання вирішується з використанням  $\Pi$  - теореми, згідно з якою залежність може бути представлена у вигляді залежності між критеріями подібності. Для переходу до критеріїв подібності вибираємо в якості основних одиниць  $D_k, n, \sigma$ . Переконаємося в тому, що визначених не равен нулю

$$\sigma = [M]^1 [L]^{-1} [T]^{-2}; \quad n = [M]^0 [L]^0 [T]^{-1}; \quad D = [M]^0 [L]^1 [T]^0;$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -2 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix} = 1.$$

Розмірність інших величин в нових одиницях наступна

$$[Q] = \frac{[\sigma] [D]}{[n]}; \quad [R] = [\sigma] [D]^2; \quad [N] = [\sigma] [D] [n].$$

Застосовуючи метод нульових розмірностей, отримаємо

$$f(1, 1, 1, \frac{Q \times n}{\sigma \times D}, \frac{R}{\sigma D^2}, \frac{N}{\sigma D^3 n}) = 0 \text{ або } \Phi(\Pi_1, \Pi_2, \Pi_3) = 0, \quad (7)$$

де  $\Pi_1 = \frac{Q \times n}{\sigma \times D}$ ;  $\Pi_2 = \frac{R}{\sigma D^2}$ ;  $\Pi_3 = \frac{N}{\sigma D^3 n}$  - безрозмірні критерії подібності.

При проектуванні моделі отримані залежності використовувалися для визначення інших часово-просторових співвідношень

$$C_r = C_r^2; \quad C_n = C_r^3 \frac{1}{\sqrt{C_r}} = C_r^{2,5}.$$

Перевіримо значення часово - просторових співвідношень  $C_R$  і  $C_N$ , користуючись формулами для визначення зусиль і потужностей привода. Рівнодіюча зусиль дроблення [8]

$$R_n = 16,85 \frac{g_0 F \cos \alpha}{36}, \quad (8)$$

де  $g_0$  - питомий тиск матеріалу в зоні дроблення;  $F$  – загальна площа броні конуса, що дробить;  $\alpha$ - кут нахилу броні конуса що дробить.

Приймаючи  $g_0$  і  $\alpha$  однаковими для моделі натурної дробарки, визначаємо

$$C_R = \frac{16,85 \times F_n \times \cos \alpha \times 36}{16,85 \times F_m \times \cos \alpha \times 36} = C_r^2$$

Споживана потужність при дробленні дорівнює

$$N = \frac{3F \times \alpha_{cp} \times n_0}{\eta}, \quad (9)$$

де  $F$  – бокова поверхня конуса, що дробить;  $\alpha_{cp}$  – ексцентриситет в середній частині конуса;  $n_0$  – число коливань конуса в хвилину;  $\eta$  – к.к.д. механізму дробарки.

Приймаючи  $\eta$  однаковим для моделі і реальної машини, знаходимо

$$C_N = \frac{3F_n \times \alpha_{cp,n} \times n_{0n} \times \eta}{3F_m \times \alpha_{cp,m} \times n_{0m} \times \eta} = C_r^2 \times C_r \times \frac{1}{\sqrt{C_r}} = C_r^{2,5}.$$

Число обертів валу-ексцентрика моделі дорівнює

$$n_m = n_n \sqrt{C_r} = 23,46 \sqrt{5} = 52,36 \text{ (с}^{-1}\text{)}, \quad (10)$$

де  $n_n = 23,46 \text{ с}^{-1}$  - швидкість обертання валу - ексцентрика реальної дробарки 2200.

Потужність двигуна моделі

$$N = \frac{N_n}{C_r^{2,5}} = \frac{320 \times 10^3}{5^{2,5}} = 5,72 \times 10^3 \text{ Вт}, \quad (11)$$

де  $N_n = 320 \times 10^3 \text{ Вт}$  - потужність привода дробарки КМДТ -2200.

Використовуючи отримані дані  $C_N$ ,  $C_n$ ,  $C_R$  визначаємо значення потужності, зусилля і продуктивності натурної дробарки за експериментальними значеннями цих параметрів, отриманих на моделі. В якості змінних факторів приймалися: вихід дробленого продукту; обсяг камери дроблення; зміна розміру розвантажувальної щілини; межі зміни коефіцієнта міцності руди; довжина зони калібрування.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Після обробки експериментальних даних, отримані рівняння регресії для продуктивності і крупності продукту дроблення; визначені оптимальні значення змінних факторів при яких досягається максимальна продуктивність і оптимальний вихід готового класу в продукті дроблення.

#### Список литературы

1. Протодьяконов М.М., Тедер Р.И. Методика рационального планирования эксперимента. М., Наука, 1970, 116с.
2. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. Наука, М., 1969, 511с.
3. Шестаков А.М., Кляцкий В.И., Джур В.А. Влияние изменения профиля камеры дробления дробилки КМДТ-2200 на формирование дробленого продукта. -Изв. вузов. Горный журнал. 1984 №5, с.65-69.
4. Ушаков В.С.К вопросу о расчете и проектировании дробящего пространства конусных дробилок мелкого и среднего дробления. -Вопросы исследования и проектирования машин и оборудования. Сб. трудов УДН, 1977, с.128-129.
5. Зверховский Я.Я., Быков В.И., Бондарец А.И. Стенд для исследований конусных дробилок с консольным валом. А.с. №368875, Бюл. Информаций, №10, 1973.
6. Андреев С.Е., Перов В.А., Зверевич В.В. Дробление, измельчение и грохочение полезных ископаемых. - М., Недра, 1980, 415с.
7. Алабужев П.М., Геронимус В.Б., Минкевич Л.М. и др. Теория подобия и размерностей. Моделирование. - Высшая школа, 1968, 208с.
8. Олевский В.А. Конструкция, расчеты и эксплуатация дробилок. М., 1958, 460 с.

УДК 622.1:528.024

Л.В. ДОЛГІХ, канд. техн. наук доц., С.В. ДІХТЯР, А.О. ТОМАШЕВСЬКА, аспіранти  
Криворізький національний університет

### ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ФОТОГРАМЕТРІЇ В УМОВАХ ПІДЗЕМНИХ ГІРНИЧИХ ВИРОБОК

**Мета.** Метою роботи є дослідження питання використання методів цифрової фотограмметрії в умовах підземних гірничих виробок для підвищення ефективності маркшейдерського забезпечення гірничих робіт.

**Методи дослідження.** В роботі використані методи теоретичного аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, на основі якого обґрунтована доцільність розробки та впровадження у виробництво цифрових технологій для вирішення задач маркшейдерського забезпечення гірничих робіт, а також використані експериментальні роботи з дослідження впливу складних умов підземної розробки родовищ на якість цифрового знімання.

**Наукова новизна.** В роботі запропоновано шляхи удосконалення методик виконання орієнтирно-з'єднувальних зйомок та передачі позначки на глибокі горизонти шахти з використанням сучасних наукових досягнень в галузі приладобудування та програмного забезпечення вимірювальних та обчислювальних робіт. Розглянуто можливість використання цифрової зйомки для підвищення ефективності цих робіт, для чого виконані експериментальні роботи з дослідження впливу стиснених умов шахти, обмеженої видимості та запиленості і вологості повітря. Встановлена можливість використання фотограмметричних методів, які забезпечать високу оперативність виконання робіт та необхідну точність. Визначено основні фактори впливу на точність маркшейдерських зйомок, які виконуються з використанням цифрової фотограмметрії в умовах, наближених до підземних розробок.

**Практична значимість.** Встановлені переваги та недоліки використання сучасних приладів та методів виконання орієнтирно-з'єднувальних зйомок та передачі висотних позначок на глибокі горизонти шахт у порівнянні з

традиційними методами, дозволили визначити напрям їх удосконалення. Виконані роботи сприяють розробці більш ефективних методів маркшейдерських робіт зі встановлення зв'язку між різними горизонтами та денною поверхнею.

**Результати.** Досліджено можливість та точність визначення центра марки з близької відстані, що відповідає стислим умовам шахти. Визначено точність, з якою необхідно вимірювати відстані між марками, встановленими на різних горизонтах орієнтування, для яких визначається перевищення з використанням фотограмметричних методів. Досліджено ступінь впливу величини експозиції на точність моделі шахтного ствола, побудованої по цифрових знімках, визначено необхідну кількість контрольних точок та методу передрозрахунку точності вимірювань.

**Ключові слова:** висотна позначка, маркшейдерська зйомка, цифрова фотограмметрія, гірничі виробки.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-85-90

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Видобування залізної пуди підземним способом один з найважливіших секторів промисловості України. Зниження якості руд, високі витрати на видобування та конкуренція на зовнішньому ринку вимагають від підприємств підвищення ефективності виробництва.

У світовій практиці, на відміну від вітчизняної, для маркшейдерського забезпечення підземних гірничих робіт використовуються лазерні сканери, електронні прилади та інші сучасні технології. Відомо, що впровадження новітніх технологічних рішень та модернізація існуючих – це пріоритетний напрям розвитку гірничодобувної промисловості, результатом якого є підвищення ефективності гірничих робіт з раціонального використання надр, зниження собівартості та забезпечення безпечних умов праці.

Для підвищення точності й оперативності маркшейдерських робіт в умовах підземних гірничих розробок пропонується застосування цифрових камер.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Забезпечення безпечних умов праці є головною задачею планування гірничих робіт. Передача висотної позначки з поверхні в підземні гірничі виробки та з вище лежачого горизонту на нижній, а також орієнтирно-з'єднувальна зйомка, відносяться до спеціальних видів маркшейдерських робіт, які впливають та ефективність маркшейдерського забезпечення всього комплексу підземних гірничих робіт, і тому важливим є їх удосконалення шляхом використання сучасних технологій [1]. Традиційні методи їх виконання мають низку суттєвих недоліків [2-3]:

- необхідність зупинки шахтного ствола на час виконання робіт (до кількох діб), що робить неможливим його використання в цей час у якості запасного виходу для робітників та призводить до фінансових втрат;

- висока залежність ефективності їхнього застосування від глибини розробки (шахтні стрічки застосовують до 500 м, а глибиномір ДА-2 – до 1000 м);

- значна трудомісткість робіт;

- ймовірність обриву мірних приладів, що може призвести до травмування робітників;

- необхідність введення великої кількості поправок у виміри (за компарування стрічок, мірних дисків, дротів; за температуру; за видовження від власної ваги та підвищеного вантажу тощо), що призводить до високих похибок.

В якості контролю вимірів використовують повторне визначення висотної позначки та порівняння результатів, але для якісного контролю точності виконання цих маркшейдерських робіт не достатньо [4].

Оскільки сучасні засоби вимірювань не включені до інструкції з виконання маркшейдерських робіт виникає необхідність у визначенні меж та можливостей застосування цифрової фотограмметрії в підземних умовах.

Люфт С. К., Бесимбаева О. Г., Бесимбаев Н. Г. та Капасова А. З. в роботі [5] досліджують метод лазерного сканування для виконання маркшейдерських робіт у шахтних стволах, який робить можливим визначення величин деформацій та просторових координат точок з необхідною точністю.

В роботі [6] розглядаються фізичні джерела похибок фотознімків. Розроблена методика спостережень за рефракцією, яка зарекомендувала себе як надійний інструмент при вивченні впливу зовнішніх умов на точність маркшейдерсько-геодезичних вимірювань. Досліджена залежність величини рефракції від температури, атмосферного тиску, запиленості та вологості. Методика може бути застосована, в різних сферах діяльності, де необхідно мати оперативні та точні дані зі спостережень за об'єктом.

Закордонний досвід застосування фотограмметричних методів в підземних шахтних умовах [7-11] дозволяє передбачити складнощі, які можуть виникати в підземних умовах та визначити тип обладнання для забезпечення необхідної точності отриманого результату. Більшість дослідників у вказаних роботах концентрують увагу на визначенні найкращого способу аналізу отриманих моделей, їх точності та визначенні залежностей від конкретних умов, таких як нахил камери, температура, вологість, запиленість, додаткове освітлення тощо середовища, в якому виконуються роботи.

Аналіз літературних джерел доводить, що отриманої інформації з фотограмметричних скануючих систем часто достатньо для вирішення маркшейдерських задач з необхідною точністю. Фотограмметричні методи, у порівнянні з іншими, більш продуктивні та вимагають менших витрат часу на виконання польових робіт, вони можуть бути застосовані для вирішення широкого кола маркшейдерських задач в різних гірничих умовах, забезпечуючи необхідну точність.

**Постановка задачі.** При відкритій розробці родовищ корисних копалин широко використовують фотограмметричні методи. При цьому забезпечується зйомка всіх елементів кар'єрів, відвалів та інших об'єктів з необхідною точністю.

Важливо підкреслити, що фотограмметричні методи і раніше використовувалися для зйомок в підземних гірничих виробках, але фотографічні камери, які при цьому використовувалися, значно поступалися сучасним цифровим. Але для використання сучасних цифрових методів в підземних гірничих виробках, вони повинні бути адаптовані до цього. Для цього доцільно дослідити залежність між умовами знімання та точністю отриманих даних.

Метою роботи є розроблення нової методики виконання робіт в шахтному стволі, які забезпечать ефективне виконання передачі висотної позначки та орієнтирно-з'єднувальної зйомки, використовуючи при цьому фотограмметричні методи.

**Викладення матеріалу та результати.** Фотограмметричні методи забезпечують дистанційне дослідження об'єкта та є майже не замінним способом, особливо, коли це стосується об'єктів, розташованих в місцях, небезпечних для знаходження людей. Відомо також, що ці методи ефективні для спостереження за деформаціями об'єктів та швидкоплинних процесів.

За результатами цифрової зйомки створюються хмари точок та тривимірні моделі об'єкта зйомки. При цьому можна обходитись без закріплених точок на стінах гірничих виробок, на чому ґрунтуються традиційних фотограмметричні методи та методи з використанням маркшейдерсько-геодезичних приладів в підземних гірничих виробках. В порівнянні з лазерним скануванням, отримані знімки дозволяють дешифрувати хмари точок, надавати їм відповідне забарвлення, що спрощує для оператора пошук необхідних точок в масиві та підвищує точність побудови тривимірної моделі.

Проблеми, з якими раніше стикалась фотограмметричні зйомки в складних підземних умовах, такі як висока вологість, запиленість повітря та недостатня кількість світла, з розвитком цифрових фотокамер значно зменшились.

Головним обмеженням у її застосуванні є стислі умови підземних виробок, при яких відстань до об'єкта зйомки становить лише кілька метрів. Однак, це дає перспективу використання камер з короткою фокусною відстанню, і це дає можливість застосовувати легкі камери.

На сьогодні є велика кількість цифрових камер, які забезпечують високу роздільну здатність в будь-яких середовищах, такі як GoPro, Insta 360 та інші, що робить їх гнучкими у застосуванні.

Чітке планування робіт з передачі висотної позначки та орієнтування на глибоких горизонтах шахт необхідне для економії часу та зменшення похибок, в отриманих для опрацювання, хмарах точок. Для забезпечення цифрової зйомки в підземних гірничих умовах потрібно:

- вибрати місце розташування станції зйомки, яка буде найбільш інформативною;
- виконати розрахунок елементів цифрової зйомки;
- встановити додаткове освітлення;
- виконати орієнтування цифрової камери (при необхідності);
- скласти схему орієнтирно-з'єднувальної зйомки та передачі висотної позначки;
- здійснити експонування;
- здійснити камеральну обробку отриманих знімків.

Отримані результати зйомки дозволяють створити в програмних комплексах, наприклад, Agisoft Metashape Professional, Autodesk ReCap, цифрову модель на основі хмари точок, з подальшим створенням маркшейдерських креслень та вирішенням інших задач.

Можливості застосування комп'ютерного зору на сьогодні є досить обмеженими, тому перед програмною обробкою знімків доцільно виконати попередню обробку. Людський зір здатен сприймати параметри знімка більш детально і тому спостерігач може коригувати параметри зображення у разі необхідності.

При використанні цифрових камер для знімальних робіт, необхідно виконувати її калібрування з виявленням закону розподілу систематичних похибок через дисторсію. Для цього в досліджуваному просторі закріплюються контрольні точки у вигляді марок чи точок, які проєктуються за допомогою лазерів. Потім з високою точністю визначаються їх просторові координати та порівнюються з отриманими на знімках. При цьому оцінюється розподіл геометричних спотворень, величини яких отриманих при калібруванні, та похибка визначення просторових координат, що визначається за наявності опорних точок.

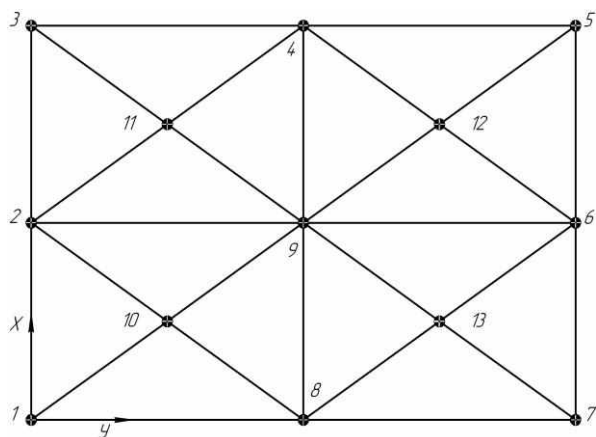


Рис. 1. Схема макету

Для дослідження створено макет, схему якого показано на рис. 1. Макет виготовлено з аркуша паперу розміром 800×500 мм, на який нанесено контрольні точки, з'єднані у вигляді системи трикутників. Фотографування здійснювалося з відстані 10 метрів. У якості цифрової камери була використана камера GoPro Hero 9 з матрицею 3840×2160 пікс.

При камеральній обробці були визначені координати контрольних точок в пікселях, а потім перераховані в міліметри та сантиметри та порівняні з фактичними. За отриманими координатами визначалися відстані між точками за відомою формулою

$$D = \sqrt{(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2}, \quad (1)$$

де  $X_1$  та  $Y_1$  – координати першої точки, а  $X_2$  та  $Y_2$  – другої точки.

Середня похибка становила 0,55 мм, тоді як мінімальна та максимальна становили 0,1 та 1,5 мм відповідно. Розподіл похибок відображено на рис. 2.

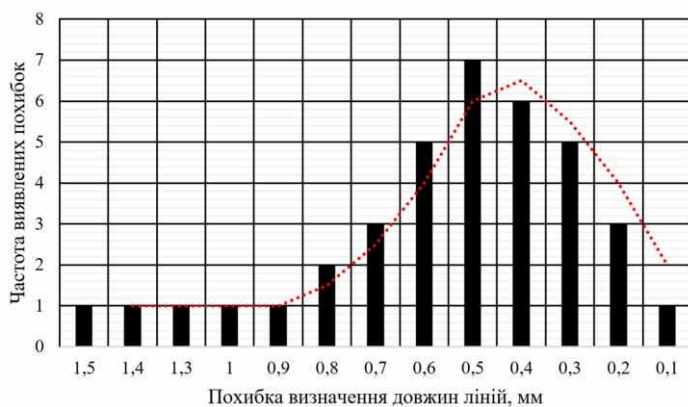


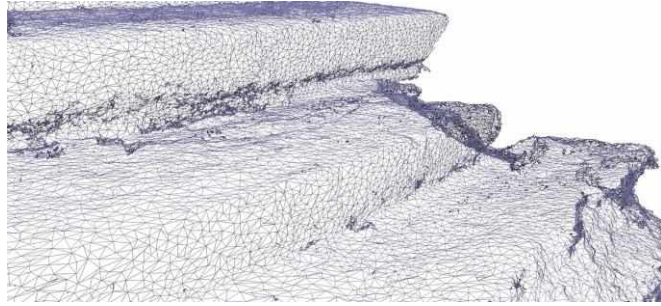
Рис. 2. Графік розподілу похибок

Однією з основних умов коректної роботи програмних комплексів є вірна орієнтація зображень, яка в першу чергу залежить від умов виконання знімання. Тому виникла необхідність у дослідженні впливу параметрів знімання на якість отриманих зображень, а саме якості освітлення та інших характеристик. Було виконано зйомку об'єкта складної структури при різних умовах освітлення, на основі чого було отримано хмари точок та 3D-моделі.

На основі аналізу тіл хмар точок (рис. 3) та сіток отриманих моделей (рис. 4) було встановлено, що за достатньої кількості світла можна отримати занадто деталізовану модель, що може ускладнювати роботу оператора при обробці об'єктів великих розмірів. Точність отриманих моделей при складних умовах була достатньою для лінійних та кутових вимірів. Обмеженням є лише обчислювальні потужності для камеральної обробки.



**Рис. 3.** Цифрова модель  
в системі Autodesk ReCap



**Рис. 4.** Каркасний вид моделі створений  
в системі Agisoft Metashape Professional

Для виконання зйомки великих об'єктів, таких, як шахтні стволи, штреки тощо, доцільно розділити ряди зображень на окремі частини, потім виконати моделювання та визначення кутових та лінійних величин, а після цього поєднати одержані результати. Це дозволяє зменшити накопичення похибок та навантаження комп'ютера.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Методи цифрової фотограмметрії можуть використовуватися для візуалізації положення тривимірного простору з рядків зображень. Вірний вибір цифрової камери, програмного комплексу, умов знімання (освітлення, вологість та запиленість) та попередня обробка знімків сприяє можливості використання методів цифрової фотограмметрії для передачі висотних позначок та виконання орієнтирно-з'єднувальних зйомок в умовах шахтного ствола.

Головною перевагою запропонованого рішення є те, що зйомка займає менший час у порівнянні з традиційними методами (дані можна отримати за лічені хвилини), а отримані моделі містять детальну характеристику об'єкта. При цьому немає необхідності у перекриванні шахтного ствола і можна використовувати його у якості запасного виходу.

В подальшому будуть досліджені питання орієнтування моделей, вибору певної кількості контрольних точок та розробленню програмного забезпечення для опрацювання даних в польових умовах.

### *Список літератури*

1. **Dikhtiar S. V., Tomashevskaya A. O., Dolgikh L. V.** The relevant importance of the issue of enhancing the efficiency of orientation and connection surveys and height bench mark transfers. Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing. 2nd international scientific and technical Internet conference (Petroșani, Romania, November 15, 2019): book of abstracts. – Petroșani: Universitas Publishing, 2019. P. 114–116.
2. **Бизов В. Ф., Федоренко П. Й.** Маркшейдерська справа. Том VI. Підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком «Гірництво». Кривий Ріг: Мінерал, 2000. 211 с.
3. **Борщ-Компониц В. И.** Геодезия. Маркшейдерское дело. Москва: Недра, 1989. 511 с.
4. **Діхтяр С. В., Томашевська А. О.** Підвищення точності передачі висот на глибокі горизонти шахти. Матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Розвиток промисловості та суспільства. 2020 р. Кривий Ріг: КНУ, 2020. С. 37.
5. **Люфт С. К., Бесимбаева О. Г., Бесимбаев Н. Г., Капасова А. З.** Использование метода лазерного сканирования для выполнения маркшейдерских работ в шахтном стволе. Энергетика и рациональное природопользование. 2015. №2. С. 204–209.
6. **Лесовой А. А.** Исследование ошибок внешних условий методами фотограмметрии. Вісник Криворізького національного університету: збірник наук. праць. Кривий Ріг. 2013. Вип. 34. С. 232–237.
7. **Bishop R. E.** Applications of Close-Range Terrestrial 3D Photogrammetry to Improve Safety in Underground Stone Mines. Mining and Minerals Engineering. Blacksburg, 2020. 184 P.
8. **Monsalve J., Baggett J., Bishop R., Ripepi N.** Application of laser scanning for rock mass characterization and discrete fracture network generation in an underground limestone mine. Proceedings of the 37th International Conference on Ground Control in Mining. Morgantown, 2018. P. 183–192.
9. **Malte J. M., Gurgel, Preusse A.** New opportunities and challenges in surveying underground cavities using photogrammetric methods. International Journal of Mining Science and Technology, Volume 31, Issue 1, 2021. P. 9–13.
10. **Pereira M., Orfeo D., Ezequille W., Burns D., Xia T., Huston D.** Photogrammetry and Augmented Reality for Underground Infrastructure Sensing, Mapping and Assessment. International Conference on Smart Infrastructure and Construction 2019 (ICSIC). 2020. P. 169–175.
11. **Benton D. J., Seymour J. B., Boltz M. S., Raffaldi M. J., Finley, S. A.** Photogrammetry in underground mining ground control – Lucky Friday mine case study: Proc. 8th. Deep and High Stress Mining, Perth, Australia. 2017. P. 587–598.

УДК 621.314.26

І.А. КОЗАКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., Р.В. СІЯНКО, асп.  
Криворізький національний університет

## СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ МОДУЛЬНИМ БАГАТОРІВНЕВИМ ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ

**Мета** роботи полягає у розробці системи керування мережовим модульним багаторівневим перетворювачем з використанням орієнтації за вектором напруги в мережі та отримання основних аналітичних залежностей, що описують функціонування такої системи.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи аналізу напівпровідникових перетворювачів для аналізу схеми модульного багаторівневого випрямляча, методи координатних перетворень для розділення складових, що впливають на активну та реактивну потужності перетворювача, методи теорії автоматичного керування для синтезу регуляторів струму з використанням внутрішньої моделі.

**Наукова новизна.** Розроблено теоретичні аспекти функціонування системи керування модульним багаторівневим випрямлячем з використанням орієнтації за вектором напруги, що відрізняється від існуючих врахуванням перекресних зв'язків між осями  $d$  та  $q$ , а також налаштуванням параметрів регуляторів струму з використанням внутрішньої моделі.

**Практична значимість.** Представлена система керування може слугувати основою для розробки схемних рішень щодо побудови випрямної частини схем перетворення енергії автоматизованих електроприводів з двигунами, що мають середній рівень номінальної напруги.

**Результати.** Розглянуто можливість використання схеми модульного багаторівневого перетворювача в якості основи для побудови чотириквadrантного електроприводу, де дана схема буде використовуватися як у інверторній, так і у випрямній частинах. Проаналізовано основні властивості системи з орієнтацією за вектором напруги мережі та встановлено, що її використання дозволяє забезпечити роздільне керування величинами активної та реактивної потужностей. Представлено рекомендації щодо налаштування параметрів ПІ-регуляторів струму такої системи.

**Ключові слова:** модульний перетворювач, середній рівень напруги, електропривод, орієнтація за напругою, активна потужність, реактивна потужність

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-90-95

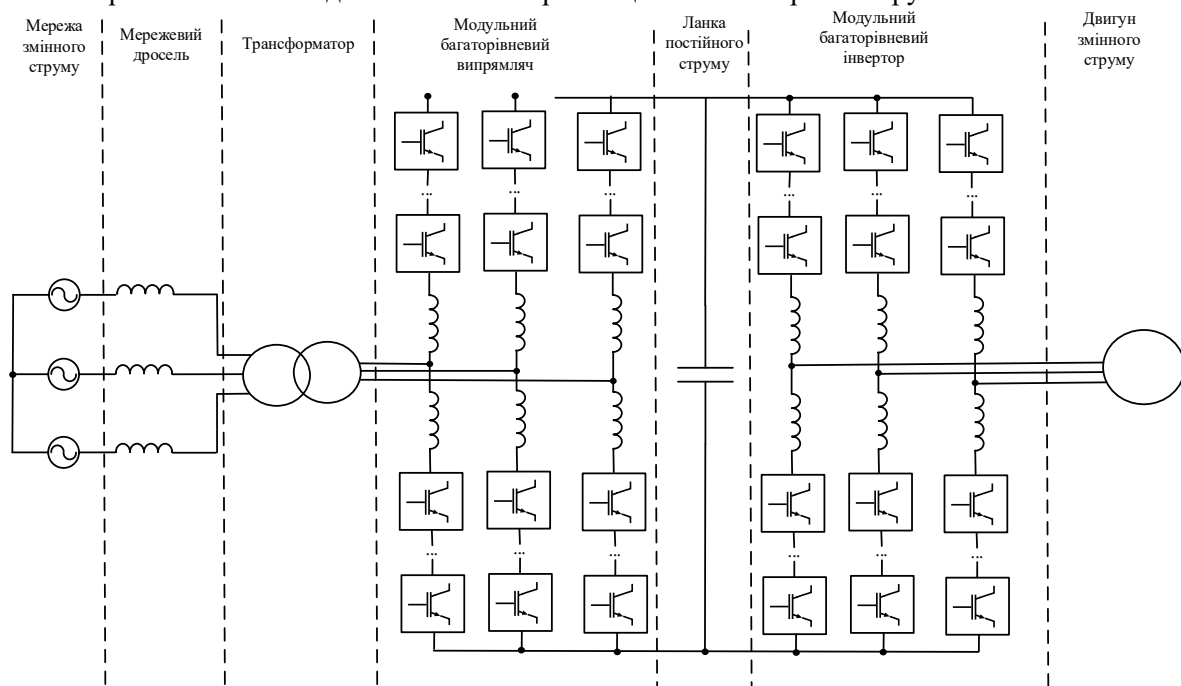
**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** В даний час активно розвиваються серійні електроприводи (Siemens SIMOVERT-MV, ABB ACS6000, Alstom VDM6000 Symphony та ін.) на базі багаторівневих перетворювачів [1]. Це пояснюється появою «високовольтних» IGBT-ключів, які здатні витримувати напруги середнього рівня без необхідності послідовного з'єднання декількох транзисторів. Проте, суттєвим недоліком цих перетворювачів є відсутність модульності, а також здатності до збільшення рівня номінальної напруги та / або збільшення кількості рівнів вихідної напруги без суттєвого ускладнення схеми, що певною мірою гальмує подальший розвиток регульованого електроприводу з середнім рівнем номінальної напруги за існуючими напрямками [2]. В той же час, на ринку електропривода присутні пристрої (наприклад, Rockwell Automation PowerFlex 6000), що побудовані на базі багаторівневого перетворювача з послідовно з'єднаними H-мостами. Такі схеми мають більш широкий діапазон номінальних напруг, що може перевищувати 10 кВ, а також характеризуються високими показниками надійності та відмовостійкості. Ці перетворювачі будуються на базі однотипних низьковольтних комірок, які живляться від ізольованих джерел постійної напруги. Проте, для отримання таких напруг необхідно використовувати трансформатор зі значною кількістю зсунутих за фазою вторинних обмоток, що дозволяє мінімізувати негативний вплив випрямної частини електропривода на якість електричної енергії в мережі. Даний трансформатор є складною за конструкцією електричною машиною та значно збільшує вартість та габаритні розміри такого електропривода.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Використання багаторівневих перетворювачів у системах регульованого електроприводу та системах високовольтної передачі електричної енергії постійним струмом широко розглядається у наукових публікаціях [3-10]. У роботі [6] розглянуто методи балансування напруг всередині плеча, що спрямовані на рівномірний розподіл заряду між модулями в межах одного плеча, оскільки загальний обсяг енергії в кожному плечі інвертора повинен відповідати заданому значенню. Дана робота описує теоретичні основи для незалежного керування енергіями напівплечей перетворювача і представляє узагальнені концепції

керування, що можуть бути застосовані для реалізації таких підходів. Структури систем керування, що запропоновані у роботі, мають на меті мінімізацію струмового навантаження перетворювача, є легкими в реалізації та можуть застосовуватися до широкого класу різновидів модульних багаторівневих перетворювачів. У роботі [7] розглядаються методи мінімізації синфазної напруги мережевого модульного багаторівневого перетворювача. Синфазна напруга, що викликана асиметрією напруги в мережі, зменшується шляхом відповідного керування ключами випрямляча пропорційно до кількості модулів в одному плечі. Проте, у представлених роботах не розглянуто можливості роздільного керування активною та реактивною потужністю випрямляча за рахунок використання орієнтації за вектором напруги мережі.

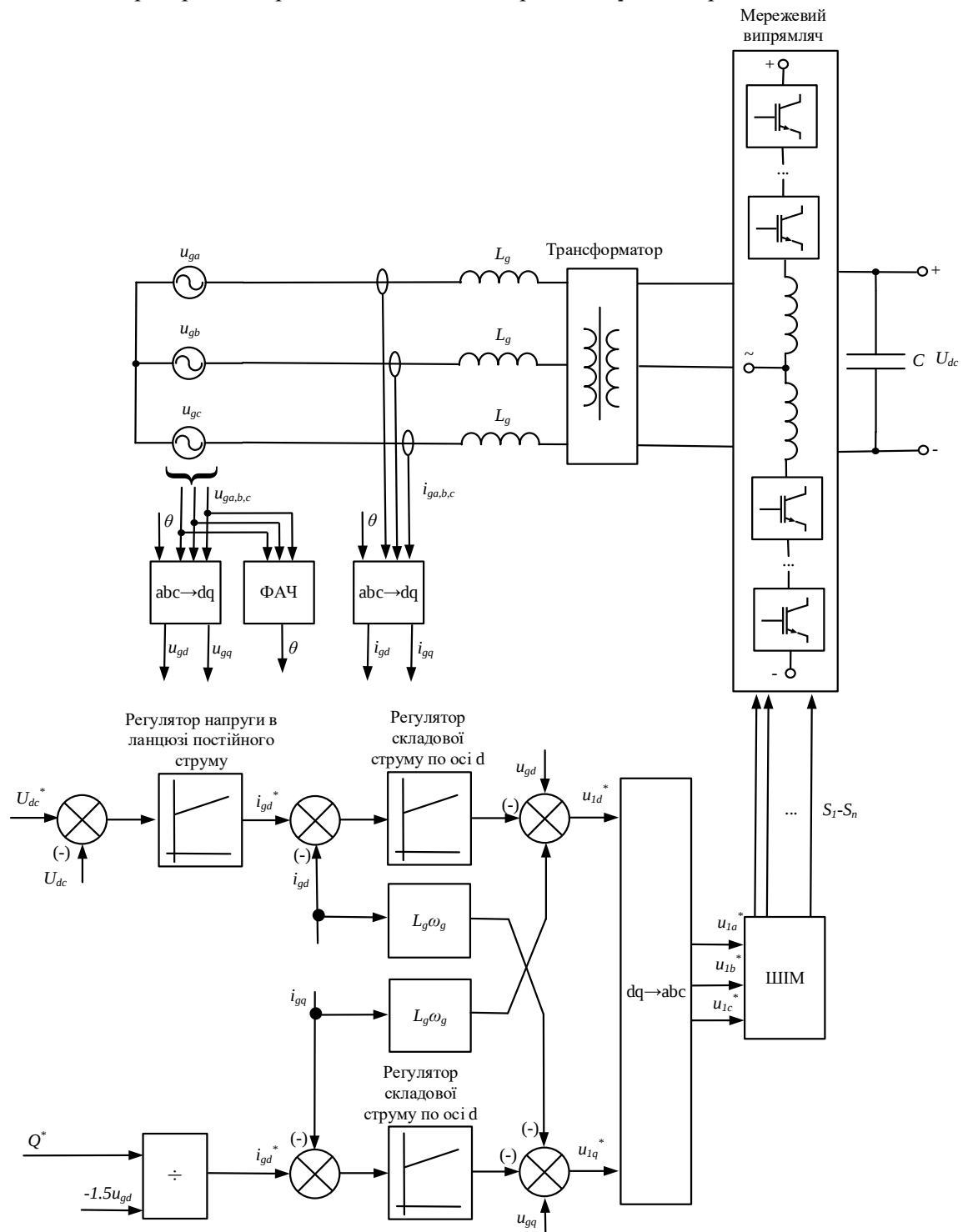
**Постановка завдання.** Мета роботи полягає у визначенні ключових особливостей використання модульного багаторівневого перетворювача у якості мережевого випрямляча при керуванні з орієнтацією за вектором напруги мережі. Для досягнення поставленої мети було поставлено та розв'язано наступні задачі: розглянуто особливості функціонування модульного багаторівневого перетворювача в режимі підвищувача випрямляча; аналіз системи керування з орієнтацією за вектором напруги мережі для забезпечення роздільного керування величинами активної та реактивної потужності; розробка рекомендацій щодо налаштування параметрів регуляторів системи автоматичного керування модульним багаторівневим випрямлячем.

**Викладення матеріалу та результати.** З міркувань збереження модульної конструкції силової частини перетворювача логічним кроком є спроба використання схеми модульного багаторівневого перетворювача у структурі електропривода з середнім рівнем номінальної напруги, оскільки в такому випадку буде можливим позбавитися багатообмоткового трансформатора, здійснюючи живлення інвертора від спільного ланцюга постійного струму. На ринку електропривода в даний час вже представлено декілька таких систем, наприклад Ben-shaw M2L 3000, Siemens Sinamics Perfect Harmony GH150, Siemens Sinamics SH150. У якості випрямної частини таких перетворювачів застосовуються або некеровані випрямлячі з підвищеною пульсністю, або активні випрямлячі (рис. 1), що дозволяє забезпечити двонаправленість проходження потоку потужності в схемі, а, значить, чотириквadrантну роботу електропривода. Оскільки одним із ключових аспектів впровадження регульованого електропривода для двигунів змінного струму з середнім рівнем номінальної напруги є підвищення енергоефективності, то серед існуючих систем частотного керування доцільно обрати систему векторного керування через те, що вона демонструє більш високі енергетичні показники, ніж системи скалярного керування. Аналогічно до системи векторного керування, у якій здійснюється орієнтація системи координат, що обертається, за вектором потокозчеплення ротора, керування випрямлячем може здійснюватися з орієнтацією за вектором напруги.



**Рис. 1.** Структура чотириквadrантного електропривода на базі модульного багаторівневого випрямляча та інвертора

Одним із існуючих підходів до здійснення керування мережевими випрямлячами є система керування з орієнтацією за напругою (рис. 2). Дана система побудована аналогічно до систем векторного керування двигунами змінного струму, де орієнтація здійснюється за вектором потокозчеплення ротора з використанням системи координат  $dq$ , що обертається.



**Рис 2.** Структура системи керування випрямною частиною перетворювача енергії у складі електроприводу з реалізацією принципу орієнтації за вектором напруги

На першому етапі роботи системи виміряні напруги мережі ( $u_{ga}$ ,  $u_{gb}$ ,  $u_{gc}$ ) та виміряні струми ( $i_{ga}$ ,  $i_{gb}$ ,  $i_{gc}$ ) перетворюються до двофазної ортогональної системи координат  $dq$ , що обертається. У ортогональній системі координат активна та реактивна потужність, що споживаються перетворювачем, можуть бути записані так

$$P = \frac{3}{2}(i_{gd}u_{gd} - i_{gq}u_{gq}); \quad (1)$$

$$Q = \frac{3}{2}(i_{gd}u_{gq} - i_{gq}u_{gd}), \quad (2)$$

де  $i_{gd}$ ,  $i_{gq}$  – проекції вектору мережевого струму на осі системи координат dq,  $u_{gd}$ ,  $u_{gq}$  – проекції вектору напруги мережі на осі системи координат dq.

Рівняння (1) та (2) демонструють, що величини активної та реактивної потужності мають складну взаємозалежність від проекцій векторів напруги та струму мережі на осі системи координат, що обертається.

Проте, дані залежності можуть бути значно спрощені шляхом орієнтації додатного напрямку осі  $d$  за вектором напруги в мережі, як показано на рис. 3. При такому розміщенні векторів відносно системи координат dq, що обертається синхронно з вектором напруги мережі, проекція вектору  $u_g$  на вісь  $q$  стає рівною нулю, тобто  $u_{gq} = 0$ . При цьому проекція вектору  $u_g$  на вісь  $d$  стає постійною величиною, що дорівнює модулю даного вектору, тобто  $u_{gd} = |u_g|$ .

**Рис. 3.** Орієнтація векторів та систем координат мережевого модульного багаторівневого перетворювача

Рівняння активної та реактивної потужності в цьому випадку можуть бути записані так

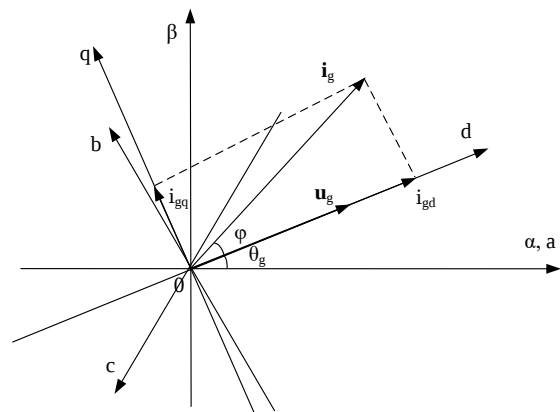
$$P = \frac{3}{2}i_{gd}u_{gd}; \quad (3)$$

$$Q = -\frac{3}{2}i_{gq}u_{gd}. \quad (4)$$

З отриманих рівнянь стає очевидним, що між величиною активної потужності  $P$ , споживаної перетворювачем з мережі, та проекцією мережевого струму на вісь  $d$  існує прямо пропорційна залежність. Аналогічна залежність спостерігається між величиною реактивної потужності  $Q$  та проекцією мережевого струму на вісь  $q$ . Таким чином, даний варіант орієнтації системи координат dq дозволяє розробити двоканальну систему керування мережевим перетворювачем, що здатна забезпечити роздільне керування величинами активної та реактивної потужності.

Для функціонування такої системи необхідно на кожному дискретному інтервалі часу визначати положення вектору напруги мережі, а в подальшому за допомогою блоків фазового автопідлаштування частоти (ФАЧ) визначати кут даного вектору  $\theta_g$ , який є необхідним для функціонування блоків координатних перетворень з нерухомої системи координат abc до системи координат dq, що обертається синхронно з вектором напруги мережі.

За аналогією до системи векторного керування двигунами змінного струму, система керування будується за принципом підлеглого керування, причому внутрішніми контурами є контури керування складовими вектору мережевого струму  $i_{gd}$  та  $i_{gq}$ . Зовнішніми сигналами системи керування з орієнтацією за напругою виступають величини необхідної напруги в ланці постійного струму  $U_{dc}^*$  та реактивної потужності  $Q^*$ , що споживається / віддається в мережу. Вихідними сигналами системи керування є сигнали керування силовими ключами модульного багаторівневого випрямляча. Таким чином, вимірювані трифазні струми мережі  $i_{ga}$ ,  $i_{gb}$  та  $i_{gc}$  з використанням величини кута повороту вектору напруги  $\theta_g$  перетворюються з нерухомої системи відліку abc до системи координат dq, що обертається синхронно з вектором напруги, з відповідними проекціями  $i_{gd}$  та  $i_{gq}$ , що відповідають значенням активного та реактивного струму мережі. Сигнал завдання напруги в ланці постійного струму  $U_{dc}^*$  порівнюється з поточним значенням даної напруги  $U_{dc}$ , а сигнал помилки обробляється регулятором напруги в ланці постійного струму. Вихідним сигналом даного регулятора є сигнал завдання складової струму  $i_{gd}^*$ , який порівнюється з реальним значенням даної складової  $i_{gd}$ , а сигнал помилки обробляється ПІ-регулятором струму по осі  $d$ .



Аналогічним чином побудовано контур керування реактивною потужністю: на основі сигналу завдання реактивної потужності  $Q^*$  розраховується величина струму завдання  $i_{gq}^*$  по осі  $q$  з використанням рівняння (5)

$$i_{gq}^* = -\frac{Q^*}{1.5u_{gd}}. \quad (5)$$

Необхідною умовою роботи такої схеми випрямлення в режимі підвищуючого перетворювача є наявність індуктивних елементів на стороні змінного струму та ємнісних елементів в ланцюзі постійного струму, а тому при складанні рівнянь стану системи необхідно врахувати наявність мережевої індуктивності  $L_g$ . Якщо напругу на клеммах випрямляча зі сторони змінного струму позначити як  $u_{1a}$ ,  $u_{1b}$  та  $u_{1c}$ , то рівняння, записані за другим законом Кірхгофа, для цього кола матимуть вигляд

$$L_g \frac{di_{ga}}{dt} + R_g i_{ga} = u_{ga} - u_{1a}; \quad (6)$$

$$L_g \frac{di_{gb}}{dt} + R_g i_{gb} = u_{gb} - u_{1b}; \quad (7)$$

$$L_g \frac{di_{gc}}{dt} + R_g i_{gc} = u_{gc} - u_{1c}. \quad (8)$$

Перетворимо складові рівнянь (6) – (8) з використанням рівнянь переходу до системи координат  $dq$ , що обертається

$$L_g \frac{di_{g\alpha}}{dt} \cos \theta + R_g i_{gd} + L_g \frac{di_{g\beta}}{dt} \sin \theta = u_{gd} - u_{1d}; \quad (9)$$

$$-L_g \frac{di_{g\alpha}}{dt} \sin \theta + R_g i_{gq} + L_g \frac{di_{g\beta}}{dt} \cos \theta = u_{gq} - u_{1q}. \quad (10)$$

Похідні складових струму  $i_{gd}$  та  $i_{gq}$  за часом можуть бути записані так

$$\frac{di_{gd}}{dt} = \frac{1}{L_g} (u_{gd} - u_{1d} - R_g i_{gd} + L_g \omega_g i_{gq}); \quad (11)$$

$$\frac{di_{gq}}{dt} = \frac{1}{L_g} (u_{gq} - u_{1q} - R_g i_{gq} - L_g \omega_g i_{gd}). \quad (12)$$

З наведених рівнянь видно, що існує перехресний зв'язок між процесами, що протікають по осям  $d$  та  $q$  завдяки наявності складових  $L_g \omega_g i_{gq}$  та  $L_g \omega_g i_{gd}$ . Задачею регуляторів складових струму по осям  $d$  та  $q$  є забезпечення мінімальної статичної та динамічної помилки керування відповідними величинами. Вихідним сигналом даних регуляторів є сигнали складових напруг завдання перетворювача по осям  $d$  та  $q$

$$u_{1d}^* = u_{gd} - R_g i_{gd} + L_g \omega_g i_{gq} - \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{p}\right) (i_{gd}^* - i_{gd}); \quad (13)$$

$$u_{1q}^* = u_{gq} - R_g i_{gq} - L_g \omega_g i_{gd} - \left(k_{p1} + \frac{k_{i1}}{p}\right) (i_{gq}^* - i_{gq}), \quad (14)$$

де  $k_{p1}$  та  $k_{i1}$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної частин ПІ-регуляторів струму.

Для отримання високих показників якості необхідно знайти аналітичні залежності, що дозволили б розрахувати значення коефіцієнтів ПІ-регуляторів струму. Запишемо рівняння для узагальнених векторів напруги і струму, отримане з використанням перетворення Лапласа

$$U(p) = R_g \cdot I(p) + L_g \cdot I(p) \cdot p. \quad (15)$$

Отже, передатна функція об'єкту керування у контурі струму

$$W_{i-u}(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{1}{pL_g + R_g}. \quad (16)$$

Використаємо регулятор з внутрішньою моделлю (ІМС-регулятор). Синтез таких регуляторів виконується, виходячи з параметрів моделі об'єкту керування та необхідної ширини смуги пропускання контуру керування. В даному випадку передатна функція замкненого контуру струму повинна відповідати аперіодичній ланці першого порядку з частотою зрізу, що дорівнює частоті зрізу контуру

$$W_i(p) = \frac{\omega_i}{p + \omega_i}. \quad (17)$$

Передатна функція ПІ-регулятора струму

$$W_{pc}(p) = k_{pi} + \frac{k_{ii}}{p}. \quad (18)$$

Тоді передатна функція замкненого контуру струму може бути записана так

$$W_{pc}(p) = \frac{\omega_i}{pW_{i-u}(p)} = \frac{\omega_i}{p(R_g + pL_g)} = \omega_i L_g + \frac{\omega_i R_g}{p}. \quad (19)$$

Таким чином, коефіцієнти пропорційної та інтегральної частини ПІ-регулятора струму можна визначити так

$$k_{pi} = \omega_i L_g; \quad (20)$$

$$k_{ii} = \omega_i R_g, \quad (21)$$

де  $\omega_i$  – кутова частота зрізу контуру струму.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Розглянуто схему модульного багаторівневого перетворювача у якості мережевого випрямляча. Для керування ключами модулів схеми використано систему з орієнтацією за вектором мережевої напруги. Дана система дозволяє забезпечити роздільне керування величинами активної та реактивної потужності. Отримано аналітичні залежності, що описують функціонування даної системи. Запропоновано варіант вибору параметрів регуляторів струму системи керування перетворювачем. В якості напрямку подальших досліджень слід виділити створення математичної моделі для всебічного дослідження роботи даної системи керування в умовах зміни керуючих та збурюючих величин.

#### Список літератури

1. Козакевич І.А. Керування потоками потужності гібридних транспортних засобів / І.А. Козакевич, Ю.Г. Осадчук, Р.А. Льченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 124-129.
2. Козакевич І.А. Система енергоефективного керування динамічним компенсатором викривлень напруги / І.А. Козакевич, А.А. Кондратенко // Гірничий вісник. – 2019. – Випуск 105. С. 154-159.
3. Козакевич І.А. Дослідження роботи синхронного двигуна з постійними магнітами в гібридних тягових електроприводах / І.А. Козакевич, І.В. Касаткіна, Л.В. Єрьоменко // Гірничий вісник. – 2018. – Випуск 104. С. 106-110.
4. Козакевич І.А. Система керування вентильними реактивними двигунами / І.А. Козакевич, І.І. Шевченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 135-138.
5. Сінчук І.О. Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізничних підприємств / І.О. Сінчук, І.А. Козакевич, М.Л. Барановська, Т.М. Берідзе, І.І. Пересунько // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2020. – Вип. 50. С. 142-147.
6. Utvić M. Generalized theory on direct arm energy control in modular multilevel converters / M. Utvić, D. Dujić // CPSS Transactions on Power Electronics and Applications. – 2020. – Vol. 5, iss. 4. – Pp. 388-399.
7. Du S. Common-Mode Voltage Minimization for Grid-Tied Modular Multilevel Converter / S. Du, B. Wu, N. Zargari // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2019. – Vol. 66, iss. 10. – Pp. 7480-7487.
8. Hao Q. Operating region and boundary control of modular multilevel converter station under unbalanced grid conditions / Q. Hao, B. Li, Y. Sun, L. Wu, S. Wang // IEEE Transactions on Power Delivery. – 2020. – Vol. 35, iss. 3. – Pp. 1146-1157.
9. Hu P. A Currentless Sorting and Selection-Based Capacitor-Voltage-Balancing Method for Modular Multilevel Converters / P. Hu, R. Teodorescu, S. Wang, S. Li, J. M. Guerrero // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2019. – Vol. 34, iss. 2. – Pp. 1022-1025.
10. Wang C. Design and Application of the SFCL in the Modular Multilevel Converter Based DC System / C. Wang, B. Li, J. He, Y. Xin // IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2017. – Vol. 27, iss. 4. – Pp. 1-4. doi: <https://doi.org/10.1109/TASC.2017.2652489>

УДК 004.896:681.3:621.311

І.А. КОТОВ, канд. техн. наук, доц.  
Криворізький національний університет

### ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПІДТРИМКА АВТОМАТИЗАЦІЇ ДИСПЕТЧЕРСЬКОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМОЇ З УРАХУВАННЯМ ІМОВІРНІСНОГО ХАРАКТЕРУ НАВАНТАЖЕННЯ ВУЗЛІВ

**Метою статті** є виклад результатів дослідження з розробки і впровадження методів отримання числових характеристик оперативного керування режимом енергосистеми в аварійних ситуаціях та побудови на цій основі бази знань інтелектуальної системи автоматизації керування. Розглянуті підходи до інтелектуальної підтримки автоматизації прийняття управлінських рішень диспетчерського персоналу енергосистеми. Величини керуючих впливів формуються як елементи матриці чутливості контрольованих параметрів режиму до регульованих навантажень споживачів. В якості додаткового завдання поставлено врахування імовірнісного характеру навантаження вузлів.

**Методи дослідження** полягають у використанні методів теорії імовірності, теорії множин, математичної логіки, теорії автоматів, електроенергетичних систем, теорії графів, математичної статистики. Величини керуючих впливів формуються в результаті планування та реалізації розрахункових експериментів оцінки множини аварійних режимів електричної мережі енергосистеми. Враховано закони розподілу випадкових величин навантажень споживачів.

**Наукова новизна** полягає в новій моделі включення різних форм лінгвістичних знань, представлених єдиною онтологічною моделлю, та числових параметрів чутливості режиму енергосистеми до керуючих дій у інтегровану базу знань, що дозволяє створити побудову ефективних інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень та

впровадження їх в діючу автоматизовану диспетчерську систему диспетчерського керування. Величини керуючих дій обчислюються з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів електричної мережі.

**Практична значимість** дослідження передбачає побудову бази знань диспетчерського керування режимом електричної мережі з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів, що дозволяє реалізувати програмний комплекс системи підтримки прийняття рішень, спрямованої на автоматизацію диспетчерського керування в режимі нормального та аварійного режимів енергосистем. Застосування запропонованого підходу до побудови бази знань та його використання для підтримки прийняття рішень персоналом диспетчерської служби підвищує надійність керування та збільшує час безперервної роботи оперативного персоналу із забезпеченням надійної ліквідації аварій.

**Результатами роботи** є методи отримання та побудови бази професійних знань з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів для підтримки диспетчерського керування режимами енергосистем. Результати розрахунків для аварійного режиму дозволяють будувати функції впливу та визначати коефіцієнти матриці чутливості. Отримані набори даних режимів, що використовуються як компоненти бази знань, дозволяють ефективно оцінювати та корегувати аварійний режим шляхом автоматизації інтелектуальної підтримки процесу його диспетчеризації.

**Ключові слова:** аббревіатура, аварійний режим, закон розподілу, ймовірність, матриця чутливості, режим, сенсорна точка, цільова функція

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-95-104

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Аналіз сучасних тенденцій розвитку засобів автоматизації диспетчерського керування електроенергетичних систем (ЕЕС) показує значне зростання складності подібних систем і збитків від аварійних ситуацій в енергосистемах. При цьому, виникає суперечність між зростанням складності сучасних ЕЕС, збитками від аварійних ситуацій і існуючими обмеженими можливостями використання систем підтримки прийняття рішень (СППР) оперативного диспетчерського персоналу (ОДП). Тому необхідна масова розробка і впровадження СППР в середу діючих автоматизованих систем диспетчерського керування (АСДК).

Однак, в даний час основною проблемою при побудові СППР є складність формалізації та інтерпретації їх баз знань (БЗ). Існуюча практика використання промислових систем підтримки прийняття рішень передбачає їх переважно індивідуальне проектування з високою вартістю і тривалим терміном розробки. Тому необхідно констатувати, що для автоматизації процесу інтелектуалізації керування режимами енергосистем необхідна уніфікація виробництва систем підтримки рішень. Така уніфікація повинна базуватися на комплексному підході до отримання знань про об'єкт керування. Тому існує актуальна проблема здобування знань оперативного керування режимами енергосистем для побудови баз знань диспетчерських інтелектуальних комплексів.

Рішення зазначеної проблеми передбачає максимальне зниження невизначеності вихідної інформації, особливо при плануванні і оперативному керуванні режимами ЕЕС. Це обумовлюється відсутністю надійних прогнозів рівнів очікуваного навантаження і генеруючих потужностей вузлів системи, що призводить до неможливості строго обґрунтування використовуваних величин питомих збитків від недовідпуску електроенергії споживачам. Ця обставина різко обмежує ефективне застосування аналітичних методів, що надійно працюють. Тому в більшості випадків доводиться ідеалізувати причинно-наслідкові залежності між характеристиками вузлів системи і відповідними моделями. На цьому тлі при розробці відповідних математичних моделей велика складність і ієрархічність організації сучасних ЕЕС не дозволяють об'єктивно оцінювати показники режимів роботи споживачів.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Створення і наповнення БЗ є найважливішим етапом побудови і впровадження інтелектуальної системи. У якості джерела знань професійної області в роботі визначені об'єкти керування – фрагмент електричної мережі та параметри її режиму, а також нормативна документація диспетчеризації режимів ЕЕС. Однак, знання про об'єкт керування базуються на детермінованих значеннях навантажень вузлів системи, що вносить суттєві похибки в прийняті рішення. Тому задача урахування імовірнісного характеру навантажень споживачів є актуальною, і її ефективне рішення повинно підвищити достовірність оцінок режимів роботи ЕЕС [1, 2]. У реальних умовах експлуатації енергосистем навантаження споживачів є випадковими величинами, і закони їх розподілу визначаються статистичними даними, на основі яких визначаються оцінки техніко-економічних показників режимів роботи ЕЕС [2, 3]. Отже, отримання знань про об'єкт управління має обов'язково враховувати імовірнісні характеристики навантажень споживачів.

Відомо, що в основі керування знаннями знаходиться проблема здобування знань (Knowledge Mining). В міру ускладнення і поглиблення структуризації предметних областей ускладнюються способи здобування знань, яким присвячено безліч спеціалізованих досліджень [4 – 6].

В роботі [7] проаналізовані методи керування і повторного використання знань. Проведено класифікацію підходів до повторного використання знань в малих і середніх підприємствах. Відзначено, що необхідні нові організаційні структури подання і використання знань в масштабах організації. Робота [8] присвячена особливостям застосування методів керування знаннями для різних секторів і промислових галузей, детально систематизовані методи та інструменти керування знаннями. Зазначено, що ефективність вкладень підприємств у системи керування знаннями є недостатньою. В [9] зазначено, що використання професійних знань сьогодні призвело до нової хвилі цифрової трансформації на базі штучного інтелекту. Робота [10] присвячена інтелектуальному аналізу великих даних. Аналіз показав, що в постійно мінливому промисловому середовищі і умовах невизначеності вилучення та інтелектуальне керування великими даними і знаннями стикається зі значними труднощами.

У завданнях вилучення знань особливу роль має їх уніфікація на основі добре формалізованих інтерпретованих моделей. До таких моделей, перш за все, слід віднести формалізми онтологій. В [11] показана актуальність розробки системи онтологій для узгодженості досліджень в області підтримки прийняття стратегічних рішень в енергетиці. Робота [12] розглядає модель онтологій стосовно слабоформалізованих областей. Обґрунтована необхідність розробки узагальнюючих моделей онтологій для процесів підтримки прийняття рішень в слабоформалізованих професійних областях. В [13] запропонована математична модель репрезентації знань на основі фрактального підходу. В роботі [14] розглянути підходи до використання моделі онтологій для пошуку і отримання професійної інформації. В [15] розглянуто формування та використання накопичених знань геологічного характеру для побудови геоінформаційних та комунікаційних систем при підготовці кваліфікованих інженерних кадрів. Робота [16] присвячена використанню систем подання знань для керування інтегрованими енергосистемами на основі інтелектуалізації процесу підтримки прийняття рішень. Наведено методику отримання знань про режим електричної мережі. Запропоновано схему інтеграції системи підтримки прийняття рішень в середу апаратно-програмних засобів автоматизованої системи диспетчерського керування. В [17] досліджено використання розрахункових даних технологічного процесу видобутку і обробки природних копалин для скорочення електроспоживання в гірничодобувній промисловості. При цьому зазначено, що критично важливим є ефективний розподіл електричної енергії між споживачами всередині гірничодобувної компанії.

Аналіз показав, що особливе значення має розробка, впровадження та застосування інтелектуальних систем підтримки рішень в області керування великими системами енергетики. Слід відзначити значний внесок в теорію і методологію побудови та використання інтелектуальних програмних засобів в області диспетчерського керування енергосистемами, який внесли вітчизняні та зарубіжні вчені: Вагін В.М., Веников В.А., Вороненко Д.І., Воропай Н.І., Геловані В.А., Єремєєв А.П., Єремєєв Л.П., Кошєєв Л.А., Купершмідт Ю.Я., Ларін О.М., Лебедєв Л.С., Любарський Ю.Я., Массел Л.В., Моржін Ю.І., Поспєлов Д.А., Самойлов В.Д., Стогній Б.С., Терелянський П. В., Хорошевський В.Ф., Чачко А.Г., Badami M., Daniel J., Ragsdale CT, Yao F.S.

У якості загальноприйнятих і ефективних рішень в області підвищення продуктивності диспетчерського керування ЕЕС і зниження збитків аварійних ситуацій необхідно відзначити інтелектуалізацію електричних мереж (SmartGrid) [18] і інтелектуальні системи підтримки диспетчерських рішень [19]. Аналіз науково-дослідних і практичних робіт в зазначених професійних областях показує значні успіхи і практично значущі результати. З іншого боку, є нагальна потреба в розробці нових підходів і методів комп'ютерного застосування професійних знань керування складними промисловими комплексами. Становище ускладнюється постійним ускладненням організаційної структури керування, зростанням вартості обладнання і значним збільшенням збитків від аварійних ситуацій.

**Постановка завдання.** Аналіз показує, що в багатьох дослідженнях детально розглянуті аспекти інженерії знань і методи їх формалізації. Однак, отримання знань в різних професійних середовищах і, зокрема, в галузі управління режимами електроенергетичних систем, вимагає специфічних підходів, які не отримали достатнього висвітлення. Зокрема, потрібно урахування

імовірнісного характеру навантаження споживачів. Проведений аналіз показує, що в науково-технічній літературі недостатньо розроблені і висвітлені методи отримання і формалізації знань про параметри режимів електричної мережі. Крім того, відсутні конкретні рекомендації по інкорпорації знань про керуючі режимні впливи і інструктивні диспетчерські матеріали.

Таким чином, існує актуальна проблема здобування знань з масиву стохастичних даних, які характеризують конкретну аварійну ситуацію в енергосистемі, їх інтеграція з інструктивними диспетчерськими матеріалами і формалізація в єдиній онтологічній моделі.

**Викладення матеріалу та результати.** Очевидно, що величини керуючих впливів повинні бути пропорційні очікуваному коригуючому ефекту. Тому повинне вирішуватися завдання визначення чутливості контрольованих параметрів по відношенню до керуючих впливів. Зокрема, можуть використовуватися такі критерії чутливості

$$Q_V = \frac{\partial V_i}{\partial Q_j}, \quad P_V = \frac{\partial V_i}{\partial P_j}, \quad (1)$$

де  $\partial V_i$  – зміна напруги в контрольованому  $i$ -ому вузлі;  $\partial Q_j$  – зміна реактивної потужності в регульованому  $j$ -ому вузлі;  $\partial P_j$  – зміна активної потужності в регульованому  $j$ -ому вузлі.

Коефіцієнти чутливості, що відображають множину керуючих впливів на множину параметрів, що контролюються, утворюють матрицю чутливості. У першому наближенні елементи матриці чутливості можуть бути виражені коефіцієнтами лінійної регресії. Таким чином, матриця чутливості може прийматися як компонент знань експертної керуючої системи про величини і напрямки керуючих впливів по відношенню до конкретної електричної мережі в конкретній аварійній ситуації. На цій основі можуть бути автоматизовані диспетчерські управлінські рішення.

Визначення взаємних коефіцієнтів чутливості вимагає масових розрахунків режиму ЕЕС. Для реалізації таких розрахунків проведено порівняльний аналіз існуючих програмних пакетів і обраний комплекс – RastrWin3 [20]. В якості розрахункової математичної моделі електричної мережі енергосистеми прийнята система нелінійних рівнянь вузлових напруг у вигляді балансу потужностей. Рівняння представлені окремо для активних і реактивних значень потужностей і провідностей. Невідомими є модулі і фази напруги у вузлах, як показано нижче.

$$\begin{aligned} \omega_{Pk} &= P_k - g_{kk}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (g_{kj} \cos \delta_{kj} - b_{kj} \sin \delta_{kj}), \\ \omega_{Qk} &= Q_k - b_{kk}U_k^2 - U_k \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n+1} U_j (b_{kj} \cos \delta_{kj} + g_{kj} \sin \delta_{kj}), \\ \delta_{kj} &= \delta_k - \delta_j; \quad k = \overline{1, n}. \end{aligned} \quad (2)$$

Розрахунок проводився методом Ньютона. В результаті розрахунків аварійного режиму отримані дані для побудови функцій впливу і коефіцієнтів матриці чутливості. У першому наближенні побудовано лінійні регресії. Матриця впливу має вигляд, наведений в табл. 1.

Таблиця 1

Матриця впливу для сенсорних точок

| Керуючі чинники | U (СШ 150 кВ ПС Павлоградська-330), кВ | I (Л-82-1), А         | I (Л-82-2), А         |
|-----------------|----------------------------------------|-----------------------|-----------------------|
| P (Л-ДН-1)      | -0.2788P25 + 121.600                   | 8.317P25 + 1093.2847  | 8.2212P25 + 883.6200  |
| Q (Л-ДН-1)      | -0.2077Q25 + 115.535                   | 5.3824Q25 + 1279.7342 | 5.4382Q25 + 1065.3945 |
| P (Л-ДН-2)      | -0.2386P29 + 116.955                   | 7.2892P29 + 1218.7947 | 7.1659P29 + 1008.6350 |
| Q (Л-ДН-2)      | -0.1815Q29 + 114.295                   | 4.7302Q29 + 1319.2247 | 4.7637Q29 + 1105.5450 |

На основі розрахункових даних динаміки інтенсивностей керуючих впливів і епюр напруг уздовж відповідальних радіусів електричної мережі побудована база знань. Для зберігання обраний уніфікований формат XML. Фрагмент файлу даних епюр напружень, прийнятий в якості знань про керування режимом і призначений для завантаження в БЗ, проілюстрований на лістингу нижче.

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
```

```

<data-set xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <record>
    <P>2.00</P>
    <P_unit>МВт</P_unit>
    <node>3</node>
    <U>116.02</U>
    <U_unit>кВ</U_unit>
  </record>
  <record>
    <P>4.00</P>
    <P_unit>МВт</P_unit>
    <node>3</node>
    <U>115.59</U>
    <U_unit>кВ</U_unit>
  </record>
  <!-- ..... -->
</data-set>

```

Фрагмент файлу даних коефіцієнтів матриці впливу для сенсорних точок проілюстрований на наступному лістингу.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<data-set xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <parameter U = "U (СШ 150 кВ ПС Павлоградська-330)">
    <factor name = "P (Л-ДН-1)">
      <b0>121.600</b0>
      <b>-0.2788</b>
    </factor>
  </parameter>
  <!-- ..... -->
</data-set>

```

Отримані файли режимних даних, використовуваних як компоненти бази знань, дозволяють здійснювати оперативну оцінку тяжкості аварійного режиму, а також його диспетчерську корекцію.

Разом з розрахунковими параметрами інтенсивностей керуючих впливів базу знань становлять також лінгвістичні концепти, факти і правила інструктивних диспетчерських матеріалів. Для побудови БЗ також зроблена вибірка з інструкцій, які розглядаються як джерело достовірних знань оперативного управління аварійним режимом.

На основі зазначеного лінгвістичного корпусу побудований тезаурус професійних концептів БЗ. З лінгвістичних концептів виділені професійні терміни і аббревіатури. Фрагмент файлу концептів тезауруса професійної області наведено нижче.

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="yes"?>
<data-set xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance">
  <thesaurus>
    <base_info>
      <base_date>22.08.2020</base_date>
      <base_context>instruction_12</base_context>
      <base_type>concept</base_type>
      <base_admin>admin</base_admin>
    </base_info>
    <concept id = "0001">
      <type>action</type>
      <context_type>instruction_12</context_type>
      <concept_date>22.08.2020</concept_date>
      <content>трансформатор</content>
    </concept>
    <!-- ..... -->
  </thesaurus>
</data-set>

```

Аналогічним чином будується сховище професійних термінів, аббревіатур, фактів і продукцій.

Вище було відзначено, що здобування знань оперативного керування режимами енергосистем передбачає максимальне зниження невизначеності вихідної інформації, особливо при плануванні і оперативному керуванні режимами ЕЕС. Це обумовлюється відсутністю надійних прогнозів рівнів очікуваного навантаження і генеруючих потужностей вузлів системи, що призводить до неможливості строго обґрунтування використовуваних величин питомих збитків від недовідпуску електроенергії споживачам. Тому, при формуванні бази знань диспетчерського керування необхідне урахування імовірнісного характеру навантаження вузлів споживачів.

Як відомо, випадковий характер навантаження системи обумовлюється нерегулярними коливаннями навантажень і помилками прогнозу їх очікуваних рівнів. Нерегулярні коливання навантаження відіграють істотну роль в оцінці експлуатаційних режимів, а помилки прогнозу – перспективних режимів роботи ЕЕС. В останньому випадку, припускаючи підпорядкованість випадкових величин навантажень нормальному закону, щільність розподілу навантаження системи можна визначити за відомим виразом

$$f(P) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(P_n - m)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3)$$

де  $m$  — математичне очікування випадкової величини ( $P_n$ ) активної потужності навантаження системи;  $\sigma$  — середньоквадратичне відхилення випадкової величини  $P_n$ .

Будемо вважати, що ймовірність відхилення фактичного навантаження вузла від прогнозованого значення  $R(P_{ij})$  підпорядковується нормальному закону розподілення. Тоді ймовірність відхилення навантаження від прогнозованого значення  $P_{ij}$  в  $j$ -му часовому розрізі на величину  $\Delta P_{ij}$  внаслідок помилок прогнозу, може бути оцінена за виразом

$$p_{ij} = \frac{1}{2} \Phi \left( \frac{\Delta P_{ij} + \frac{\Delta P_{rj}}{2}}{\sigma_j \sqrt{2}} \right) - \Phi \left( \frac{\Delta P_{ij} - \frac{\Delta P_{rj}}{2}}{\sigma_j \sqrt{2}} \right), \quad (4)$$

де  $i$  — поточний номер інтервалу, відповідний ряду відхилень навантажень від прогнозованих значень;  $i=1 \dots I$ , де  $I$  — максимальний номер інтервалу;  $j=1 \dots I$  — поточний індекс розглянутої зони графіка навантаження;  $\Delta P_{ij}$  — передбачуваний інтервал відхилення навантаження  $P_{ij}$  від прогнозованого значення в  $j$ -й часовій зоні графіка навантаження (величини  $\Delta P_{ij}$  повинні бути рівні або кратні величинам  $\Delta P_{rj}$ );  $\Delta P_{rj}/2$  — крок відхилення навантажень від прогнозованих значень;  $\Phi$  — функція Лапласа (інтеграл ймовірностей), що обчислюється за відомими величинами  $P_{ij}$  і  $\Delta P_{ij}$ ;  $\sigma$  — середньоквадратичне відхилення навантажень від величини  $P_{ij}$ .

В результаті реалізації виразу (2) за всіма  $i$ -ми інтервалами отримують ряд розподілу ймовірності  $R(P_{ij})$ . Далі, перемноживши отримані ряди розподілу  $R(P_{ij})$  на відповідні значення ряду навантажень  $R(P_{ij})$ , отримують новий ряд  $R(P_{ij})$  навантажень системи, скоригований з урахуванням помилок прогнозу.

Врахування імовірнісного характеру навантажень особливо необхідне при багатокритеріальному аналізі режимів роботи ЕЕС, що описує відповідні зв'язки між досліджуваними критеріями (функціями мети) і групами параметрів, що оптимізуються, у вигляді нелінійних залежностей. Саме тому помилки у визначенні достовірних рівнів навантаження вузлів системи істотно впливають на кількісні значення величин параметрів, що оцінюються.

Слід очікувати, що імовірнісний характер навантаження ЕЕС призведе до уточнення положення глобального мінімуму цільової функції і до отримання більш достовірних чисельних значень досліджуваних критеріїв оцінки перспективних режимів роботи ЕЕС.

Рішення завдання керування режимом роботи ЕЕС завжди пов'язане з розглядом безлічі критеріїв, які потребують, в залежності від їх характеристик, або нормалізації, або введення в розрахунок коефіцієнтів важливості критеріїв. Кількість критеріїв і ступінь їх важливості можуть змінюватися в часі в певних межах.

Цільова функція оцінки режиму з урахуванням коефіцієнтів важливості критеріїв при врахуванні імовірнісного характеру навантаження може бути записана у вигляді

$$F(P, Q) = \sum_{j=1}^J \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M P_{ij} \alpha_{mj} \Phi_{mj}(P_{nij}) \right] \Delta t_{ij} \rightarrow \min,$$

$$\alpha_{mj} = \alpha_{mj}(t), \quad \sum_{m=1}^M \alpha_{mj}(t) = 1, \quad (5)$$

де  $\alpha_{mj}$ ,  $m=1, M$  – вектор розподілу коефіцієнтів важливості критеріїв  $\Phi_{1j}$ ,  $\Phi_{2j}$ ,  $\Phi_{3j}$ , ...,  $\Phi_{mj}$  в  $j$ -му розрізі графіка навантаження;  $m$  – поточний індекс критерію;  $\Delta t_{ij}$  – тривалість  $j$ -ї зони розглянутого графіка навантаження системи.

На практиці оцінка значень коефіцієнтів важливості критеріїв може здійснюватися досвідченими диспетчерами енергосистем, які керують оперативними режимами ЕЕС.

Рішення завдання керування режимом роботи ЕЕС з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів можна ефективно здійснити на основі використання експериментально-статистичних методів, зокрема, методів екстремального планування експерименту.

В роботі обраний кластер ЕЕС, що містить 7 генеруючих вузлів (з урахуванням балансуєчого пункту), 13 навантажувальних вузлів і 27 гілок. Була визначена статистична сукупність величин в обсязі  $n = 96$  значень активних потужностей навантаження системи. Весь діапазон спостережуваних випадкових значень потужності ( $1300 \leq P_n \leq 2200$  МВт) розбитий на дев'ять розрядів з інтервалом по  $\Delta P = 100$  МВт. Підраховано кількість випадкових величин навантажень системи ( $m_i$ ), які припадають на кожен  $i$ -й розряд. На цій підставі визначені частоти ( $P^*_i = m_i / n$ ) і побудований статистичний ряд розподілу навантажувальних потужностей системи.

Результати розрахунків функції розподілу  $F^*(P)$  і значення статистичної щільності розподілу  $f^*(P)$ , отриманих на основі статистичної інформації, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Розрахункові показники розподілу навантаження

| Найменування показників                                    | Чисельні значення параметрів |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |                      |
|------------------------------------------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Діапазон значень потужності, $P_i$ , МВт                   | 1300-1400                    | 1400-1500            | 1500-1600            | 1600-1700            | 1700-1800            | 1800-1900            | 1900-2000            | 2000-2100            | 2100-2200            |
| Поточний номер розряду, $m_i$ , о.е.                       | 1                            | 3                    | 8                    | 18                   | 26                   | 21                   | 9                    | 8                    | 2                    |
| Значення розподілу частоти $i$ -го розряду, $P^*_i$ , в.о. | 0.0104                       | 0.0310               | 0.0830               | 0.1870               | 0.2710               | 0.2190               | 0.0940               | 0.0830               | 0.0210               |
| Значення функції розподілу, $F^*(P)$ , в.о.                | 0.0104                       | 0.0114               | 0.1244               | 0.3114               | 0.5820               | 0.8610               | 0.8950               | 0.9784               | 1.0000               |
| Значення статистичної щільності розподілу $f^*(P)$ , в.о.  | $0.9 \cdot 10^{-4}$          | $42.8 \cdot 10^{-4}$ | $7.48 \cdot 10^{-4}$ | $16.8 \cdot 10^{-4}$ | $24.4 \cdot 10^{-4}$ | $19.7 \cdot 10^{-4}$ | $8.47 \cdot 10^{-4}$ | $7.48 \cdot 10^{-4}$ | $1.89 \cdot 10^{-4}$ |

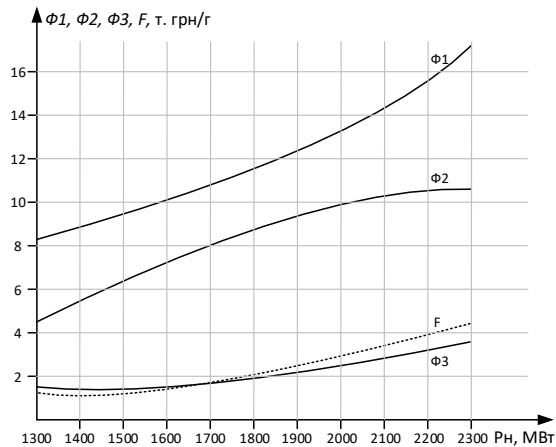
Розрахункові значення функції  $F^*(P)$  відповідають максимальним величинам потужностей по кожному  $i$ -му інтервалу, а статистична щільність розподілу  $f^*(P)$  визначена відповідно до експериментальних даних.

Як впливає з даних табл. 2, ймовірність випадкового розподілу навантаження системи підпорядковується нормальному закону розподілу. Отже, вважаючи, що випадкова величина активної потужності навантаження системи також підпорядкована нормальному закону, можна подати рівняння щільності розподілу навантаження наступним чином

$$f(P) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(P_n - m)^2}{2\sigma^2}} = \frac{1}{575.88} e^{-\frac{(P - 1773.1)^2}{10561608}},$$

де  $m = \sum_{i=1}^{96} P_i / 96 = 1773.1$  – математичне очікування випадкової величини активного навантаження системи, МВт;  $\sigma = \sqrt{D} = \sqrt{52840.8} = 229.87$  – середньоквадратичне відхилення випадкової величини потужності;  $D = a - m^2 = 3196873.8 - 1773.142^2 = 52840.8$  – дисперсія випадкової величини потужності;  $a = \sum_{i=1}^J (P_i^2) / 96$  – постійний коефіцієнт.

В якості критеріїв оцінки режиму роботи ЕЕС прийняті:  $\Phi_1$  – критерій, що відображає мінімум витрат, пов'язаних з витратою палива в системі;  $\Phi_2$  – критерій мінімуму шкоди, пов'язаного з викидом тепловими електростанціями шкідливих речовин в атмосферу;  $\Phi_3$  – критерій максимуму забезпечення надійності джерел генерації. Динаміка зміни критеріїв представлена на рис. 1.

Рис. 1. Зміння критеріїв-  $\Phi_i(P)$  і функції мети-  $F(P)$ 

методу планування експерименту, зокрема, з використанням ортогонального центрального композиційного плану (ОЦКП).

Динаміка зміни власних коефіцієнтів ( $b_1, b_2, b_3$ ) цільової функції  $F(P)$  при реалізації експерименту за допомогою ОЦКП при різних значеннях навантажень приведена на рис. 2.

Як випливає з рис. 2, чисельне значення градієнта цільової функції  $\partial F(P)/\partial P$  змінюється нерівномірно при зміні потужності навантаження системи. При цьому, динаміка зміни по кожному s-му фактору ( $P_s, s = 1, 3$ ) різна: найбільш інтенсивна зміна має місце по другому фактору, потім по третьому і, нарешті, по першому. Діапазони зміни градієнта цільової функції по факторам відповідно складають

$$\partial F(P)/\partial P_1 = (-0.1690 - 0.3380);$$

$$\partial F(P)/\partial P_2 = (-0.3280 - 0.5326);$$

$$\partial F(P)/\partial P_3 = (-0.0350 - 0.4840).$$

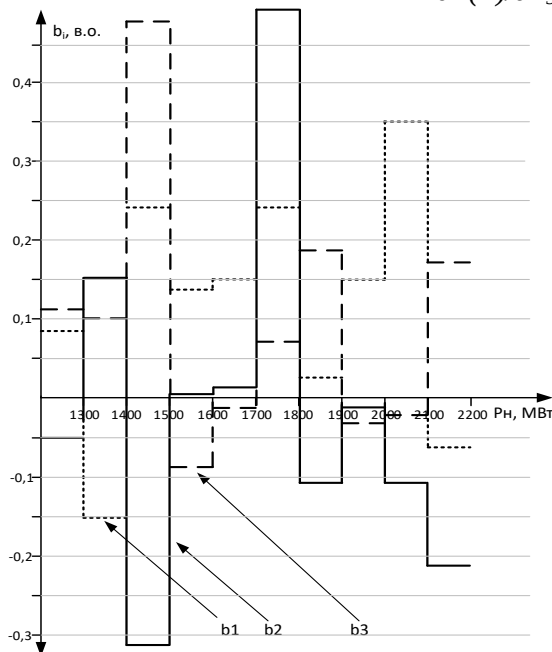


Рис. 2. Динаміка зміни коефіцієнтів цільової функції

чисельних значень критеріїв за рахунок підвищення достовірності величин параметрів, що оптимізуються. Це підтверджує досягнення більш глибокого мінімуму цільової функції за рахунок уточнення фактичних оптимальних значень варійованих змінних при обліку імовірнісного характеру навантажень.

Оскільки всі перераховані вище критерії оцінки режиму роботи ЕЕС є однорідними і рівноцінними, тобто виражаються в однакових розмірностях, то величина функції мети може бути визначена простим додаванням значень перерахованих критеріїв для досліджуваної точки факторного простору.

Як випливає з рис. 1, в прийнятих інтервалах зміни потужності системи величини критеріїв і функції мети мають явно виражений нелінійний характер при збільшенні активної потужності навантаження.

У якості математичної моделі, що відбиває залежність цільової функції від варійованих факторів, обрана нелінійна залежність поліноміального виду. Остання реалізується на основі

Нерівномірність градієнта цільової функції щодо запропонованих факторів визначається різницею техніко-економічних показників генеруючих джерел. Збільшення градієнта цільової функції пояснюється відмінністю сукупності техніко-економічних характеристик розглянутих джерел генерації і балансуємого пункту, особливо при збільшенні навантаження системи, коли балансуєчий пункт працює з граничною наявною потужністю.

Після формування функції мети у вигляді полінома другого порядку реалізована оптимізація режиму ЕЕС методом ковзного допуску з урахуванням імовірнісного характеру зміни навантаження і при заданому середньому значенні навантаження системи – 1773,1 МВт.

Динаміка зміни величин критеріїв в результаті розрахунку приведена в табл. 3.

Аналіз даних табл. 3 підтверджує припущення про те, що облік імовірнісного характеру навантажень призводить до уточнення

Динаміка змін критеріїв

| Умова рішення задачі                                                        |                                                     | Динаміка зміни критеріїв               |                                        |                                        |                                   |
|-----------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------------|
|                                                                             |                                                     | $\Phi_1(P)$ ,<br>$\times 10^3$ грн/год | $\Phi_2(P)$ ,<br>$\times 10^3$ грн/год | $\Phi_3(P)$ ,<br>$\times 10^3$ грн/год | $F(P)$ ,<br>$\times 10^3$ грн/год |
| З урахуванням імовірнісного характеру навантаження                          | початкове значення                                  | 7.457                                  | 1.708                                  | 2.714                                  | 11.879                            |
|                                                                             | оптимальне значення                                 | 7.092                                  | 1.440                                  | 2.091                                  | 10.623                            |
| Без урахування імовірнісного характеру навантаження                         | початкове значення                                  | 7.626                                  | 1.810                                  | 2.830                                  | 12.266                            |
|                                                                             | оптимальне значення                                 | 7.340                                  | 1.550                                  | 2.430                                  | 11.320                            |
| Зміна значень критеріїв при врахуванні імовірнісного характеру навантаження |                                                     | 0.169                                  | 0.102                                  | 0.126                                  | 0.397                             |
| Зниження значень критеріїв                                                  | з урахуванням імовірнісного характеру навантаження  | 0.365                                  | 0.267                                  | 0.723                                  | 1.356                             |
|                                                                             | без урахування імовірнісного характеру навантаження | 0.286                                  | 0.260                                  | 0.400                                  | 0.946                             |

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Врахування імовірнісного характеру навантажень ЕЕС призводить до уточнення чисельних значень критеріїв оцінки режимів і дозволяє отримати більш глибокий мінімум цільової функції керування за рахунок виявлення реальних значень навантажень системи і відповідного перерозподілу потужностей між генеруючими джерелами ЕЕС.

В роботі проведено планування і проведення масового факторного розрахункового експерименту. На основі отриманих результатів розраховані параметри регресії впливу управляючих впливів на параметри сенсорних точок. Побудовані компоненти матриці чутливості параметрів режиму електричної мережі до керуючих впливів диспетчерських корекцій аварійного режиму. Проведена формалізація і інкорпорація коефіцієнтів матриці чутливості в загальну базу знань разом з диспетчерськими інструктивними матеріалами. Зроблено оцінку ефекту від використання в інтелектуальній системі знань про керування аварійним режимом енергосистеми з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів споживачів. На основі отриманих результатів можна зробити висновок про достатню ефективність отримання коефіцієнтів чутливості і використання їх в якості знань диспетчерського керування по коригуванню аварійного режиму.

Змістом подальших досліджень є розширення методів отримання знань про режими роботи об'єкта керування в умовах імовірнісного характеру контрольованих параметрів.

#### Список літератури

- Егоров А.В., Ершов М.С., Сеницына Н.В. Определение вероятностных характеристик электрических нагрузок на основе нормативных коэффициентов и ограничений технологических режимов потребителя // А.В. Егоров, М.С. Ершов, Н.В. Сеницына – Энергетика – №11 – 2015 – С. 154–158
- Сулейманов В.Н., Саидов У.О., Котов И.А. Многокритериальный анализ электроэнергетических систем с учетом вероятностного характера нагрузки узлов // В.Н. Сулейманов, У.О. Саидов, И.А. Котов – Энергетика и электрификация – № 3 – 1987 – С. 35–38.
- Довгалюк О.Н. Учет влияния вероятностного характера нагрузок электрических сетей на величину показателей качества электроэнергии // О.Н. Довгалюк – Світлотехніка та електроенергетика – №8 – 2006 – С. 54–64
- Morkun V.S., Kotov I.A. Knowledge base formation for automation of dispatch control over power systems of the mining and metallurgical complex / V.S. Morkun, I.A. Kotov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – №4 – 2021 – P. 103–109
- Morkun V.S., Kotov I.A. Intellectualization of Emergency Control of Power Systems on the Basis of Incorporated Ontologies of Knowledge-Bases / V.S. Morkun, I.A. Kotov // Acta Mechanica Et Automatica – N13(2) – 2019 – P. 86–94.
- Thareja R., Sharma Ch., Gupta R., Goel P., Singhal K. Review Techniques of Knowledge mining / R. Thareja, Ch. Sharma, R. Gupta, P. Goel, Singhal // International Journal of Computer Science and Information Technologies – Vol.8(1) – 2017 – P. 105–108
- Sandkuhl K., Smirnov A. Knowledge Management in Production Networks: Classification of Knowledge Reuse Techniques. SPIRAS Proceedings / K. Sandkuhl, A. Smirnov – 1(56) – 2018 – 5 p.
- Гаврилова Т.А., Кудрявцев Д.В., Кузнецова А.В. Выбор инструментов управления знаниями с учетом специфики предметной области // Т.А. Гаврилова, Д.В. Кудрявцев, А.В. Кузнецова – Инновации – 8(250) – 2019 – С. 44–52.

9. Chirapurath J. Knowledge mining. The Next Wave of Artificial Intelligence-Led Transformation (1st ed.) – Harvard Business Publishing – 2019 – 16 p.
10. Cheng Y., Chen K., Sun H., Zhang Y., Tao F. Data and knowledge mining with big data towards smart production – Journal Of Industrial Information Integration – V.9 – 2018 – p. 1-13.
11. Массель Л.В., Ворожцова Т.Н., Пяткова Н.И. Онтологический инжиниринг для поддержки принятия стратегических решений в энергетике // Л.В. Массель, Т.Н. Ворожцова, Н.И. Пяткова – Онтология проектирования – 7(1) – 2017 – С. 66-76.
12. Загорулько Г.Б. Разработка онтологии для интернет-ресурса поддержки принятия решений в слабо формализованных областях // Г.Б. Загорулько – Онтология проектирования – 22(4) – 2016 – С. 485-500.
13. Массель Л.В. Фрактальный подход к структурированию знаний и примеры его применения // Л.В. Массель – Онтология проектирования – 6(2) – 2016 – С. 149-161
14. Ахмадеева И. Использование онтологии для автоматизации поиска научной информации в сети Интернет // И. Ахмадеева – Информационные и математические технологии в науке и управлении – 4(12) – 2018 – С. 42-49.
15. Зінов'єва І.С., Артемчук В.О., Яцишин А.В. Використання відкритих геоінформаційних систем у підготовці фахівців з комп'ютерних наук // І.С. Зінов'єва, В.О. Артемчук, А.В. Яцишин – Інформаційні технології і засоби навчання – 68(6) – 2018 – С. 87-99
16. Шулима О.В., Шендрик В.В., Шестак М.О. Побудова сховища даних системи підтримки прийняття рішень для проектування розподілених енергетичних систем // О.В. Шулима, В.В. Шендрик, М.О. Шестак – Lviv Polytechnic National University Institutional Repository – 2016 – С. 291-297
17. Golik V., Komashchenko V., Morkun V., Morkun N., Hryshchenko S. Energy Saving in Mining Production. Science And Innovation – 14(3) – 2018 – P. 29-39.
18. Madrigal M., Uluski R., Mensan G. Practical Guidance for Defining a Smart Grid Modernization Strategy: The Case of Distribution. World Bank Studies; Washington DC (Revised Edition) – 2017 – 179 p.
19. Любарский Ю., Хренников А. Компьютерная поддержка диспетчерских решений в электрических сетях. / Библиотечка Электротехника – 8(248) – 2019 – С. 1-92
20. Кожихова О. Оценка чувствительности перетоков мощности к параметрам модели установившегося режима. / VIII Международная молодёжная научно-техническая конференция "Электроэнергетика глазами молодежи – 2017", Самара; Самар. гос. техн. ун-т. – 2017 – С. 137-140.

УДК 622.25

О.А. ГУЛІВЕЦЬ, канд. техн. наук, доц., С.О. ПОПОВ, д-р техн. наук, проф.,  
А.О. БОНДАРЕЦЬ, ст. викл., С.Ю. ОЛІЙНИК, асист.  
Криворізький національний університет

## ДЕЯКІ ПИТАННЯ КОРИГУВАННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ШАХТНОГО ПІДЙОМУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ОБСТЕЖЕННЯ І МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ АРМУВАННЯ ВЕРТИКАЛЬНИХ СТВІЛІВ ШАХТ

**Мета.** Мета дослідження – установити залежності для коригування експлуатаційних параметрів шахтного підйому за результатами обстеження технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

**Метод дослідження.** Метод дослідження – аналітичний.

**Наукова новизна.** Установлені залежності для коригування експлуатаційних параметрів шахтного підйому за результатами обстеження технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

**Практична значимість.** Застосування одержаних залежностей дозволяє визначити раціональні значення швидкості підйому скіпів та їх вантажності на основі даних обстеження технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

**Результати.** На основі аналізу конструкцій армування вертикальних стволів шахт та робочого процесу системи «армування – під'ємна посудина» установлено, що при русі по стволу під'ємних посудин виникає комплекс навантажень на елемент армування, які виникають внаслідок відхилень провідників від лінійної форми, наявності ексцентриситету завантажених скіпів, кручення підйомних посудин, дії коріолісової сили.

В процесі експлуатації відхилення провідників від проектного положення може збільшуватись в декілька разів. Крім цього внаслідок агресивного впливу шахтних вод і атмосфери ствола елементи його армування в певній мірі піддаються корозії. У зв'язку з цим виникає необхідність коригувати експлуатаційні параметри шахтного підйому відповідно фактичному значенню несучої здатності елементів армування вертикальних стволів шахт.

На основі аналізу конструктивних рішень армування ствола і робочого процесу системи «армування – під'ємна посудина» та застосувавши принцип сумісності деформацій провідника та розстрільної балки під дією горизонтального навантаження установлені залежності розподілу прикладеної сили між ними залежно від їх довжини і фактичних значень геометричних характеристик їх поперечних перерізів та механічних характеристик їх матеріалів.

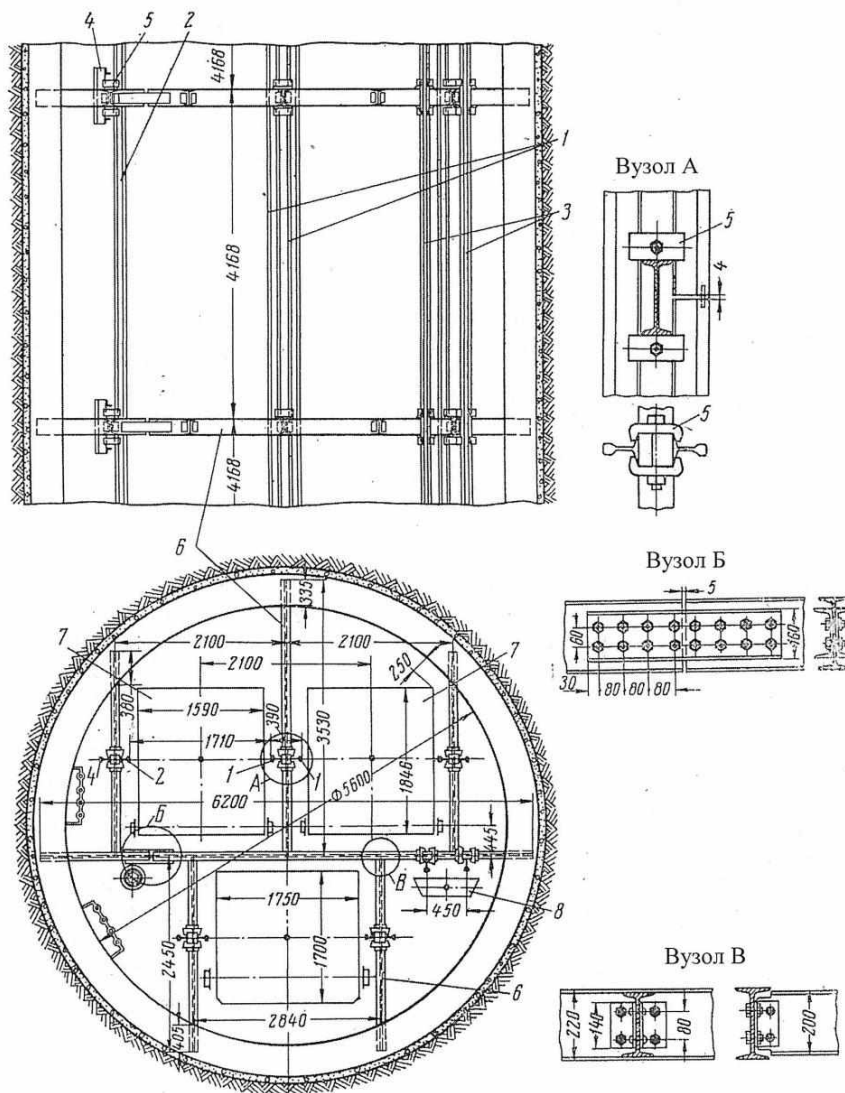
На основі виконання умов міцності провідника та розстрільної балки визначаються раціональні значення швидкості підйому та маси завантаженого скіпа.

**Ключові слова:** шахта, вертикальний ствол, армування ствола, провідники, розстрільні балки, допустиме напруження, умова міцності.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-104-110

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Надійність та безпека експлуатації вертикальних стволів шахт в значній мірі залежить від технічного стану їх армування, яке призначене забезпечувати заданий рух підйомних посудин і протипада та кріплення різних комунікацій в стволі.

В стволах, які обладнані великовантажними скіпами, що є характерним для залізрудних шахт, застосовують жорстке армування. Таке армування за конструкцією є просторовою стержневою системою, що складається з горизонтальних балок – розстрільв та вертикальних направляючих – провідників, які закріплені на розстрілах і по яких відслідковують напрям руху роликоопори підйомних посудин, клітей та протипада (рис. 1). Розстріли, що знаходяться в одній горизонтальній площині, утворюють ярус армування. Площини ярусів розташовані один від одного на деякій відстані, яка називається кроком армування. За способом армування розрізняють три типи провідників: односторонні, двосторонні та лобові (рис. 2). Провідники складаються з окремих ланок, які з'єднані між собою: безпосередньо біля розстрілу – одинарні або в середині прогону між ярусами – здвоєні.



**Рис. 1.** Армування скіпового ствола: 1 – парні провідники; 2 – одинарний провідник; 3 – провідники протипада; 4 – несправний провідник; 5 – стягувальна скоба; 6 – розстріли; 7 – скіпи; 8 – протипада

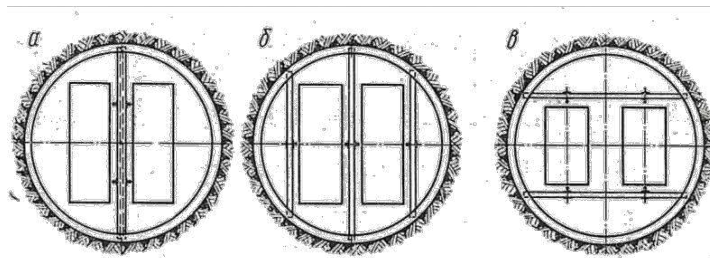


Рис. 2. Схеми розташування провідників: а – одностороння; б – двостороння; в – лобова

Конструктивна схема армування визначається розташуванням провідників і розстрілів в межах ярусу та розміщенням ярусів. В скіпових стволах застосовують, як правило, двостороннє розташування провідників.

На основі досліджень, виконаних рядом вітчизняних та зарубіжних вчених і інженерів в області проектування армування вертикальних стволів шахт в другій половині XX століття, була розроблена нині діюча нормативна документація на проектування і монтаж жорсткого армування вертикальних стволів шахт.

Нині внаслідок необхідності збільшення глибини шахт та їх продуктивності важливого значення набуває підвищення швидкості руху підйомних посудин та їх місткості. В той же час на ряді шахт після певного часу їх експлуатації відхилення провідників від проектного положення може збільшуватись в декілька раз, а самі елементи армування внаслідок агресивної атмосфери в стволі піддаються корозії.

В зв'язку з цим виникає необхідність виконувати обстеження технічного стану армування стволів та коригувати параметри шахтного підйому відповідно до фактичної несучої здатності елементів армування стволів шахт.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Аналітичними і експериментальними дослідженнями ряду авторів [1...10] встановлено, що при русі по стволу підйомних посудин виникає комплекс навантажень на елементи армування:

- навантаження, що виникає внаслідок відхилення провідників від лінійної форми (помилки при монтажі, вплив ударного тиску та ін.), яке є певною випадковою функцією;
- навантаження, що виникає внаслідок ексцентриситету завантаження скіпів;
- навантаження внаслідок кручення підйомних посудин;
- навантаження внаслідок дії аеродинамічних сил в стволі;
- навантаження внаслідок дії коріолісової сили інерції.

На основі аналізу публікацій [1...10] встановлено, що наведена в них інформація призначена для розрахунку параметрів, конструювання, монтажу та контролю технічного стану армування вертикальних стволів шахт. Однак, наведені в цих публікаціях залежності не дозволяють з малими затратами часу та коштів визначати раціональні значення параметрів шахтного підйому (максимальну швидкість руху та масу завантаженого скіпа) залежно від фактичного технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

**Постановка задачі.** На основі аналізу конструкцій армування вертикальних стволів шахт та робочого процесу системи «армування – під'ємна посудина» установити залежності для коригування експлуатаційних параметрів шахтного підйому за результатами обстеження технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

**Викладення матеріалу та результати.** Розглянемо випадок армування ствола з двостороннім розташуванням провідників, а підйомні посудини обладнані роликоопорами, які можуть створювати тиск на лобову та бічні поверхні провідника. Нехай при підніманні наповненої посудини (скіпа) буде створюватись тиск напрямного ролика лише на лобову поверхню провідника в місці його закріплення, яку позначимо  $F_y$  (рис. 3).

Для визначення поперечної сили, що діє на провідник в лобовому або боковому напрямі скористуємось рівнянням, яке наведене в [6]. Н

$$F_y = \frac{2\pi^2 \cdot \delta \cdot k_H^2 \cdot m \cdot v^2}{h^2} \cdot n^{\Lambda(\delta)}, \quad (1)$$

де  $\delta$  – зазор між робочими або запобіжними напрямками ковзання і провідником ( $\delta=0,01$  – для

рейкових провідників;  $\delta=0,015$  – для зварних коробчастих провідників;  $\delta=0,02$  м – для дерев'яних провідників);  $k_H$  – коефіцієнт, який залежить від типу направляючих ( $k_H=1,0$  – при жорстких напрямних ковзання;  $k_H=0,85$  – при пружних роликових напрямних);  $m$  – маса навантаженої підйомної посудини, кг;  $v$  – максимальна швидкість руху навантаженої посудини, м/с;  $n^{\Lambda(\delta)}$  – коефіцієнт, що визначається за табл. 1 в залежності від значення ексцентриситету центра мас завантаженої посудини  $e$  відносно викривлення провідників  $\Delta/\delta$  і значення узагальненого безрозмірного параметра лобової жорсткості армування;  $h$  – крок армування.

Таблиця 1

| $\lg \sigma$            |     | 0-0,6                                     | 0,6-1,2 | 1,2-1,8 | 1,8-2,4 | 2,4-3,0 | 3,0-3,6 |
|-------------------------|-----|-------------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $\frac{\Delta}{\delta}$ | $e$ | значення параметрів $n^{\Lambda(\delta)}$ |         |         |         |         |         |
| 0                       | 0   | 0,91                                      | 0,89    | 0,70    | 0,60    | 0,54    | 0,51    |
|                         | 0,2 | 1,14                                      | 1,09    | 0,84    | 0,72    | 0,64    | 0,62    |
|                         | 0,5 | 1,59                                      | 1,53    | 1,20    | 1,02    | 0,90    | 0,82    |
| 0,5                     | 0   | 1,25                                      | 1,05    | 0,75    | 0,66    | 0,61    | 0,59    |
|                         | 0,2 | 1,48                                      | 1,25    | 0,95    | 0,78    | 0,73    | 0,71    |
|                         | 0,5 | 2,04                                      | 1,70    | 1,31    | 1,10    | 1,00    | 0,85    |
| 1,0                     | 0   | 1,58                                      | 1,40    | 1,03    | 0,81    | 0,79    | 0,73    |
|                         | 0,2 | 1,88                                      | 1,66    | 1,25    | 0,98    | 0,93    | 0,85    |
|                         | 0,5 | 2,45                                      | 2,08    | 1,56    | 1,28    | 1,18    | 1,07    |

Примітки: 1. Проміжні значення  $n^{\Lambda(\delta)}$  визначаються методом інтерполювання.

2. Для граничних значень  $\lg \sigma^{\Lambda(\delta)}$  коефіцієнт  $n^{\Lambda(\delta)}$  приймається середнім для суміжних діапазонів.

При розрахунку значення  $F < 0,08mg$  слід приймати

$$F_y = 0,08mg,$$

де  $g$  – прискорення вільного падіння.

Відносні викривлення провідника  $\Delta/\delta$  приймати рівними:  $\Delta/\delta=0,5$  – для рейкових провідників;  $\Delta/\delta=0,35$  – для дерев'яних провідників;  $\Delta/\delta=0,25$  – для зварних коробчастих провідників.

Під дією горизонтальної сили буде відбуватись деформація згинання в площині  $zOy$ , а розстрільної балки – в площині  $xOy$ .

При цьому розстрільну балку будемо розглядати як статично невизначувану довжиною  $l_p$ , обидва кінці якої затиснуті, а місце кріплення провідника до якої розташоване на відстанях  $a$  та  $b$  від місць затиснення (див. рис. 3).

Так як провідник закріплений по всій довжині ствола до розстрільних балок, які установлені на відстані кроку армування  $l_a$  і жорсткість на згинання яких суттєво більша від жорсткості на згинання провідників, то з певним наближенням розглянемо ділянку провідника, як статично невизначувану балку, яка дорівнює подвійній довжині кроку армування  $l_n=2l_a$ , затиснута по обох кінцях, і навантажена горизонтальною силою  $F_y$  в місці закріплення провідника до розстрільної балки.

Під дією горизонтальної сили  $F_y$  провідник і розстрільна балка будуть сумісно деформуватись в напрямі дії сили: провід-

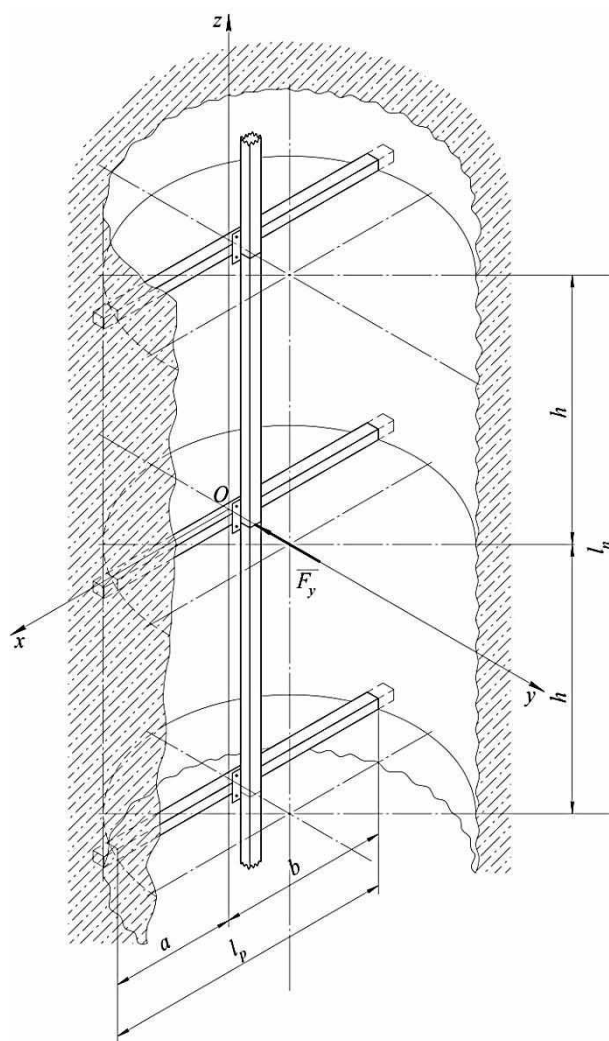


Рис. 3. Схема навантаження армування вертикального ствола шахти

ник в площині  $zOx$ , а розстрільна балка – в площині  $xOy$ .

Тоді, виходячи з умови сумісності деформації провідника і розстрільної балки в місці їх контакту, запишемо рівність

$$\omega_p = \omega_n, \quad (2)$$

де  $\omega_p$ ,  $\omega_n$  – відповідно величина прогину ростральної балки і провідника в місці їх контакту.

На основі відомих залежностей для величини прогину в статично невизначуваних балках, навантажених зосередженою силою [11], запишемо

$$\omega_n = f_n = -\frac{F_{yn} \cdot l_n^3}{192 \cdot E_n \cdot J_{xn}} \quad (3)$$

$$\omega_p = -\frac{F_{yp} \cdot a^3 \cdot b^3}{3 \cdot E_p \cdot J_{zp} \cdot l_p^3} \quad (4)$$

де  $F_{yn}$ ,  $F_{yp}$  – величина складової горизонтальної сили, яку сприймає відповідно провідник та розстрільна балка;  $E_n$ ,  $E_p$  – модуль пружності матеріалу відповідно провідника та розстрільної балки;  $J_{xn}$  – момент інерції поперечного перерізу провідника відносно осі  $x$ ;  $J_{zp}$  – момент інерції поперечного перерізу розстрільної балки відносно осі  $z$ .

При визначенні моментів інерції поперечних перерізів провідника  $J_{xn}$  та розстрільної балки  $J_{zp}$  необхідно враховувати зменшення їх геометричних параметрів внаслідок корозії.

Тоді на основі рівностей (2)-(4) одержимо

$$\frac{F_{yn} \cdot l_n^3}{192 \cdot E_n \cdot J_{xn}} = \frac{F_{yp} \cdot a^3 \cdot b^3}{3 \cdot E_p \cdot J_{zp} \cdot l_p^3} \quad (5)$$

Враховуючи, що  $F_y = F_{yn} + F_{yp}$  і прийнявши  $E_p = E_n$ , а  $F_{yn} = F_y - F_{yp}$  з рівняння (5), одержимо залежність, що характеризує яку частину поперечної сили  $F_y$ , що діє з боку напрямних роликів скіпа на місце кріплення провідника до розстрільної балки, буде сприймати розстрільна балка

$$F_{yp} = F_y \cdot \left[ \frac{1}{\frac{64 \cdot a^3 \cdot b^3 \cdot J_{xn}}{J_{zp} \cdot l_p^3 \cdot l_n^3} + 1} \right]. \quad (6)$$

У випадку, коли кріплення провідника до розстрільної балки буде в середньому поперечному перерізі ( $a = b = \frac{l_p}{2}$ ), то рівняння (6) прийме вигляд

$$F_{yp} = F_y \cdot \left[ \frac{1}{\left(\frac{l_p}{l_n}\right)^3 \cdot \frac{J_{xn}}{J_{zp}} + 1} \right]. \quad (7)$$

Після визначення величини сили, яку буде сприймати розстрільна балка в горизонтальній площині згідно з залежностями (6) або (7), визначають величину горизонтальної сили, яку сприймає провідник

$$F_{yn} = F_y - F_{yp}. \quad (8)$$

Визначаємо на основі відомих залежностей [11] максимальне значення згинальних моментів, які будуть виникати в поперечних перерізах провідника та розстрільної балки внаслідок дії на них сили  $F_{yn}$  і  $F_{yp}$  відповідно:

у поперечному перерізі провідника при  $z = \frac{l_n}{2}$

$$M_{xn}^{\max} = \frac{1}{8} \cdot F_{yn} \cdot l_n; \quad (9)$$

у поперечному перерізі розстрільної балки при  $x=a$

$$M_{zp}^{\max} = 2 \cdot F_{yp} \cdot \frac{a^2 \cdot b^2}{l_p^3}. \quad (10)$$

Визначивши за відомими залежностями [11] відповідно формі поперечного перерізу фактичні (з урахуванням корозії) значення моментів опору поперечних перерізів: розстрільної балки  $W_{zp}$  при згинанні навколо осі  $z$  і провідника  $W_{xn}$  при згинанні навколо осі  $x$ , визначимо максимальні значення нормальних напружень, що будуть діяти в поперечних перерізах провідника  $\sigma_{n\max}$  та розстрільної балки  $\sigma_{p\max}$

$$\sigma_{n\max} = \frac{M_{xn}^{\max}}{W_{xn}}; \quad (11)$$

$$\sigma_{p\max} = \frac{M_{zp}^{\max}}{W_{zp}}. \quad (12)$$

За відомими залежностями визначимо допустимі значення нормальних напружень, які будуть діяти в поперечних перерізах провідника та розстрільної балки при дії на них сил  $F_{yn}$  та  $F_{yp}$  відповідно

$$[\sigma]_n = \frac{\sigma_{tn}}{[S]}; \quad (13)$$

$$[\sigma]_p = \frac{\sigma_{tp}}{[S]}; \quad (14)$$

де  $\sigma_{tn}$ ,  $\sigma_{tp}$  – границя текучості матеріалу провідника та розстрільної балки відповідно;  $[S]$  – допустиме значення коефіцієнта безпеки.

Допустиме значення коефіцієнта безпеки наближено визначимо на основі диференціального методу [12]

$$[S] = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3, \quad (15)$$

де  $S_1$  – коефіцієнт, який враховує ступінь точності розрахунку (якщо прийняти, що розрахунок веде до завідомо занижених напружень, то  $S_1=1,2\dots1,3$ , інакше –  $S_1=1$ );  $S_2$  – коефіцієнт, який враховує однорідність механічних властивостей матеріалу (для деталей, виготовлених із вуглецевих та легированих сталей при високій температурі відпусканні  $S_2=1,2\dots1,3$ );  $S_3$  – коефіцієнт, який враховує ступінь відповідальності деталі (якщо руйнування деталі викликає зупинку виконання робочого процесу  $S_3=1,1\dots1,2$ , а якщо аварію, то  $S_3=1,2\dots1,3$ ).

Після визначення діючих в поперечних перерізах провідника та розстрільної балки максимальних нормальних напружень та допустимих значень їх величин перевіряють виконання умови міцності провідника та розстрільної балки

$$\sigma_{n\max} \leq [\sigma]_n; \quad (16)$$

$$\sigma_{p\max} \leq [\sigma]_p. \quad (17)$$

При невиконанні умов (16) та (17) необхідно скоректувати в бік зменшення максимальну швидкість руху  $v$  та масу  $m$  навантаженої посудини і повторити розрахунки згідно з залежностями (1), (6) – (17).

**Висновки.** На основі аналізу конструкцій армування вертикальних стволів шахт і робочого процесу системи «армування – під'ємна посудина» установлені залежності, які дозволяють визначити раціональні значення швидкості руху та маси навантаженого скіпа залежно від фактичного технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

## Список літератури

1. Залесов О.А. Армирование вертикальных стволов шахт и ее исследование на электронных моделирующих устройствах. – М.: Недра, 1966.
2. Маскин В.К., Агманских С.К., Рубцов В.А., Сухарева Н.А. Армирование вертикальных стволов шахт при применении крепи облегченной конструкции. – М.: «ЦВЕТМЕТИНФОРМАЦИЯ». 1967. – 50 с.
3. Баклашов В.И. Расчет, конструирование и монтаж армировки стволов шахт. – М.: Недра, 1973.
4. Пособие по проектированию и монтажу жесткой армировки вертикальных стволов шахт и рудников (к СНиП 11-94-80). М.: Недра, 1989. – 160 с.
5. Гавруцкий А.Е., Моренков Ф.А. Состояние армировки действующих шахтных стволов в Криворожском бассейне. ЦНИГРИ. Сборник научных трудов УП, М., 1963.
6. Методика расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт. – ВНИИГМ им. М.М. Федорова. – Донецк, 1985. – 160 с.
7. Ильин С.Р. Управление состоянием стволового оборудования шахтных подъемных комплексов при длительной эксплуатации / ИГТМ НАН Украины «Горная механика»: сб. науч. тр. Вып. 58. – 2005. – с. 45-52.
8. Чередниченко О.Е., Ильин С.Р., Радченко В.К. Контроль технического состояния жесткой армировки и крепи шахтных стволов: м-лы XV юбилейной международной конференции «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики». Часть 1. – Киев, 2007.
9. Прокопов А.Ю., Курнаков В.А. Исследование влияния неточности стыков проводников на формирование ударной нагрузки при движении большегрузных скипов. // Изв. вузов. Сев-Кавк. регион. Техн. науки. – 2006. – Прил. № 9: Перспективы развития Восточного Донбасса. – с. 106-110.
10. Пестрикова В.С. Алгоритм расчета долговечности жестких армировок шахтных стволов, эксплуатируемых в условиях верхнекамского месторождения калийных солей. В ж. «Известия Тульского государственного университета. Наука о земле». 2019. С. 332-339.
11. Справочник по сопротивлению материалов / Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В.; Отв. ред. Писаренко Г.С. – 2-е изд., перераб. и доп. – Киев: Наук. думка, 1988. – 736 с.
12. Детали машин в примерах и задачах: [Учеб. пособие / С.Н. Ничипорчик, М.И. Корженцевский, В.Ф. Калачев и др.]; под общ. ред. С.Н. Ничипорчика. – 2-е изд. – Выш. школа, 1981. – 432 с.

УДК 621.181:62

В.В. СУРТАСВ, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

## ПІДВИЩЕННЯ ЗАГАЛЬНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК, ТЕПЛОВИХ СХЕМ СИСТЕМ, ПРИСТРОЇВ, УСТАНОВОК УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА

**Мета** підвищення загальної ефективності теплоенергетичних установок, теплових схем систем, пристроїв, установок утилізації тепла - наукове завдання, проблема. Також метою розрахунків теплоутилізаторів є визначення показників стану робочих тіл (РТ) і потоків обміну теплоти й маси РТ у теплоутилізаторах з термодинамічної точки зору являють собою гомогенні або гетерогенні системи. От далеко не повний перелік актуальних питань, наукових задач і проблеми, рішення яких неможливо без розробки спеціальних методик рішення інженерно-технічних завдань, актуальних наукових задач і проблеми проектування й будівництва контактних тепломасообмінних апаратів.

**Методи дослідження.** Теоретичні положення, методи, постановка завдання, моделі, граничні рівноважні стани робочих тіл, узагальнені безрозмірні показники рішення завдань сталого тепло- і масопереносу тепло й масообміну в апаратах утилізації теплоти.

**Наукова новизна** полягає в тому, що рішення проблеми створення конденсаційно-охолоджувального пристрою установок системи пристрою утилізації тепла з теплоутилізатором на базі "форсунок камер" і ін., вимагає врахування різних факторів, що впливають на інтенсифікацію процесів тепломасообміну, що у свою чергу дозволяє вибрати найбільш раціональні режими роботи пристрою і вирішальним образом позначається на їх ефективності.

**Практична значимість.** Інтенсифікація тепломасообміну в конденсаційно-охолоджувальному пристрої установок, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсунок камер" і ін., досягається: високою відносною швидкістю теплоносія, що розпилюється, розвиненістю поверхні контакту між середовищами, високою дисперсністю часток теплоносія, що розпилюється, щільністю заповнення реактивного простору взаємодіючими середовищами, рівномірністю розподілу парогазового потоку уздовж поперечного перерізу контактного апарата, виконаного на базі "форсунок камер", раціональним вибором часу контакту середовищ, характером взаємного руху контактуючих середовищ.

**Результати.** Підвищення загальної ефективності теплоутилізаторів виконаних на базі "форсунок камер".

**Ключові слова:** форсунка, форсунокова камера, система, пристрій, установка, ефективність, тепло – і масообмін, фактори.

**Проблема і її зв'язок з науковими і практичними задачами.** Рішенням наукової проблеми розробки методики розрахунку тепломасообміну в конденсаційно-охолоджувальному пристрої установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", припускає розгляд тепломасообміну на мікрорівні й вивчення можливостей отримання розрахункових залежностей з урахуванням найбільшої кількості факторів що впливають на тепломасообмінні процеси, такий підхід до проблеми створення методики розрахунків тепломасообміну в контактному апараті, як відомо, дозволяє встановити співвідношення, що найбільше повно виражають картину процесів, що протікають.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Для отримання кращої уяви про механізм взаємодії речовини краплі з парогазовою сумішшю розглянемо тепломасообмін у випадку одиничної краплі. Для випадку прогріву нерухомої краплі теплоносія, що має форму шару й однорідного по своєму складу. У початковий момент часу вся маса краплі має однакову температуру  $t_0$  рівну температурі теплоносія на вході у форсунку, однак у процесі розпилювання крапля попадає в парогазове середовище з температурою  $t_{cp}$  і нагрівається з поверхні. Температура середовища при цьому залишається незмінна в часі [6-11].

Таким чином, розгляд процесу прогріву краплі, нерухомої щодо середовища, дозволяє зробити висновок, що значне скорочення часу нагрівання теплоносія можливо, насамперед, за рахунок поліпшення якості розпилювання й підвищення температури парогазового середовища. Однак, при такому підході, є фактори, які не повністю враховують специфіку роботи конденсаційно-охолоджувального пристрою установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", оскільки не враховується утворення шару плівки з конденсату на поверхні краплі і пов'язаної із цим зміни режиму теплопередачі й руху краплі [1-11].

Рішення наукової проблеми створення конденсаційно-охолоджувального пристрою установки, системи, пристрою утилізації тепла з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" і ін., вимагає обліку різних факторів, що впливають на інтенсифікацію процесів тепломасообміну, що у свою чергу дозволяє вибрати найбільш раціональні режими роботи пристрою і вирішальним чином позначається на їх ефективності (що, впливає й на умови роботи і конструкцію пристрою для знешкодження шкідливих викидів). Інтенсифікація тепломасообміну в конденсаційно-охолоджувальному пристрої установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" та ін., досягається: високою відносною швидкістю теплоносія, що розпилюється, розвиненістю поверхні контакту між середовищами, високою дисперсністю часток теплоносія, що розпилюється, щільністю заповнення реактивного простору взаємодіючими середовищами, рівномірністю розподілу парогазового потоку уздовж поперечного перерізу контактної апарату, виконаного на базі "форсуноквої камери", раціональним вибором часу контакту середовищ, характером взаємного руху контактуючих середовищ. Створення ефективного конденсаційно-охолоджувального пристрою установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" парогазових викидів вимагає врахування наведених вище факторів інтенсифікації процесів тепломасообміну.

Недоліком сучасних методів розрахунку контактних апаратів на базі "форсуноквих камер" є врахування в них конструктивних особливостей тільки окремих типів форсуноквих пристроїв, що обмежує можливості застосування інших, у тому числі і більш вдалих типів форсуноквих пристроїв. Остання обставина істотно обмежує можливості застосування різних, у тому числі, більш нових і ефективних конструкцій форсунок і схем компонування контактних апаратів. Такий підхід утруднює розробку установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", оскільки в умовах обмежених у просторі промплощадок діючих установок - джерел парогазових викидів, він виключає можливості вибору й інших раціональних конструктивних рішень по створенню конденсаційно-охолоджувального пристрою установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" [1-7]. При такому підході до розробки методики розрахунку установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" ускладнений облік всіх факторів інтенсифікації процесів тепломасообміну й вибір раціональних режимів роботи контактної апарату.

Розробка методики розрахунку контактної апарату пристрою, системи, установки, з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", припускає, якщо це необхідно, дослідження

впливу технологічних параметрів промислових установок - джерел парогазових викидів і інших джерел, у тому числі природних (геотермальних джерел), на ефективність роботи установки, системи, пристрою утилізації тепла.

У результаті аналізу різних конструктивних рішень і показників роботи форсунок пристроїв, обрано вид (клас) найбільш економічних і ефективних пристроїв - тангенціальні механічні форсунки. Тангенціальні форсунки одержали широке поширення в промисловості через їх конструктивну простоту і мінімальні витрати механічної енергії на розпилювання рідин. Принцип дії тангенціальної форсунки полягає в закручуванні рідини перед проходженням вихідного сопла, у результаті значно зростають відцентрові сили, які і утворюють тонку плівку кільцевого перерізу що в наслідку розпадається на дрібні краплі [6-11].

Як уже вказувалося вище, методи розрахунків установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсунок камер" повинні враховувати показники роботи відцентрових форсунок. До цих показників відносяться: продуктивність, кут розпилення рідини, середня і локальна щільності зрошення в перетинах на різних відстанях від форсунки, середній діаметр крапель розпиленого струменя в цілому і окремих точках її об'єму, спектр розподілу краплі по розмірах у струменю в цілому і окремих точках її об'єму, симетрія розподілу рідини по секторах. Всі ці характеристики визначаються геометрією форсунки, властивостями рідини й характером витікання. На якість розпилювання рідини форсункою, здійснювана за рахунок механічної енергії, що витрачається на подолання сил молекулярної взаємодії часток рідини, подолання сил поверхневого натягу й опору руху, впливають також, поряд з іншими факторами, в'язкість, поверхневий натяг і щільність рідини.

**Постановка задачі.** Необхідністю одержання показників розпилювання теплоносія тангенціальними форсунками певної конструкції для умов роботи в установках, системах, пристроях з теплоутилізатором на базі "форсунок камер" і ін., викликаний вибір базових критеріїв підбору форсунок пристроїв по ряду їх стандартних показників, на основі отриманих на експериментальній моделі, для умов конденсаційно-охолоджувальної установки, системи пристрою з теплоутилізатором на базі "форсунок камер", залежностей між критеріями і коефіцієнтами тепломасообміну отриманими при розробці методики розрахунків контактних апаратів [1-7].

Сформовані уявлення про процес розпилю, припускають його поділ на дві фази. У першій фазі розпилення відбувається за рахунок енергії тиску створюваного насосом, у другій фазі - краплі подрібнюються під дією аеродинамічних сил у середовищі плину краплі. При розпаді струменя рушійними факторами є сили ваги, інерції, поверхневого натягу, в'язкості і тертя між середовищами. Незважаючи на існуюче різноманіття теорій рідин, що трактують розпилювання, (теорія капілярних хвиль, турбулентна, фрикційна, хрупкостна теорія), останні доповнюють одна одну й дозволяють установити всі показники ефективності роботи форсунок [6, 7, 9-11].

**Викладення матеріалу і результати.** Найбільший інтерес, з погляду інтенсифікації процесів контактного тепломасообміну, для системи, пристрою, установки з теплоутилізаторами на базі "форсунок камер" промислових установок - джерел парогазових викидів і інших джерел, представляє краплинна форма розпаду струменя, тому що вона забезпечує найвищу якість розпилювання, у відмінності від плівкової [6-11]. Розгляд краплинної форми розпилювання рідини дозволяє виділити групу параметрів, вплив яких визначальним чином позначається на якісних показниках роботи форсунок. Ефективність розпилювання рідини, а значить і ріст поверхні контакту в конденсаційно-охолоджувальному пристрої, пов'язаний співвідношенням відцентрових сил і сил поверхневого натягу. Якість розпилення рідини форсунками неухильно росте зі зміною цього співвідношення на користь відцентрових сил і сил інерції [6-11].

При безплівковому режимі витікання рідини з форсунки, оточуюче середовище не впливає на першу фазу розпилю. Критерієм, що характеризує першу фазу розпаду струменя в контактному апараті є залежність якості розпилювання що виражається у виді функції [6-11]

$$\frac{d_k}{d_{\text{ж}}} = \frac{v_{\text{ж}} d_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}}, \quad (1)$$

де  $v_{\text{ж}}$  – швидкість розпилюваної рідини у вихідному каналі форсунки, м<sup>2</sup>/с;  $d_{\text{ж}}$  – діаметр умовного проходу сопла тангенціальної форсунки, м;  $\rho_{\text{ж}}$  – щільність розпилюваної рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_{\text{ж}}$  – динамічна в'язкість розпилюваної рідини, Па·с;  $d_k$  – діаметр краплі, м.

Окрім розмірів краплі, суттєвим фактором, що впливає на інтенсифікацію тепло масообміну між краплею і парогазовим середовищем є відносна швидкість краплі. Максимальний ефект досягається при великих швидкостях руху у вихідному соплі, при цьому дріблення проходить практично незалежно від сил поверхневого натягу, а найбільш ймовірним розмірам крапель відповідають мікророзміри турбулентних часток. Дані процеси описуються на основі теорії локальної структури турбулентності А. Н. Колмогорова, що дозволяє визначити якість розпилювання нестискаємої, в'язкої рідини при великих числах Рейнольдса. Теорія А. Н. Колмогорова пояснює розпад струменя утворенням турбулентних мікровихривів, які з ростом віддалення від форсунки, визначаються за формулами [6]

$$\lambda \approx l / Re^N, \quad (2)$$

де  $l$  - макромасштаб турбулентності,  $\lambda_1$  - мікрмасштаб по Тейлору,  $Re$  - число Рейнольдса,  $N$  - показник степені за результатами експериментів що відповідає значенням 0,5-0,75.

Оскільки мікрмасштаб турбулентності пропорційний розміру потоку, то за характерний розмір приймають еквівалентний діаметр форсунки  $d_s$ , що дозволяє переписати формулу у вигляді [6]

$$\frac{d_k}{d_s} = \frac{const}{Re_s^N}, \quad (3)$$

де  $d_k$  - діаметр крапель, м;  $Re_s$  - число Рейнольдса для еквівалентного діаметра форсунки.

Визначення спектру розпила, для першої фази дроблення струменя, описується на основі хрупкісної теорії дроблення рідких струменей, що для умов системи, пристрою, установки, с теплоутилізатором на базі «форсунок камер», виразиться кривою спектра розпила по Трешу

$$\frac{d(n/no)}{dx} = \frac{e^{-\beta/x}}{x^3 \int_0^1 e^{-\beta/x} x^{-3} dx}, \quad (4)$$

де  $x$  - відносний діаметр крапель  $d_i/d_{k \max}$ ;  $n_0$  - загальне число крапель;  $n$  - число крапель діаметром  $d_i$ ;  $\beta = G \cdot \beta_{т.ф.} / d_{k \max}$ , де  $\beta_{т.ф.}$  - дослідна константа для тангенціальних форсунок 0,19 [6, 7].

У другій фазі розпилювання дроблення крапель відбувається за рахунок взаємодії розпилюваного теплоносія з парогазовим середовищем, що протікає під дією аеродинамічних сил і сил поверхневого натягу, і обумовленого режимом обтікання краплі потоком, структурою турбулентного потоку і в'язкими властивостями середовищ.

Незважаючи на те, що в потоці розпила будь-якої форсунки наявні краплі широкого спектру розмірів, показники розпилення прийнято характеризувати середнім діаметром крапель, узятим по середніх числових показниках. Середній діаметр крапель обчислюється залежно від того, яке з визначальних властивостей системи є істотним у даному технологічному процесі. У загальному випадку середній діаметр обчислюється по формулі виду

$$d_{qp} = p \cdot q \sqrt{\frac{\sum d_i^p \Delta n_i}{\sum d_i^q \Delta n_i}}, \quad (5)$$

де  $d_i$  - середній діаметр частки у фракції, що нараховує  $\Delta n_i$  часток, мкм;  $p$  і  $q$  - цілі числа, що визначаються необхідним способом осереднення. Для умов тепло масообміну в тепло утилізаторі процесів мокрого гасіння коксу (об'ємно-поверхневий спосіб осереднення по Ликову М. В., Леончику Б. І.) величини  $p$  і  $q$  у відповідності дорівнюють 3 і 2.

Розподіл розмірів крапель у розпалюваній струї в розрахунках форсунок системи утилізації тепла розжареного коксу слідує закону великих чисел і описується формулою Розіна-Рамлера

$$R = 100e^{-\left(\frac{d_i}{d_k}\right)^n}, \quad (6)$$

де  $R$  - масова доля крапель в струмені, діаметр яких більше  $d_i$ , %,  $d_k$  - постійний діаметр крапель відповідає певному значенню  $R=36,79\%$ ,  $n$  - постійне число, що характеризує ступінь різномірності крапель. При  $d_i = d_k$  рівняння приймає вид, %

$$R = \frac{100}{e} = 36,79. \quad (7)$$

Це означає, що 36,79% крапель в струмені має діаметр більше  $d_k$ . Як слідство, якщо маємо криву розподілу по розмірам, то можливо для цього ж досліду визначити величину  $d_k$  по вище вказаній формулі. Інший параметр -  $n$ , який визначається для тієї ж кривої, знаходиться в результаті логарифмування рівняння Розіна-Раммлера

$$\lg \lg \frac{100}{R} = n \lg di - n \lg dk + \lg \lg e = \text{const} + n \lg di, \quad (8)$$

де  $n$  – кутовий коефіцієнт прямої що отримується графічно [6].

Таким чином, визначення якості розпилювання форсунки зводиться до визначення величин  $d_k$  і  $n$ .

Крім рівняння Розіна-Раммлера існує велика кількість залежностей, що слугують для опису розподілу часток в полідисперсній системі. Майже всі вони є чисто емпіричними.

А. Н. Колмогоров теоретично доказав, що в системах, що утворені при тривалому диспергуванні, частки розподіляються по логарифмічному нормальному закону. Побудовані на його основі формули для розрахунку розпилювання виходять досить простими, що дозволяє узагальнювати досвід розпилювання в геометрично подібних камерах.

Превага залежності Розіна-Раммлера полягає ще в тому, що при її використанні вдається відносно просто вичислити любий середній діаметр краплі в струмені по формулі [6]

$$dpq = dk \left[ \frac{\Gamma\left(\frac{p-3}{n}\right) + 1}{\Gamma\left(\frac{q-3}{n}\right) + 1} \right]^{\frac{1}{p-q}}, \quad (9)$$

де  $\Gamma$  – символ Гамма-функції,  $p$  і  $q$  – параметр осереднення.

Хоча експерименти по вивченню якості розпилювання рідин виконуються давно, і існує велика кількість різновидів методів оцінки якісних параметрів розпилення рідин, задача знаходження залежностей для розрахунку форсунок на якість розпилювання відноситься до розряду достатньо складних. Відомі до сих пір способи визначення розмірів крапель розпиленних форсунками рідин і отримання кривих розподілу часток, що містяться в струмені, дають досить неточні результати. Методи дослідного визначення дисперсності розпилю детално описані в роботах [1-6].

В роботах [6-11] було запропоновано новий шлях обробки дослідних даних по якості розпилювання, що полягає в згладжуванні дослідних даних по якості розпилювання і графічних побудовах кривих розподілу крапель в струмені по розмірам. Число заміряних крапель в даній точці вважалось достатнім в тому випадку, якщо побудована на їх основу сумарна крива розпилювання  $R_2 = 100 \left[ 1 - e^{-(di/dk)^n} \right]$ , в логарифмічних координатах приводилась до прямої лінії, що при числі крапель порядку 50-150 завжди досягалось. Обробка дослідних даних по визначенню середнього діаметра крапель виконувалась з допомогою критеріального рівняння

$$d_k/d_g = f(v_g \cdot \varepsilon/v) = f(Re_g), \quad (10)$$

де  $v_g = \sqrt{2p_{ex}/\rho}$ , а рівняння кривої розподілу набуло вид [6-11]

$$\frac{d_k}{d_g} = \frac{18,3}{Re_g^{0,59}}. \quad (11)$$

Остання формула відображає залежність середнього діаметра в інтервалі  $2280 < Re_g < 18280$ , робочого процесу розпилювання рідини центр обіжними форсунками в першій фазі і є достатньо універсальною для різних рідин і конструкцій центробіжних форсунок.

В крапельній фазі розпаду в'язкість і поверхневе на тяжіння рідини проявляються почергово, в першій і в другій фазах. Це суттєво зменшує число критеріїв подібності що описують якісні показники роботи форсунок.

Не дивлячись на те, що розрахунки форсунок на заданий діаметр і заданий спектр розпилювання ще не знайшли достатнього розповсюдження в розрахунках технологічних параметрів роботи контактних апаратів, їх застосування просто необхідно при розробці системи, пристрою, установки утилізації тепла промислових установок –джерел парогазових викидів та ін. джерел.

Розрахунок на заданий спектр розпилення рідини виконується в такий спосіб: для цього у формулу підставляються табличні значення величин виражені через витрату  $G$  і тиск перед форсункою  $p_{\text{вх}}$  [6-11]

$$d_k = 18,3 \cdot \frac{\nu^{0,59} \sqrt{3,6 \frac{4}{\pi} \frac{G}{\sqrt{20 p_{\text{вх}} \cdot \rho}}}}{\left( \sqrt{20 \frac{p_{\text{вх}}}{\rho}} \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{G}{3,6 \sqrt{20 p_{\text{вх}} \cdot \rho}}} \right)^{0,59}}, \quad (12)$$

Після перетворення отримаємо формулу виду [6-11]

$$d_k = 1,81 \frac{\nu^{0,59} \cdot G^{0,205} \cdot \rho^{0,195}}{p_{\text{вх}}^{0,397}}. \quad (13)$$

З урахуванням рівняння Розіна-Раммлера в логарифмічній формі і рішення відносно  $d_k$  приймає вид [6-11]

$$d_k = di / \sqrt[n]{\frac{\lg \frac{100}{R}}{\lg e}}, \quad (14)$$

виходячи з умови про необхідний рівень крапель певної дисперсності  $R$  в струмені, після підстановки, по даній формулі можна знайти значення  $d_k$  [6, 7-11]

$$d_k = 100 / \sqrt[n]{\frac{\lg \frac{100}{10}}{\lg e}}, \quad (15)$$

причому  $n$  встановлюється із кроком в інтервалі відповідної експериментальної залежності значенням. Результати розрахунку форсунки підставляються в таблицю розрахунків роботи форсунки на заданий спектр розпилювання.

З формул видно, що між витратою форсунки й середнім діаметром краплі при заданому тиску перед форсункою, існує однозначна залежність, що виражається залежністю [6-11]

$$G = \left( \frac{d_k \cdot p_{\text{вх}}^{0,397}}{1,81 \cdot \nu^{0,59} \cdot \rho^{0,192}} \right)^{4,87}, \quad (16)$$

причому для води в'язкість і щільність приймається по таблицях, відповідно до одиниць виміру прийнятими в експериментальних рівняннях, які в нашому випадку відповідають:  $\nu=0,01 \text{ см}^2/\text{с}$ ,  $\rho=1 \text{ г/см}^3$ .

Підбір форсунок здійснюється в раціональному співвідношенні їхньої ефективності, продуктивності й необхідної кількості. На цій підставі визначається оптимальна величина  $n$ , що враховує конструктивні особливості форсунок і виробляється вибір форсунки з відомого конструктивного ряду.

Залежність величини  $n$  від конструкції форсунки виражається формулою [6]

$$R/r_c = (4,42 - n) / 0,42. \quad (17)$$

Встановивши величину  $R/r_c$  при раціональному  $n$ , підбираємо геометрію форсунки по спеціальним таблицям [6-11] попередньо вчислив величину  $\frac{G}{\sqrt{p_{\text{вх}}}}$ . В результаті вибираються

значення  $d_c$ ,  $d_{\text{вх}}$ ,  $R$ ,  $n$ ,  $D_k$ ,  $f_{\text{вх}}$  та ін. Правильність розрахунку звичайно підтверджується експериментально.

При розробці й застосуванні форсунок пристроїв системи, пристрою, установки, з теплоутилізатором на базі "форсунок камер", можуть виявитися обмеження по розмірах і комплектуванню контактних апаратів, що вимагатиме обліку більш широкого набору характеристик форсунок. Одним з таких параметрів є кут розпилення рідини форсункою, від якого залежить частина поперечного перерізу контактної апарату для роботи однієї або декількох форсунок пристроїв, і, відповідно, інтенсивність процесів тепломасообміну.

Вплив кута росточки сопла форсунки і, відповідно факела розпилювання, на роботу тангенціальної механічної форсунки визначається відомою залежністю для коефіцієнта витрати форсунки  $\mu = (127 - \alpha)/139$ , з урахуванням комплексу відомих вихідних параметрів, серед яких  $G$  – витрата теплоносія,  $p_{вх}$  – вхідний тиск в форсунці,  $\alpha$  – кут розточки форсунки. За допомогою

таблиць [6-11] по двом параметрам  $\frac{G}{\sqrt{p_{вх}}}$  і  $\mu$  підбираються і другі дозуючі розміри форсунки

$d_c, D_k, f_{вх}$ . Якщо в ряду стандартних форсунок не виявиться необхідної, розрахунок можна провести від зворотнього, по заданому значенню  $\alpha$ , знаходимо  $\mu$  із співвідношення  $\mu = (127 - \alpha)/139$ .

Знаючи  $G, \mu$  і  $p_{вх}$ , з формули  $G = \mu \cdot F_c \cdot \sqrt{2p_{вх} / \rho^2}$  знаходимо  $r_c$ , задаючись відношенням  $R/r_c$ , знаходимо  $R$  і  $b$  із рівнянь [6]

$$\mu = \frac{0,4}{\left(\frac{\pi \cdot R \cdot r_c}{f_{вх}}\right)^b} \text{ і } f_{вх} = \pi \cdot R \cdot r_c \cdot \left(\frac{\mu}{0,4}\right)^{\frac{1}{b}}, \quad (18)$$

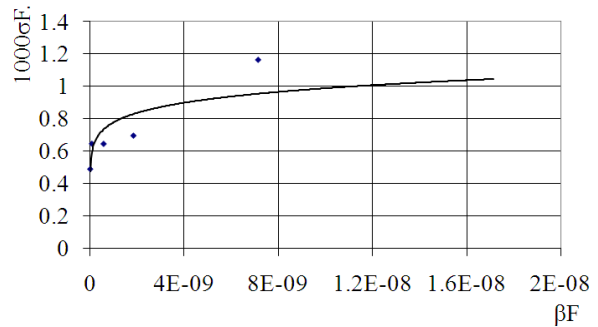
де  $d_c, D_k, f_{вх}, \alpha, R/r_c, R$  і  $b$  – конструктивні параметри форсунки згідно [6-11].

При проектуванні конденсаційно-охолоджувального пристрою системи, пристрою, установки з теплоутилізатором на базі "форсункових камер", може виникнути необхідність в оцінці можливостей використання, що є в наявності на підприємствах, форсункових пристроїв, або серійно вироблених промисловістю. Для цього випадку розрахунок параметрів роботи форсунок на заданий спектр розпилю виконується виходячи з конструктивних особливостей форсунок, відповідно до встановленого режиму роботи в контактному апараті. Алгоритм розрахунку припускає знаходження спектра розпилю форсунки й щільності зрошення в камері конденсаційно-охолоджувального пристрою системи, пристрою, установки, з теплоутилізатором на базі "форсункових камер" і перевірку їхньої відповідності технологічним параметрам роботи. При цьому досягається необхідна гнучкість у виборі конструювання контактного апарата при конструюванні системи, пристрою, установки, з теплоутилізатором на базі "форсункових камер".

Емпірична залежність представлена у роботі [6] дозволяє визначити величину потоку «повної» теплоти в характеристичному елементі ФК експериментальної установки залежно від факторів формування контактної поверхні та співвідношення витрат взаємодіючих середовищ і діє в наступних інтервалах значень: 1) середньологарифмічна різниця ентальпій  $\Delta I_{с.лог.}$ , кДж/кг:  $149,3 \div 304,7$ ; 2) потік «повної» теплоти  $Q_{п}$ , Вт:  $149 \div 178$ ; 3) добуток коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні  $1000\sigma F$ :  $0,48 \div 1,16$ ; 4) відношення середньомасового діаметра крапель до еквівалентного діаметра сопла тангенціальної механічної форсунки  $d_k^y/d_E$ :  $0,36 \div 0,69$ ; 5) відношення витрати пари на вході в ФК до витрати води поданої через форсунку:  $0,0043 \div 0,026$ ; 6) число  $Re_E$ :  $22881 \div 11970$ ; 7) константа розподілу  $n=2$ ; 8) середньологарифмічна різниця температур  $\Delta t_{с.лог.}$ , °C:  $34 \div 77$ ; 9) тепловий к. к. д. ФК експериментальної установки,  $\eta$  %:  $75 - 98$ ; 10) приплив конденсату до теплоносія  $g_k$ , кг/с:  $5,5E-05 \div 6,9E-05$ ; 11) середньологарифмічна різниця парціальних тисків  $\Delta P_{с.лог.}$ , кПа:  $8,7 \div 120,4$ ; 12) коефіцієнт масовіддачі у ФК,  $\beta F$ :  $7,1E-09 \div 8,4E-12$ ; 13) температура парогазової суміші на вході у ФК експериментальної установки  $t_{вх}$ , °C:  $95 \div 110$ ; 14) масова частка пари в парогазовій суміші  $\varphi$ , %:  $4 \div 30$ ; 15) абсолютний тиск на вході у ФК  $P_{вх}$ , кПа:  $91,2 \div 131,7$ ; 16) коефіцієнт витрати дослідної установки:  $A_1 = 10^{-3}$  кг/с. У дослідженому інтервалі значень отримано регресійне рівняння між добутком коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні та комплексною характеристикою масовіддачі:  $\sigma F/A_1 = \sigma F \cdot 10^3 \approx 6,02 \cdot \beta F^{0,1004}$ ,  $R^2 = 0,7$  [6].

На основі отриманих даних результатів виконаних досліджень також отримані залежності між добутком коефіцієнта масовіддачі на площу контактної поверхні у ФК,  $\beta F$  та добутком коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні  $1000\sigma F$ , добутком коефіцієнта теплообміну на площу контактної поверхні, представлені у вигляді графічної залежності рис. 1.

**Рис. 1.** Графік залежності між добутком коефіцієнта масовіддачі на площу контактної поверхні у ФК,  $\beta F$  та добутком коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні  $1000\sigma F$  (отримано в інтервалі дослідних значень [6])



Встановлено чисельні співвідношення між тепловим к. к. д. ФК  $\eta$ , добутком коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні  $\sigma F$  і середньологарифмічною різницею ентальпій  $\Delta I_{\text{с.лог.}}$ .

Аеродинамічний розрахунок контактного апарата системи, пристрою, установки, з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер" полягає у встановленні падіння тиску при проходженні елементів контактного апарата системи, пристрою, установки, з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", що досягається з використанням існуючих залежностей і співвідношень.

Конденсаційно-охолоджувальний пристрій, системи, пристрою, установки утилізації тепла парогазових викидів промислових установок - джерел парогазових викидів мокрого гасіння коксу й мокрої грануляції й інших джерел, включаючи геотермальні - секційна конструкція тепломасообмінного апарата виконаного на базі "форсуноквої камери" з одне - і багатоступінчастим підігрівом теплоносія. Конденсаційно-охолоджувальний пристрій, системи, пристрої, установки утилізації теплоти джерел парогазових викидів промислових установок (мокрого гасіння коксу, мокрої грануляції являє собою багатосекційний контактний апарат, виконаний на базі "форсуноквої камери", із двоступінчастим підігрівом і зустрічною подачею теплоносія в секції через тангенціальні механічні форсунки. Ступені контактного апарата розділяються регульованими заслінками, що дозволяє скоротити перетікання розпиленого теплоносія із ступені в ступень і забезпечити більш рівномірну витрату парогазової суміші в контактному апараті.

Аеродинамічний опір типової горизонтальної форсуноквої камери визначається за виразом

$$[6-11] \Delta P_a = 23\rho_{\Gamma} \frac{V_K^2}{2g}, \text{ Па, де } \rho_{\Gamma} - \text{щільність парогазового потоку в секції контактного апарату,}$$

кг/м<sup>3</sup>;  $V_K$  - швидкість парогазового потоку в секції контактного апарата, м/с. Швидкість парогазового потоку в секціях контактного апарата, виконаного на базі «форсуноквої камери», встановлюється величиною поперечного перерізу секції контактного апарата і об'ємної витрати парогазової суміші і в загальному випадку швидкість може знаходитись в інтервалі від 1 до 8 м/с.

Значення падіння тиску в секції контактного апарата, встановлене по формулі відповідає умовам роботи стандартної форсуноквої камери, що не цілком відповідає умовам роботи контактного апарата установки, пристрою, системи утилізації теплоти процесів гасіння коксу, мокрої грануляції металургійних шлаків (патент України №55206А "Пристрій для мокрої грануляції металургійних шлаків", патенти України №42199А і № 44003А, відповідно: "Пристрій для мокрого гасіння коксу" і "Система для мокрого гасіння розжареного коксу"). Це зв'язано в першу чергу з істотно більшою величиною коефіцієнта зрошення і відмінних властивостей середовища, для яких дослідним шляхом була отримана залежність представлена вище. Тому формула може використовуватись тільки в попередніх розрахунках контактного апарата виконаного на базі "форсуноквої камери" установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", а фактичне значення падіння тиску в секціях, ступенях форсуноквих камер теплоутилізаторів може бути отримане за результатами безпосередніх випробувань промислових установок, пристроїв, систем або на дослідній установці.

Крім апаратів контактного тепломасообміну, відповідно до схем установки, пристрою, системи з теплоутилізатором на базі "форсуноквих камер", представленими на рисунках, розділ 1 [6], ще одним елементом, що розраховується, є рекуперативний теплообмінник теплової мережі. Одними з найбільш ефективних теплообмінників, які можуть застосовуватися поряд з іншими, для передачі тепла технологічних процесів, відносяться вертикальні, інтенсифіковані, рекуперативні, сталеві, кожухотрубчасті теплообмінники. Їх суцільнозварна конструкція дозволяє виключити потрапляння забрудненого шкідливими домішками теплоносія в теплові мережі (населеного пункту, міста й т.п.), а можливості використання в конструкції нержавіючих хімічно стійких марок сталей істотно продовжує строк експлуатації, як окремих секцій, так і всього теплообмінного апарата.

У розділі 4 роботи [6] детально розглянута теоретична база для проведення експериментів

заснована на використанні фізико-математичної моделі одномірного переносу теплоти й маси ( $\alpha$ -модель) стосовно до характеристичного елемента ФК, представленої в розділі 1 і 2 пунктах 1.3, 2.3-2.5 і їхні результати представлені в розділі 4 [6].

У рамках цієї моделі тепломасообмінні процеси досліджуються в сталому режимі роботи експериментальної установки, тобто в умовах сталості в часі температур і тисків середовищ у різних точках ФК [6].

Виходячи з аналогії процесів протікають у тепломасообмінних апаратах виконаних на базі ФК, для одержання адекватної математичної моделі тепломасообміна в ступенях, секціях, характеристичному елементі ФК контактного теплоутилізатора системи утилізації теплоти мокрого гасіння коксу, у роботі [6] застосовувався прикладний регресійний аналіз, заснований на методі виключень, що дозволив досліджувати тільки те рівняння, що найбільше точно відображає фізичну картину процесу. Таким адекватним регресійним рівнянням для  $\alpha$ -моделі переносу, з урахуванням пунктів 1.3, 2.2 і 2.3 і залежностей 1.3, 1.6 і 1.7 розділи 1, 2, є залежність для добутку коефіцієнта масообміну на площу контактної поверхні [6]

$$\sigma F = A_1^{X_1} A_2^{X_2} A_3^{X_3} \dots A_n^{X_n}, \quad (19)$$

де  $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$  – значення критеріїв і коефіцієнтів, що характеризують тепломасообмінні процеси, що протікають у характеристичному елементі ФК;  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$  – експериментальні значення показників ступенів при критеріях і коефіцієнтах регресійного рівняння [6].

Строго говорячи, як визначальний параметр тепломасообмінних процесів може так само бути прийнятий добуток коефіцієнта теплообміну й площі контактної поверхні  $\sigma F$ , а регресійне рівняння, для його визначення, буде, у цілому, подібно залежності представленої також у розділі 4 пункті 4.2 роботи [6]. Величини добутків коефіцієнтів обміну і площі контактної поверхні залежать від безлічі факторів включаючи: 1) зміну температури парогазового потоку на вході й виході з характеристичного елемента ФК; 2) теплових еквівалентів потоків теплоносія й парогазової суміші; 3) співвідношення між потоками "явної" і "повної" теплоти; 4) розміри й умови формування контактної поверхні і т.п. При встановленні визначальних критеріїв і коефіцієнтів як факторів тепломасообміна у ФК, автор ґрунтується на представленому в розділі 2 пункті 2.4 роботи [6] і даній роботі. обґрунтуванні вибору факторів тепломасообміна для розглянутого характеристичного елемента ФК, що полягає в іншій формі врахування факторів формування контактної поверхні, впливу конструктивних параметрів ФК, чим це прийнято в математичній моделі виражає залежністю, що, 4.5, розділ 4 роботи [6] для тепломасообмінних апаратів виконаних на базі ФК [6-11].

Для оцінки точності представлених далі експериментальних залежностей слугує квадрат множинної кореляції  $R^2$ , що визначається у відповідності з залежністю

$$R = \frac{\sum (\bar{C}_i - \bar{C}_i)}{\sum (C_i - \bar{C}_i)},$$

де  $\bar{C}_i$  - передбачуване значення відклику;  $\bar{C}_i$  - середні значення даних експериментів що спостерігаються;  $C_i$  - експериментальні значення параметрів варіаційного ряду [6-11].

Як видно, у роботі [6], (додаток 3), представлені зведені відомості обробки експериментальних даних і характеристики дослідної установки. Тепловтрати в елементах експериментальної установки визначалися виходячи з геометричних характеристик викладених у додатку 3 роботи [6]. Для визначення параметрів парогазової суміші, включаючи: парціальні тиски, щільності компонентів, масові частки компонентів у суміші, газової постійної й інших характеристик суміші в ході експериментів, використані рівняння Менделєєва-Клапейрона, Дальтона, Фільнея й похідні від них залежності для бінарних сумішей, а також дані теплотехнічних таблиць [6-11].

При розгляді мікрорівня тепломасообмінних процесів у контактному апараті на базі "форсункової камери" виходять із двох крайніх умов прогріву одиночної краплі: прогрівом нерухомої й краплі, що рухається відносно навколишнього середовища, теплоносія. Механізм досягнення максимальної ефективності тепломасообмінних процесів полягає в створенні розвинутої поверхні зіткнення взаємодіючих середовищ, що можливо тільки в результаті інтенсивного розпилювання теплоносія в реактивному просторі контактного апарата [6, 7].

**Висновки і напрями подальших досліджень.** Рішенням наукової проблеми розробки методики розрахунку тепломасообміну в конденсаційно-охолоджувальному пристрої установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсункових камер", що наведено в даній пуб-

лікації є: розглянуто тепломасообмін на макрорівні; вивчено можливості одержання розрахункових залежностей з урахуванням найбільшої кількості факторів що впливають на тепломасообмінні процеси; встановлені співвідношення, що найбільше повно виражають картину процесів, що протікають.

Вказаний підхід до проблеми створення методики розрахунків тепломасообміну в контактному апараті, як відомо, дозволяє підвищити загальну ефективність теплоенергетичних установок, теплових схем систем, пристроїв, установок утилізації тепла.

### Список літератури

1. Суртаєв В.В. Високотемпературні некаталітичні нейтралізатори вихлопних газів ДВЗ – ефективний спосіб боротьби з автомобільними забрудненнями / В зб. Розвиток промисловості та суспільства // Матеріали конференції. Том 1.- Кривий Ріг, 2016. – С. 188.
2. Деклараційний патент України №58925А. Пристрій для знешкодження шкідливих викидів двигунів внутрішнього згоряння. /Суртаєв В.В., Суртаєв В. М. Бюл.№ 8.- 15.08.2003.
3. Деклараційний патент України №49452А. Пристрій для знешкодження шкідливих викидів автомобільних двигунів внутрішнього згоряння./ Суртаєв В.В., Суртаєв В.М. Бюл.№ 9.- 16.09.2002.
4. Суртаєв В.В. Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Нагнітачі і теплові двигуни» для студентів спеціальності 6.050601 – теплоенергетика усіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2015, 56 с., Р № 681.
5. Деклараційний патент на корисну модель №10948. Система сухого подрібнення матеріалів./ Суртаєв В.В., Суртаєв В.М., Ведута М.М., Осадчук Ю.Г. Бюл.№ 12.- 15.12.2005.
- 6 Підвищення ефективності утилізації теплоти при мокрому гасінні коксу. /Дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук., Суртаєва В.В. за спеціальністю 05.14.06. - «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. 2008.
7. Суртаєв В.В. Методичні вказівки до виконання самостійних робіт з дисципліни «Джерела тепло енергопостачання промислових підприємств» для студентів спеціальності 6.050601 – Теплоенергетика усіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 9 с., Р № 175.
8. Суртаєв В.В. Практикум з дисципліни «Системи виробництва і розподілу енергоносіїв» для студентів на пряму підготовки 6.050601 «Теплоенергетика» всіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 16 с., Р № 165. 9. Суртаєв В.В. Методичні вказівки до виконання самостійних робіт з дисципліни «Системи виробництва і розподілу енергоносіїв» для студентів спеціальності 6.050601– Теплоенергетика усіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 9 с., Р № 176.
10. Суртаєв В.В. Практикум з дисципліни «Надійність теплоенергетичних систем» для студентів спеціальності 7.05060101, 8.05060101 «Теплоенергетика» всіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 19 с., Р № 83.
- 11.Суртаєв В.В. Методичні вказівки до виконання самостійних робіт з дисципліни «Надійність теплоенергетичних систем» для студентів спеціальності 7.05060101, 8.05060101– Теплоенергетика усіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 8 с., Р № 17

УДК 622.013: 622.012.2

Б.М. АНДРЕЄВ, д-р техн. наук, проф., Д.В. БРОВКО, д-р техн. наук, доц.,  
В.В. ХВОРОСТ, В.В. КОНОНЕНКО, кандидати техн. наук, доценти

Криворізький національний університет

О.В. РОМАНЕНКО, д-р техн. наук, проф.

ПАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат»

## ОБГРУНТУВАННЯ РІЧНОЇ ПРОДУКТИВНОСТІ ВІДПРАЦЮВАННЯ ЗАПАСІВ ВАСІНОВСЬКОГО РОДОВИЩА

**Мета.** Виробництво залізної руди в світі протягом останніх років постійно зростає в зв'язку з ростом попиту, при цьому спостерігається тенденція до посилення концентрації виробництва. На тлі закриття дрібних рудників, великі виробництва розширили свої потужності. Огляд і аналіз сучасного світового досвіду будівництва і експлуатації шахт на крутопадаючих родовищах міцних руд дозволяє говорити про ряд характерних тенденцій у розвитку геотехнологій, які без сумніву можуть бути перенесені і адаптовані для гірничо-геологічних умов Васіновського родовища.

**Методи дослідження.** При вирішенні поставленої задачі використовуються сучасні програмні комплекси для моделювання розвитку запроєктованих рішень, з урахуванням взаємодій та явищ. Вони відрізняються способами завдання вихідних параметрів, та мають свої певні інструменти для аналізу отриманих результатів.

**Наукова новизна.** Актуальність даної роботи пов'язана із розв'язанням поставленої задачі. Її результатом є встановлення залежності річної продуктивності пускового комплексу за гірськими можливостями та за умови розкриття декількох покладів. Моделювання можливого розміру річного видобутку в залежності від стану, в якому перебуває підприємство.

**Практична значимість.** Дослідження дають змогу оцінити можливу інтенсивність відпрацювання обсягів підземного видобутку на родовищі та спрогнозувати термін служби періоду відпрацювання розвіданих запасів.

**Результати.** В роботі обґрунтовано продуктивність гірничих підприємств, що адаптовані для гірничо-геологічних умов Васіновського родовища. Встановлено річну продуктивність пускового комплексу за гірськими можливостями та за умови розкриття покладу Західний. Визначені умови збільшення можливої інтенсивності відпрацювання обсягу підземного видобутку на родовищі, а також недоліки розглянутих аналітичних методів визначення оптимальної потужності рудника. Вивчено вплив геометричних параметрів охоронного цілика, розташованого в межах Центрального покладу, на значення річної продуктивності пускового комплексу по даному покладу.

**Ключові слова:** залізна руда, шахта, круто-падаюче родовище, гірничо-геологічні умови.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-119-124

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Виробничу потужність або продуктивність гірничих підприємств прийнято виражати в тонах корисної копалини, що видобувається, в рік. Тому її часто називають річним видобутком. Іноді продуктивність гірничого підприємства додатково визначають кількістю річної продукції первинної переробки (концентрату, окатишів і ін.).

Річна виробнича потужність (продуктивність) гірничого підприємства є одним з найважливіших показників. Вона впливає, на всі основні елементи гірничого підприємства, що діє або проектується: на розміри перетину, обсяг, конструкцію капітальних і підготовчих виробок, конструкцію і розміри технічних та адміністративних будівель і споруд, типи, потужність і кількість гірничих машин, що використовуються, на масштаб допоміжних цехів і служб, продуктивність збагачувальних фабрик, число робочих, інженерно-технічних працівників і службовців, обсяг житлового та культурно-побутового будівництва та інші. [1]. Слід розрізняти також річну продуктивність гірничого підприємства, що проектується і діючого підприємства.

Істотна відмінність з техніко-економічної точки зору в цих поняттях полягає в тому, що при проектуванні гірничого підприємства можна розглядати і оцінювати варіанти річної продуктивності в досить широкому діапазоні значень, а потім вибирати з них найкращий. У цьому випадку завдання визначення річної продуктивності часто виявляється складним, вимагає глибокого економічного аналізу та проектного опрацювання.

На діючому підприємстві можливий розмір річного видобутку, як правило, зумовлює техніка, технологія, організація розробки, що застосовуються на ньому. Тут зазвичай виникає завдання чи можливо і доцільно технічно та економічно збільшувати річний видобуток гірничого підприємства шляхом його реконструкції або зміни технології і організації робіт. Таке завдання в практиці доводиться вирішувати часто, так як нарощування виробничих потужностей гірничого підприємства етапами, у міру промислового освоєння родовища і приросту його запасів, виявляється ефективним. На сьогоднішній день моделювання можливого розміру річного видобутку, в залежності від стану в якому перебуває підприємство, має не достатню вивченість.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Питанням щодо методів оцінювання ефективності підприємства займалися такі дослідники як М.І. Агошков, В.А. Симаков, Д.Р. Каплунов, В.А. Шестаков та інші автори [2-5].

Недоліком всіх розглянутих аналітичних методів визначення оптимальної потужності рудника складається в тому, що визначається лише одиничне значення потужності, в той час як її значення практично рівноцінні в межах цілої області. Тому більш правильно вирішувати завдання визначення оптимальної потужності рудника методом варіантів, при яких для кожного родовища вибирається кілька варіантів потужності рудника (в межах найбільш ймовірних значень), одним з яких приймається потужність рудника, максимальна по гірським можливостям. Для кожного значення потужності розрахунком встановлюються відповідні йому показники собівартості, питомих капіталовкладень і питомих приведених витрат і на основі порівняння результатів встановлюється оптимальний варіант з мінімумом приведених витрат.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є обґрунтування продуктивності гірничих підприємств, що адаптовані для гірничо-геологічних умов Васіновського родовища.

**Викладення матеріалу та результати.** При розрахунку річної продуктивності необхідно

враховувати показники експлуатації родовища, максимально можливе річне зниження в поточному періоді, а також умови як найповнішого використання коштів виробництва, раціональний режим роботи, застосування ефективної технології та організації гірничодобувного підприємства, передовий досвід, що забезпечує дотримання вимог безпеки і правил технічної експлуатації [5].

Орієнтовна економічно доцільна річна продуктивність визначається за виразом, млн т/рік [6]

$$A_{\text{зод}} = (0,1 \div 0,15) B_n^{0,77}, \quad (1)$$

де  $B_n$  – запаси родовища, які плануються до відпрацювання, млн т.

Орієнтовна річна продуктивність пускового комплексу при відпрацюванні покладів Західний і Центральний до гар.-100 м складе:

Західний, млн т/рік

$$A_{\text{зод}} = (0,1 \div 0,15) \times 19,3^{0,77} = 1,0 \div 1,5;$$

Західний і Центральний, млн.т/рік

$$A_{\text{зод}} = (0,1 \div 0,15) \times 43,3^{0,77} = 1,8 \div 2,7.$$

Орієнтовна річна продуктивність підземного рудника при відпрацюванні покладів Західний і Центральний до гар.-800 м складе, млн т/рік

$$A_{\text{зод}} = (0,1 \div 0,15) \times 252,8^{0,77} = 7,1 \div 10,6.$$

Дана методика визначення значення річної продуктивності підземного рудника носить емпіричний характер, тому для остаточних розрахунків, річна продуктивність підземного рудника повинна бути визначена з урахуванням гірських можливостей.

Річна продуктивність підземного рудника з урахуванням гірських можливостей [7, 8], а також показника інтенсивності експлуатації родовища (річного зниження) визначається за формулою [9], млн т/рік

$$A_{\text{зод}} = \frac{S_p h_g \gamma_r k_y k_m (1 - P)}{(1 - P)}, \quad (2)$$

де  $S_p$  – горизонтальна експлуатаційна площа рудного тіла в межах шахтного поля, м<sup>2</sup>;  $h_g$  – річне зниження гірничих робіт, м;  $\gamma_r$  – об'ємна вага руди в масиві, т/м<sup>3</sup>;  $k_{из}$  – коефіцієнт вилучення руди, частки од.;  $k_y$  – поправочний коефіцієнт на кут падіння покладу, визначається за формулою  $k_y = 0,0066\alpha + 0,606$ , де  $\alpha$  – кут падіння покладу, град.;  $k_m$  – коефіцієнт, що враховує вплив потужності рудного тіла, коливається від 0,6 до 1,25;  $P$ ,  $\Pi$  – відповідно засмічення та втрати при видобутку руди, частки од.

Відпрацювання родовища підземним способом в початковий період доцільно почати пусковим комплексом на ділянці Західного і Центрального покладів з гір. -100 м системами з обваленням руди і налягають порід. Висота поверху, по гірничо-геологічними умовами, з урахуванням застосування потужної самохідної техніки, приймається рівною 100 м при довжині шахтного поля покладів Західна - 3200 м і Центральна - 1400 м. Передбачувані до відпрацювання запаси  $Q$  в розглянутому поверсі відповідно за покладами складають 21,5 та 21,8 млн т. Рудні площі Центрального і Західного покладів для пускового комплексу складають, відповідно 63991,41 і 62999,9 м<sup>2</sup>.

Для забезпечення безпечних умов роботи, а також збереження денної поверхні частина запасів Центральної ділянки не може бути відпрацьована системами з обваленням і залишається в ціликах (орієнтовно близько 20-40%). Їх відпрацювання можлива менш продуктивними системами із закладкою після освоєння потужностей пускового комплексу. Таким чином, видобувні пусковим комплексом запаси Центральної поклади становлять 13,1 ... 14,4 млн т, а рудні площі по гір. - 100м відповідно 38394,8 ... 51193,1 м<sup>2</sup>.

Величина річного зниження за наявної експлуатаційної площі згідно [10, 11] може змінюватися від 5 до 25 м. Дані значення характерні для рудників чорної металургії з застосуванням традиційних схем розтину, підготовки і технологічного обладнання. Аналіз світової практики, показує, що при використанні потужної вантажно-доставочної, прохідницької та бурової техніки, величина річного зниження гірничих робіт зростає до 50 ... 70 м. Для пускового комплексу, враховуючи особливості періоду розвитку робіт, величина річного зниження приймається 15 м.

Приймаємо в розрахунках середню об'ємну вагу руди  $\gamma = 3,41$  т/м<sup>3</sup>. Поправочний коефіцієнт

єнт на кут падіння покладу складає 1,17, а коефіцієнт, що враховує вплив потужності рудного тіла згідно [5], приймається  $k_m = 0,6$ .

Таким чином, річна продуктивність підземного рудника за умовою можливої інтенсивності відпрацювання родовища складе:

по Західному покладу, млн т/рік

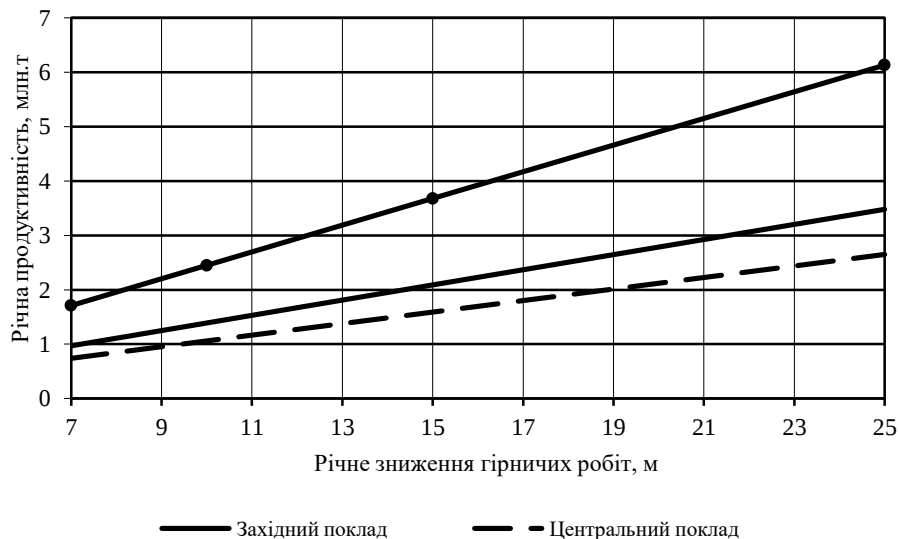
$$A_{\text{зод}} = 62991,90 \cdot 15 \cdot 3,41 \cdot 1,17 \cdot 0,6 \cdot \frac{0,84}{0,91} \approx 2,1;$$

по Центральному покладу, млн т/рік

$$A_{\text{зод}} = 47993,56 \cdot 15 \cdot 3,41 \cdot 1,17 \cdot 0,6 \cdot \frac{0,84}{0,91} \approx 1,6.$$

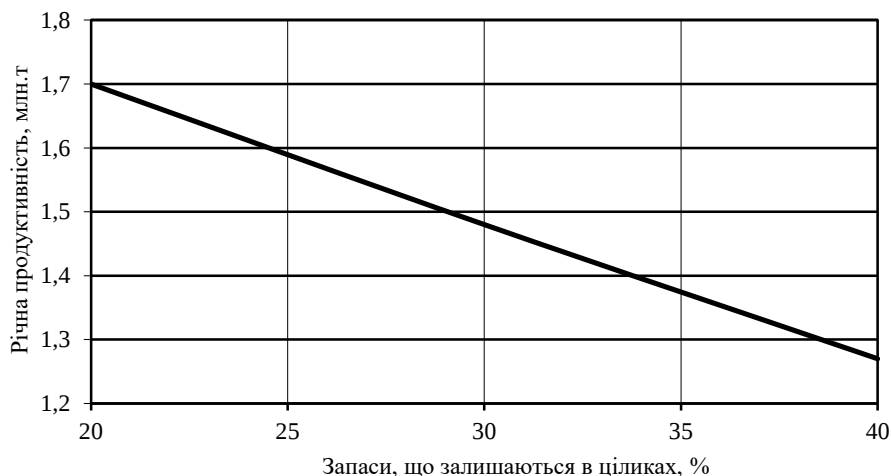
Звідси сумарна річна продуктивність пускового комплексу за умови розвитку гірничих робіт одночасно по Західному і Центральному покладах, може становити близько 3,7 млн т [12, 13].

Зміна величини річного зниження гірничих робіт, обумовлена технологічними факторами, тягне за собою зростання або зниження значення річної продуктивності пускового комплексу. Графіки залежності річної продуктивності пускового комплексу підземного рудника від величини річного зниження гірничих робіт наведені на рис. 1.



**Рис. 1.** Залежність зміни річної продуктивності пускового комплексу від річного зниження гірничих робіт, при 25% запасах залишаються в цілинах Центральної частини покладу

Вплив геометричних параметрів охоронного цілика, розташованого в межах Центрального покладу, на значення річної продуктивності пускового комплексу по покладах наведені на рис. 2.



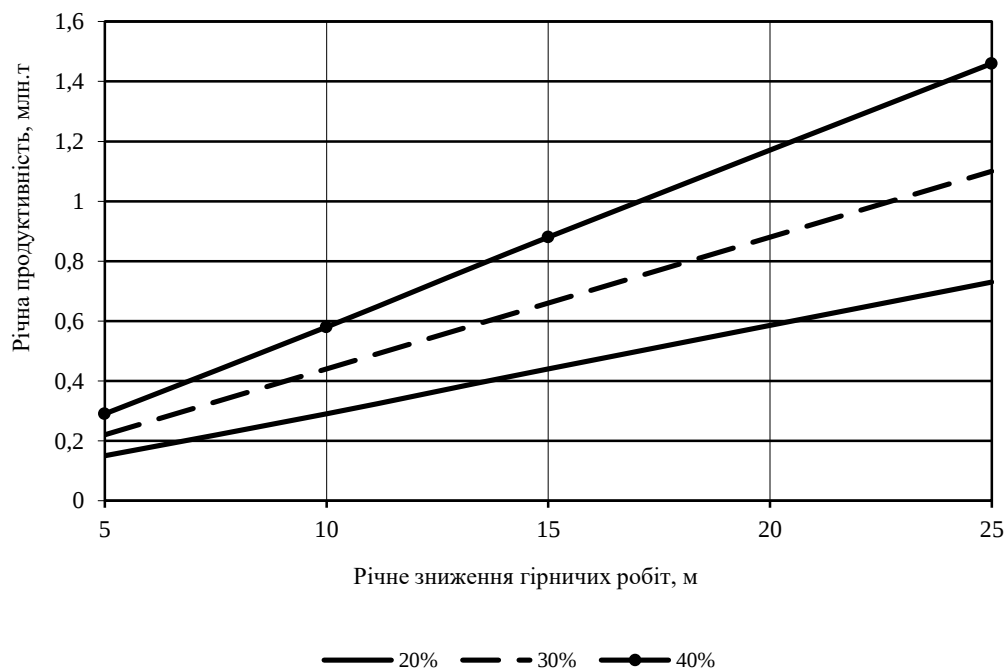
**Рис. 2.** Залежність зміни річної продуктивності пускового комплексу від процентного співвідношення запасів, що залишаються в цілинах Центрального покладу, при річному зниженні гірничих робіт 15 м

Для умов подальшого відпрацювання охоронних ціликів гор.-100 м, (варіант системи розробки із закладкою [14]) графіки залежності річної продуктивності підземного рудника від річного зниження і параметрів охоронних ціликів наведені на рис. 3.

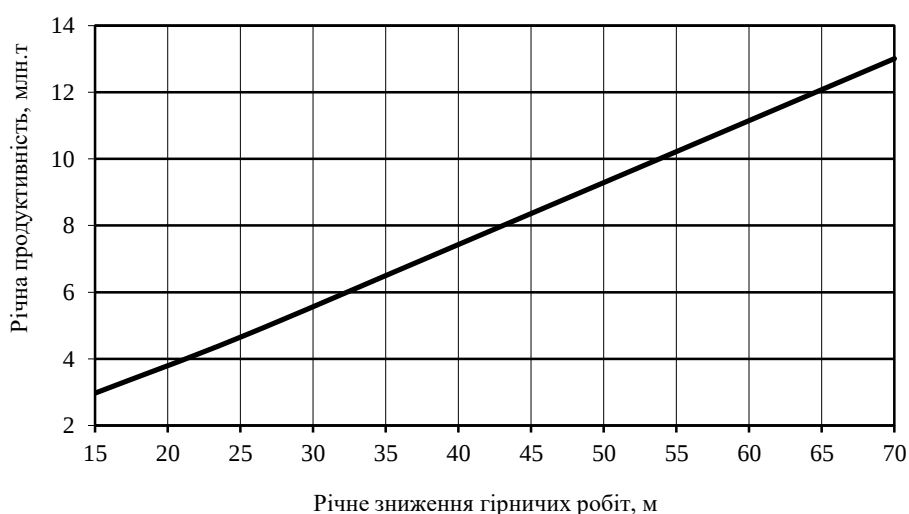
Графік зміни річної продуктивності підземного рудника при одночасному відпрацюванні покладів Західний і Центральний з урахуванням повної та своєчасної підготовки робочих горизонтів в залежності від річного зниження гірничих робіт представлений на рис. 4.

З огляду на викладене вище, приймаємо річну продуктивність для підземної відпрацювання Васіновського родовища в початковий період його експлуатації  $A_{200} = 2,0 \dots 4,0$  млн т.

Обсяг підземного видобутку руди з урахуванням існування вертикального підйому може бути збільшений до значень, розрахованих за умовою можливої інтенсивності відпрацювання (4,0...10,0 млн т/рік).



**Рис. 3.** Залежність зміни річної продуктивності при відпрацюванні охоронного цілика покладу Центральний від річного зниження гірничих робіт і процентного співвідношення запасів залишених в ціликах



**Рис. 4.** Залежність зміни річної продуктивності при відпрацюванні родовища підземним способом до глибини 800 м

При цьому, період відпрацювання розвіданих до глибини 800 м запасів складе, років

$$t_{np} = \frac{k_n Q_{общ}}{A_{зод}} = \frac{0,85 \cdot 209,5}{4,0 \dots 10} = 17 \dots 44.$$

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Річна продуктивність пускового комплексу за гірськими можливостями та за умови розкриття тільки покладу Західний становить близько 2,0 млн т. За умовою можливої інтенсивності відпрацювання обсяг підземного видобутку на родовищі може бути збільшений до 4,0 ... 10,0 млн т / рік. У цьому випадку термін служби періоду відпрацювання розвіданих до глибини 800 м запасів складе 17 ... 44 років. В подальшому необхідно розглянути можливості відпрацювання частини покладу Центральний в межах охоронного цілика системами із закладкою та при цьому нарощувати інтенсивність відпрацювання Васиновського родовища.

### Список літератури

1. **Тонких А.И.** Техничко-экономические расчеты при подземной разработке рудных месторождений: учеб. пособие / **А.И. Тонких, В.Н. Макишин, И.Г. Ивановский** – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 137 с.
2. **Агошков М.И.** Конструирование и расчеты систем и технологии разработки рудных месторождений. – М.: Наука, 1965 г.
3. **Агошков М.И., Малахов Г.М.** Подземная разработка рудных месторождений. – М.: Недра, 1966 г.
4. **Симаков В.А.** Горная производительность рудника. – М.: 1978 г.
5. **Шестаков В.А.** Проектирование рудников. – М.: Недра, 1987 г.
6. Отчет о детальной разведке Васиновского месторождения железистых кварцитов, проведенной в 1983-1989 гг., с подсчетом запасов по состоянию на 01.08.89.: Книга 1. Текст отчета/ ГКГУ Укргеология. ПГО Южукргеология. Приазовская геологоразведочная экспедиция; № ГР 39-83-119/21; Инв. № 52079. – Волноваха, 1989. – 434 с.
7. Конъюнктура железной руды. – Горный мир №1, 2006. – С.4.
8. Early investments in technology pay dividends for LKAB. Foscor S. – Engineering & Mining Journal, 2005, №9. – P. 38-40.
9. **Андреев Б.Н., Сергеева А.А., Андреев Н.Б.** Строительство и эксплуатация шахт вблизи рудных карьеров: современный мировой опыт, тенденции развития геотехнологий // Вісник Криворізького технічного університету: Збірник наукових праць. – Кривий Ріг: КТУ. – 2007. – Вип. 17. – С. 37 – 40.
10. Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий черной металлургии с подземным способом разработки ВНТП 13-2-85. – Л.: Гипроруда, 1986. – 130 с.
11. Справочник по горнорудному делу / Под ред. **В.А. Гребенюка, Я.С. Пыжьянова, И.Е. Ерофеевна.** – М.: Недра, 1983. – 816 с.
12. Подземная разработка железистых кварцитов / **Бабаянц Г.М., Вертлейб Л. К., Журин Н. Я.** и др. – М.: Недра, 1988. – 168 с.
13. Инструкция «Нормативы потерь и засорения руды при подземной разработке магнетитовых кварцитов на рудниках Кривбасса». – Кривой Рог: НИГРИ, 1989.
14. **Кравченко В.П., Куликов В.В.** Применение твердеющей закладки при разработке рудных месторождений. – М.: Недра, 1974. – 200 с.

УДК 681.5:621.311.243

С.О. РОМАНОВ, О.О. ГРАММ, асистенти, О.І. САВИЦЬКИЙ, канд. тех. наук., доц.  
Криворізький національний університет

### МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ ГЕНЕРАЦІЇ АКТИВНОЇ ТА КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ НА СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯХ

**Мета.** Метою статті є розробка моделі системи керування сонячною електростанцією за умов роботи її у відповідності до вимог мережі та з врахування потреб споживача, яким постає оператор систем передачі електроенергії.

**Методи дослідження.** Методи дослідження в даній роботі включають аналітичне дослідження систем генерування електроенергії від сонячного випромінювання та математичне моделювання генерування електроенергії.

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано систему керування, що дозволяє працювати сонячній електростанції за різних режимів роботи. Такі режими роботи включають в себе як стандартний режим на генерування максимальної активної потужності за будь-яких умов, так і роботу у неоптимальному режимі за умов отримання замовлення на електроенергію від оператора систем передачі. Такими неоптимальними режимами є резервування активної енергії для компенсації коливання частоти, внаслідок динамічної зміни погодних умов, а також за підтримки неадекватного значення активної потужності при отриманні замовлення від споживача. Також система здатна працювати у

випадку отримання замовлення на реактивну потужність, що може спричинити зменшення генерування активної потужності за рахунок встановлення пріоритету компенсації електростанцією реактивної потужності.

**Практична значимість.** В статті приводиться модель системи керування сонячною електростанцією, яка виступає основою для подальшого моделювання її роботи. Встановлено залежності активної та реактивної енергії в залежності від умов навколишнього середовища та при різних режимах роботи електростанції, що виражається у зонах можливості генерування потужностей СЕС.

**Результати.** В результаті проведеної роботи встановлено можливість роботи електростанції не тільки за її стандартного режиму, а й у неоптимальних точках потужності за рахунок впровадження системи керування, що є базою для подальшої розробки більш складних систем керування з урахуванням більшої кількості факторів, а не лише вимог мережі та еталонного значення потужностей.

**Ключові слова:** система керування, сонячна електростанція, активна потужність, реактивна потужність, генерування, компенсація, електроенергія.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-124-131

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** Фотоелектричні інвертори використовувались у невеликих фотоелектричних системах, де додаткові послуги не потребували вирішення. Однак, з розвитком СЕС, контроль активної та реактивної потужності протягом дня став проблемою. Таким чином, управління PV-генератором повинно бути вдосконалено з урахуванням вимог мережі та кривих потужностей.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Зазвичай у невеликих фотоелектричних системах управління активною потужністю було розроблено шляхом відстеження точки максимальної потужності (MPPT), і майже всі методи MPPT використовуються за різних умов експлуатації. Однак у СЕС цей підхід вже не діє через їх нові експлуатаційні вимоги. Одним із рішень для регулювання активної потужності є використання накопичувача енергії, але це впливає на збільшення вартості установок. У цьому напрямку було проведено багато досліджень, де основною проблемою є обмеження коливань активної потужності [1,2]. Альтернативним рішенням є вдосконалення управління шляхом врахування характеристик фотоелектричного генератора. Поки що в цій галузі досліджень обмежено, і мало робіт було розроблено. Наприклад, [3] пояснює, як можна досягти постійного виробництва електроенергії без використання накопичувача енергії протягом обмеженої частини доби. Управління розроблено для двоступеневого інвертора DC-DC, а інші вимоги до мережі не вивчаються. Крім того, дослідження, представлене в [4], пояснює управління активною потужністю для регулювання частоти за допомогою двоступеневого PV-інвертора (DC-DC напруги). Запропоноване управління змінює робочий цикл на перетворювачі постійного струму, коли відбувається відхилення частоти. Той самий підхід був представлений різними авторами, такими як [5] та [6]. Однак жоден з них не включає зміни сонячного опромінення або криві потужності використовуваного фотоелектричного генератора. Для одного етапу інверсії, було представлено дослідження [7], де управління активною та реактивною потужністю розробляється шляхом зміни опорної напруги ланцюга постійного струму, а також показника модуляції. Однак цей метод не застосовувався при змінному сонячному опроміненні.

З іншого боку, для регулювання реактивної потужності фотоелектричних систем в СЕС було розроблено декілька робіт. Наприклад, [8] пояснює управління реактивною потужністю та те, як крива можливостей може вплинути на реакцію. Однак зміна умов навколишнього середовища при цьому підході не враховується. Крім того, у [9] є опис керування інверторами у якості статичного синхронного компенсатора для підтримки мережі, коли відбувається коливання потужності. Однак у цій роботі враховується залишкова потужність інвертора і залежить від поведінки сонячного опромінення. З загальної точки зору, без будь-якого конкретного джерела енергії, нові типи регулювання реактивної потужності для мережевих інверторів були представлені в [10,11]. Ці дослідження не враховують зміни сонячного опромінення протягом дня або відповідні криві потужності фотоелектричного генератора.

Варто зазначити, що контроль активної та реактивної потужності в СЕС не розглядався, беручи до уваги криві потужності PV-генератора або комбіновані обмеження продуктивності між PV-інвертором та PV-масивом. Ці криві характеризуються чотирма основними параметрами: сонячне опромінення, температура, напруга постійного струму та індекс модуляції. У тому випадку, коли напруга постійного струму дорівнює одному значенню, активна потужність та реактивна потужність залежатимуть головним чином від сонячного опромінення, температури

та індексу модуляції. Але у випадку, коли напруга постійного струму є змінною, повну криву можна отримати для певного значення сонячного опромінення та температури. Таким чином, можна розробити вдосконалений контроль активної та реактивної потужності для відповідності вимогам мережі та замовленню.

**Постановка задачі.** Задачею є запропонувати новий контроль активної та реактивної потужності для фотоелектричного генератора з урахуванням відповідних кривих потужності та вимог мережі. Що стосується активної потужності, досягаються дві основні цілі: скорочення потужності та запаси потужності, використовуючи адаптацію MPPT. Для управління реактивною потужністю розглядаються два міркування: перевагу активної перед реактивною потужністю та перевагу реактивної над активною потужністю.

**Викладення матеріалу та результати.** Контроль СЕС дозволяє його інтеграцію в електричну систему з урахуванням вимог кожної окремої мережі, отже, електростанції такого типу можуть брати участь у допоміжних послугах. Основними цілями контролю СЕС є контроль активної та реактивної потужності для управління напругою та рівнями активної та реактивної потужності СЕС у роботі на мережу.

Для вирішення цих цілей розглядається ієрархічна архітектура управління, як це проілюстровано на рис. 1, де першим етапом є оператор електричної системи, який надсилає вимоги, потім другим етапом є управління електростанцією, а третім ступінь – PV-генератор.

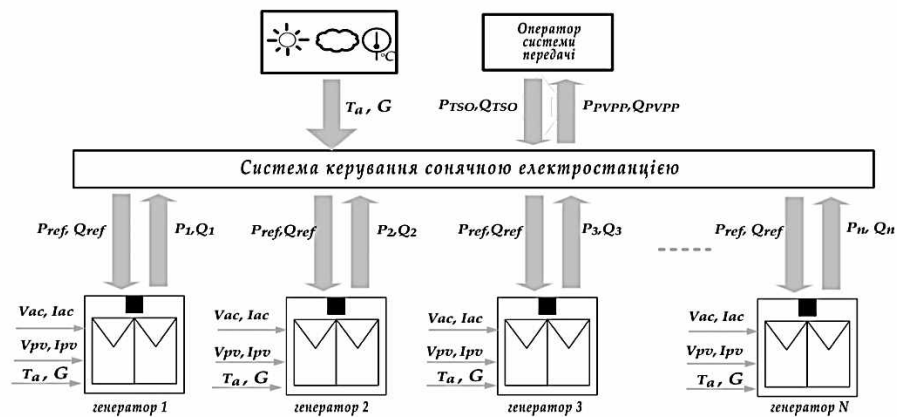


Рис. 1. Запропонована архітектура керування для СЕС

Контроль СЕС зосереджений на розрахунку активної та реактивної потужності за значеннями, що надані оператором системи передачі. Він також відповідальний за застосування заходів підтримки мережі, наприклад у випадку порушень. У цьому елементі управління можна застосувати PI-регулятор, щоб зменшити похибку між еталоном та потужністю, доступною в мережі фотоелектричного масиву. Загальна активна або реактивна потужність, розрахована контролером, ділиться на загальну кількість генераторів СЕС (рис. 2).

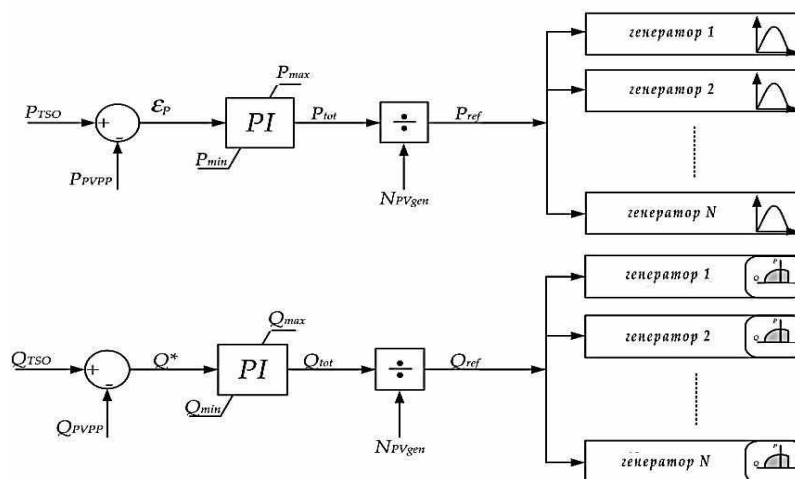


Рис. 2. Управління активною або реактивною енергією

Після обчислення необхідних величин енергії, система керування розробляє контролюючий вплив відповідно до вимог мережі та поведінки внутрішньої мережі, щоб підтримувати постійну напругу та частоту змінного струму. Загальна структура управління PV-генератором проілюстрована на рис. 3, де можна побачити три основні блоки: система керування, система MPPT та управління інвертором. Під керуванням активної та реактивної потужності розуміється забезпечення потужності, що вимагається системою керування. Цей регулятор повинен враховувати зміну умов навколишнього середовища та криві потужності PQ для фотоелектричного генератора. Тим часом управління інвертором відповідає за синхронізацію мережі, модуляцію напруги, регулювання напруги постійного струму та контур струму.

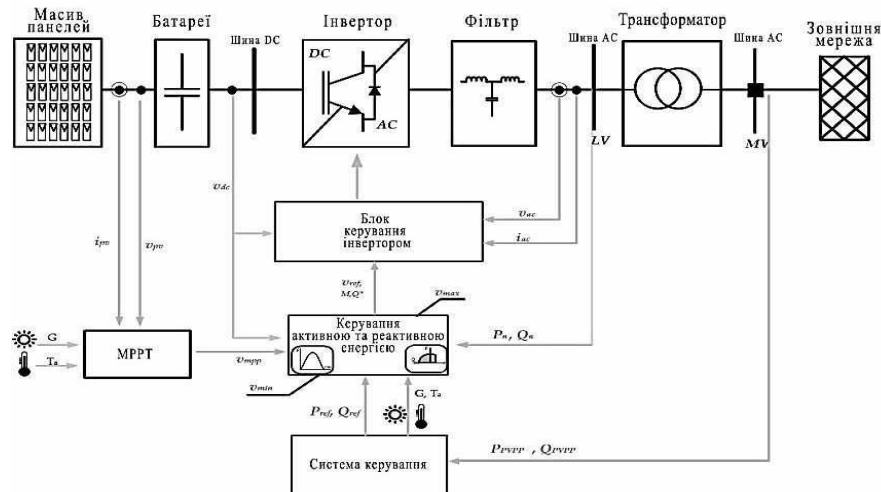


Рис. 3. Загальна структура управління PV-генератором, підключеного до мережі

При управлінні активною потужністю СЕС слід враховувати: скорочення потужності та резерви активної потужності. У звичайному способі керування передбачається, що фотоелектричний генератор працює на досягнення максимально можливого значення активної потужності. Регулювання активної потужності залежить від сонячного опромінення, температури та постійної напруги. Однак, щоб активне управління енергією мало залежало від умов навколишнього середовища та відповідало кодам мережі, цей контроль слід змінити.

Для вирішення цього обмеження потужності PV-генератор не може працювати за алгоритмом MPPT. Натомість регулятор повинен працювати близько до еталону активної потужності ( $P_{ref}$ ), встановленого оператором систем передачі. Таким чином, використовується метод підтримки еталонного значення потужності (RPPT), метою якого є пошук  $P_{ref}$  в кожен момент. З цією метою будь-який алгоритм, що використовується для MPPT, може також використовуватися в RPPT, але цільова точка – це те, що змінюється. У цьому випадку, коли використовується метод збурення та спостереження, напруга постійного струму змінюється з кроками ( $\Delta v$ ), поки активна потужність, що подається від PV-масиву, не збігається з еталонною. Кожного разу, коли змінюється сонячне опромінення, алгоритм повинен вирішувати лише те, чи має значення опорної напруги постійного струму збільшувати чи зменшувати своє значення (рис. 4). Однак, коли сонячне опромінення змінюється, посилення на активну потужність може бути вищим, ніж максимально можлива потужність, яку може подавати фотоелектричний генератор. У цьому випадку алгоритм починає працювати як звичайний MPPT.

Враховуючи цей підхід та криву активної потужності при сонячному випромінюванні (крива PG), можна виділити дві зони роботи: управління MPPT (I), управління RPPT (II) (рис. 5). Коли значення сонячного опромінення занадто низьке (менше  $50 \text{ Вт/м}^2$ ), фотоелектричний генератор не може працювати належним чином, оскільки напруга постійного струму може бути нижчою за  $v_{min}$ . По мірі збільшення сонячного опромінення, фотоелектричний генератор починає працювати за алгоритмом MPPT для отримання номінального значення. За умов отримання замовлення від оператора систем передачі електроенергії, використовується алгоритм RPPT, для підтримки роботи СЕС на еталонному рівні потужності.

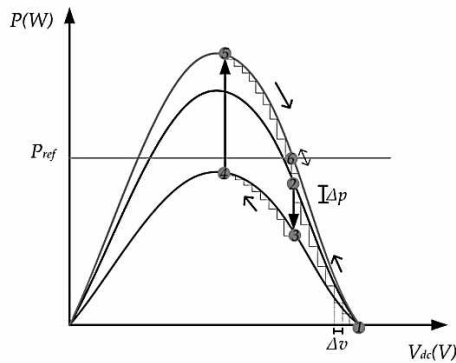


Рис. 4. Контроль зменшення потужності: робота RPPT у фотоелектричному генераторі

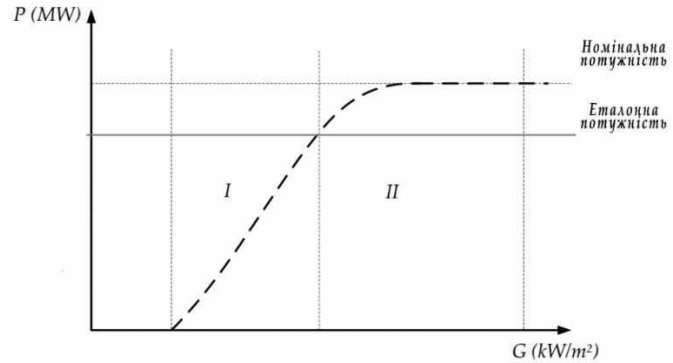


Рис. 5. Контрольні зони фотоелектричного генератора на кривій PG

Коливання сонячного опромінення протягом доби разом із хмарним перекриттям можуть спричинити коливання частоти внаслідок коливання генерованої активної потужності. Така ситуація може статися за сценарію, коли більша частина енергії походить від відновлюваних джерел енергії. Тому обмеження певних мереж вимагають, щоб електростанції мали запаси потужності, щоб надати свого роду компенсацію активної потужності для регулювання первинної та вторинної частоти.

Щоб мати такий тип відгуку, необхідно, щоб фотоелектричний генератор не подавав максимальну потужність, і натомість він повинен працювати в неоптимальній робочій точці відповідно до характеристик мережі. Запас потужності може становити від 10% до 20% від потужності електростанції (рис. 6).

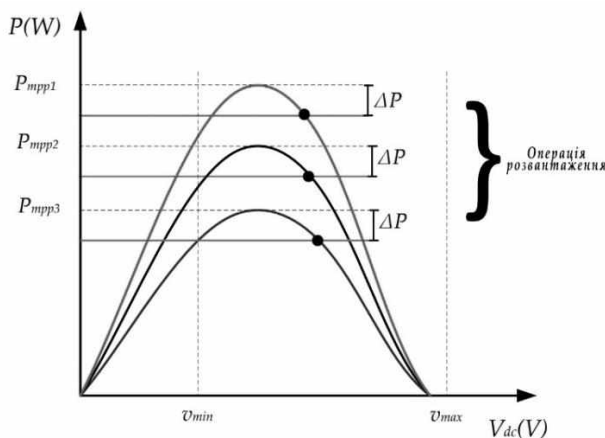


Рис. 6. Операція розвантаження в фотоелектричних генераторах

Для управління PV-генератором з запасами активної потужності необхідно розраховувати на кожному часовому кроці можливу максимальну активну потужність, яку PV-генератор може подавати. Потім еталонну потужність слід задавати у відсотках, що вимагається оператором, від максимально можливої активної потужності

$$P_{res} = \Delta P_{tso} * P_{DCmpp}(G, T_a),$$

$$P_{ref} = P_{DCmpp}(G, T_a) - P_{res},$$

де  $P_{res}$  – потужність резерву,  $P_{ref}$  – еталонне значення активної потужності,  $\Delta P_{tso}$  – різниця значень замовлення потужності від оператора, задається оператором у відсотках від номінального значення потужності СЕС,  $P_{DCmpp}$  – активна потужність, генерована в даний момент часу,  $G$  – сонячне випромінювання,  $T_a$  – температура навколишнього середовища.

Беручи до уваги вимоги мережі, необхідно, щоб СЕС могли подавати або поглинати реактивну потужність через порушення напруги або вимоги мережі.

Однак через обмеження та криві можливостей, неможливо забезпечити або поглинути реактивну потужність за заданого еталону. Отже, можлива реактивна потужність, яку може подавати або поглинати СЕС, в основному залежить від активної потужності, яка змінюється залежно від сонячного опромінення, температури, напруги постійного струму та індексу модуляції. Якщо показник реактивної потужності  $Q_{ref}$  невеликий, фотоелектричний генератор може досягти цього значення майже для будь-якого сонячного опромінення або температури, за винятком більшого сонячного опромінення (рис. 7а). Тим часом для вищих значень тоді неможливо забезпечити реактивну потужність при будь-якому сонячному опроміненні (рис. 7б).

Таким чином, для вирішення цієї проблеми з метою забезпечення певної реактивної потужності, незважаючи на умови навколишнього середовища, система керування встановлює реактивну потужність як пріоритет своєї роботи. Система керування отримує замовлення на реак-

тивну потужність, надане оператором установки, тоді, якщо регулювання реактивної потужності не є пріоритетним, управління розробляється зі звичайним регулюванням активної потужності. Але якщо реактивна потужність встановлена в якості пріоритету, то PV-генератор повинен розрахувати максимальну реактивну потужність ( $Q_{mpp}$ ), яку PV-генератор може забезпечити в цей момент. Якщо еталон нижче цього значення, система намагається витримувати максимально можливе значення реактивної потужності.

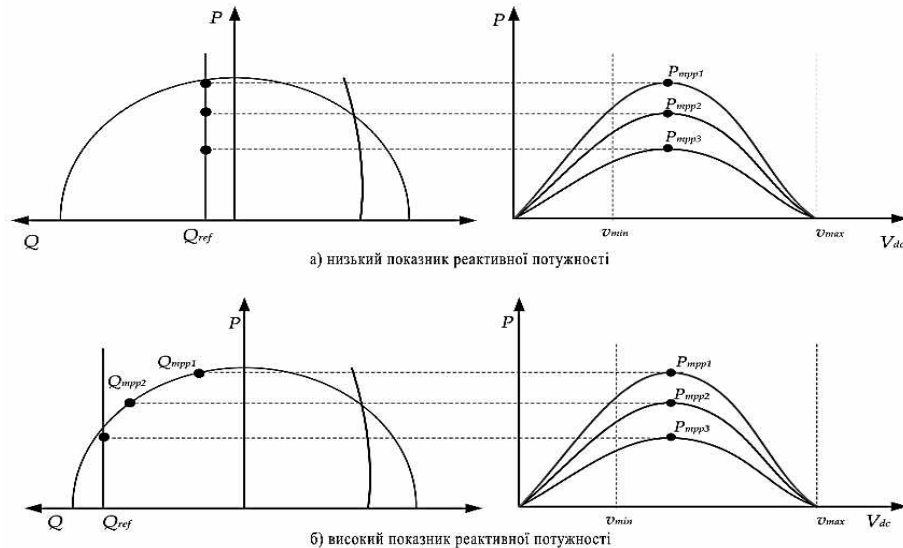


Рис. 7. Показники  $Q_{ref}$  реактивної потужності

Однак, якщо показник реактивної потужності вищий, ніж  $Q_{mpp}$ , тоді активну потужність слід зменшувати, у залежності від поглинання або генерування реактивної потужності, відповідно з

$$P_{ref} = \sqrt{S^2 - Q_{ref}^2},$$

$$P_{ref}^2 + (Q_{ref} + \frac{3V_{grid}^2}{X})^2 = (3 \frac{V_{grid} * V_{conv}}{X})^2,$$

де  $S$  – повна потужність,  $Q_{ref}$  – еталонне значення реактивної потужності,  $V_{grid}$  – напруга мережі,  $V_{conv}$  – напруга перетворювача,  $X$  – реактивний опір.

Важливо зауважити, що при кожному зміні сонячного опромінення генерована активна потужність змінюється в залежності від величини постійної напруги. Елемент управління RPPT повинен знову відстежувати еталон активної потужності, розрахований завдяки еталону реактивної потужності. Ця поведінка проілюстрована на рис. 8, де перша точка стосується даного сонячного опромінення.

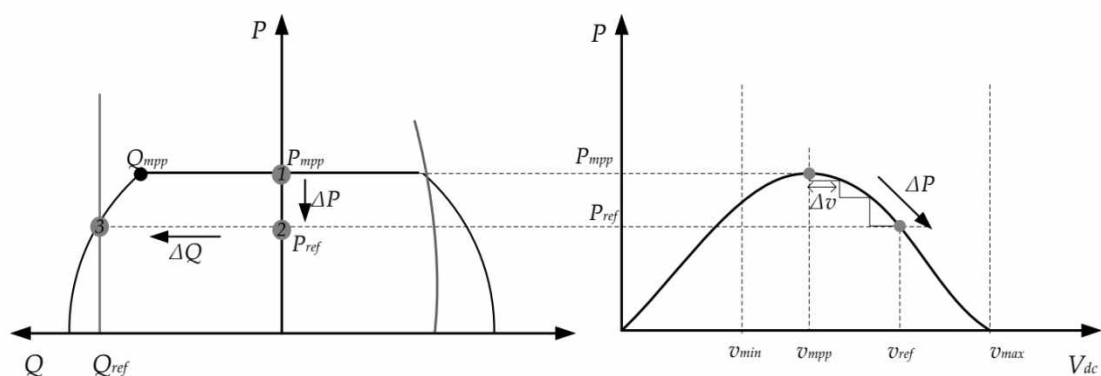


Рис. 8. Регулювання реактивної потужності для кожного значення сонячного опромінення

На даний момент активною потужністю, яку може подавати фотоелектричний генератор, є  $P_{MRPT}$  (точка 1) у випадку активації будь-якого скорочення або резерву потужності. У цей момент отримується замовлення на реактивну потужність та передається системі керування. Однак при цій еталонній потужності, реальна  $Q_{MRPT}$  нижча за еталон. Тому обчислюється новий показник активної потужності ( $P_{refl}$ ). Для цього точка напруги постійного струму повинна змінитися з  $v_{mpp}$  на  $v_{ref}$ , і фотоелектричний генератор починає працювати в точці 2. Тоді генератор може подавати значення реактивної потужності, рівне еталонному (точка 3). У разі зміни сонячного опромінення створюється нова крива PV, через значення напруги постійного струму новою активною потужністю є P2, і генератор PV матиме нові криві PV та зону можливостей PQ, що призводить до нових перерахунків можливих P та Q і відповідності їх еталонам замовлення. Оскільки управління RPPT має слідувати еталону реактивної потужності, тоді напруга постійного струму зменшується, щоб досягти еталону.

**Висновки та напрям подальших досліджень.** Після аналізу багатьох досліджень, було виявлено, що проблема керування активною та реактивною енергією на СЕС є не до кінця вивченою, та в цьому полі ще є нерозглянуті питання. Одним із таких є комплексне керування активною та реактивною енергією у відповідності до вимог мережі та з урахуванням можливого споживача у вигляді оператора систем передачі.

Керування сонячною електростанцією, за таких умов та при максимізації одного лише показника активної енергії не є можливим, тому пропонується система керування, що має різні режими роботи відповідно до закладених в неї алгоритмів, а саме: звичайна робота на максимум активної енергії, або отримання замовлення та розрахунок деякого еталонного значення активної та реактивної потужності з дотриманням цього еталону за допомогою системи керування СЕС.

Напрямом подальшого дослідження спрямовані є комп'ютерне моделювання такої системи керування для встановлення адекватності її функціонування, коригування та перевірка роботи системи у відповідності до вимог конкретної мережі у якості споживача зі своїм оператором систем передачі електроенергії.

#### Список літератури

1. M. Alam, K. Muttaqi, and D. Sutanto, "A Novel Approach for Ramp-Rate Control of Solar PV Using Energy Storage to Mitigate Output Fluctuations Caused by Cloud Passing," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 29, no. 2, pp. 507–518, jun 2014.
2. M. Datta, T. Senjyu, A. Yona, and T. Funabashi, "A Coordinated Control Method for Leveling PV Output Power Fluctuations of PVDiesel Hybrid Systems Connected to Isolated Power Utility," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 24, no. 1, pp. 153–162, mar 2009.
3. Y. Yang, F. Blaabjerg, and H. Wang, "Constant power generation of photovoltaic systems considering the distributed grid capacity," in 2014 IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. - APEC 2014, IEEE, mar 2014, pp. 379–385.
4. A. Okou, O. Akhrif, R. Beguenane, and M. Tarbouchi, "Nonlinear control strategy insuring contribution of PV generator to voltage and frequency regulation," in 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012). IET, 2012, pp. D42–D42.
5. A. Hoke and D. Maksimovic, "Active power control of photovoltaic power systems," in 2013 1st IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech). IEEE, aug 2013, pp. 70–77.
6. F. He, Z. Zhao, L. Yuan, and S. Lu, "A DC-link voltage control scheme for single-phase grid-connected PV inverters," in 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. IEEE, sep 2011, pp. 3941–3945.
7. A. Moghadas, A. Sargolzaei, M. Moghaddami, A. I. Sarwat, and K. Yen, "Active and reactive power control method for three-phase PV module-integrated converter based on a singlestage inverter," in 2017 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). IEEE, mar 2017, pp. 1357–1362.
8. R. Shah, N. Mithulananthan, R. Bansal, and V. Ramachandaramurthy, "A review of key power system stability challenges for large-scale PV integration," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 41, pp. 1423–1436, jan 2015.
9. H. Maleki and R. K. Varma, "Coordinated control of PV solar system as STATCOM (PV-STATCOM) and Power System Stabilizers for power oscillation damping," in 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM). IEEE, jul 2016, pp. 1–5. [Online]. Available: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7741813/>
10. R. Sadnan and M. Z. R. Khan, "Fast real and reactive power flow control of grid-tie Photovoltaic inverter," in 2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE). IEEE, dec 2016, pp. 570–573.
11. S. Weckx, C. Gonzalez, and J. Driesen, "Combined Central and Local Active and Reactive Power Control of PV Inverters," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 5, no. 3, pp. 776–784, jul 2014.

УДК622.274.3

І.П. КУШНЕРЬОВ, Ю.Ю. КРИВЕНКО, І.І. МАКСИМОВ, кандидати техн. наук, доценти  
Криворізький національний університет

## УТВОРЕННЯ КОМПЕНСАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ В ЛЕЖАЧОМУ БОЦІ ПОХИЛОГО ПОТУЖНОГО ПОКЛАДУ

**Мета.** Удосконалення систем розробки корисних копалин для підвищення показників вилучення рудної маси з виїмкової одиниці шляхом розробки та обґрунтування нового способу утворення та місця розташування компенсаційного простору при відпрацюванні похилих рудних покладів на глибоких горизонтах шахт.

**Методи досліджень.** Аналіз та узагальнення існуючих технологій виїмання рудних покладів, процесів стійкості оголень порід, теоретичне та практичне встановлення параметрів компенсаційного простору та моделювання схем і порядку його створення в залежності від показників втрат та засмічення корисних копалин.

**Наукова новизна.** Обґрунтовані необхідність та можливість застосування камерних систем розробки на глибоких горизонтах рудних шахт. На основі встановлених залежностей об'єму компенсаційного простору по руді та породі в лежачому боці покладу, його черговості створення розроблена нова за формою та конструкцією компенсація для відбійки масиву руд в очисному блоці. Вперше встановлено алгоритм виконання робіт по утворенню компенсаційного простору в залежності від кута падіння покладу, природного укосу обваленої рудної маси та конструктивних елементів системи розробки в умовах активної дії гірського тиску.

**Практична значимість.** Розроблена інноваційна конструкція компенсаційного простору та технологічна схема його утворення на межі контакту рудного покладу з породами лежачого боку у вигляді зрізаного площиною по лінії падіння покладу конуса. Параметри компенсації пов'язані з розмірами блоку, кутом падіння покладу та можливістю виконання селективного випуску порід для утворення компенсаційного простору першої черги, що дозволяє знизити втрати та засмічення корисних копалин на виїмковій ділянці та підвищити ефективність добування руд.

**Результати.** Виконано аналіз сучасного стану застосування систем розробки рудних покладів на досягнутих глибинах шахт. Розроблена технологічна схема утворення запропонованого компенсаційного простору може бути використана при розробці родовищ корисних копалин в інших гірничо-геологічних умовах. Використання даної моделі дозволяє підвищити ефективність відпрацювання запасів очисного блоку, значно зменшити втрати та засмічення рудної маси на лежачому боці і, в цілому, у виїмальній одиниці при її випуску. Також оптимізується час стояння конструктивних елементів системи розробки, підвищується інтенсивність випуску рудної маси та на 3...5% зменшується собівартість видобутку руди при її очисному виїманні.

**Ключові слова:** рудні поклади, компенсаційний простір, система розробки, форма та місце компенсації, схема утворення, вилучення рудної маси.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-131-136

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Природно багаті залізні руди в Криворізькому басейні, в основному, представлені на сьогоднішній день похило- та крутоспадними потужними пластоподібними покладами з очисним відпрацюванням їх шахтами на глибоких горизонтах (1300-1500 м). Значна глибина гірських робіт, надробка і підробка покладів тягнуть за собою активні негативні прояви гірського тиску у різних формах, що значно погіршує показники добування. Тобто, з глибиною розробки напружений стан руд і оточуючих порід та деформаційні процеси в них зростають і це негативно позначається на стійкості порід і рудних оголень в очисних камерах та компенсаційних просторах. А це вагомий засмічення та втрати рудної маси на лежачому боці покладу при технологічному процесі їх випуску, особливо запасів стелін та міжкамерних ціликів, які прогресують зі зменшенням кута падіння покладу і іноді сягають 40-50% від своїх запасів.

Вагомий внесок в вирішення проблеми випуску рудної маси з обвалених блоків виконали відомі вчені під керівництвом акад. Малахова Г. М., які виконали фундаментальні дослідження та видали монографію [1]. В цій роботі викладені основи теорії випуску руди, практичні рекомендації щодо вибору оптимальних конструктивних елементів систем розробки, заходи по організації технологічного процесу переміщення рудної маси при різних умовах, шляхи зменшення втрат та засмічення. Але тут не знайшло відображення впливу місця розташування компенсаційного простору та його параметрів на показники вилучення рудної маси. Таким чином, утворення компенсаційних просторів при системах розробки родовищ корисних копалин, їх розташування дуже тісно пов'язане з показниками вилучення рудної маси з очисних блоків.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Важлива операція в очисному виїманні корисних копалин є створення компенсації при подальшому обваленні руди, в основному, вибуховими робо-

тами. Існують різні способи та технології утворення компенсаційних просторів, їх місця розташування з метою кращого обвалення, подрібнення та подальшого вилучення рудної маси. В роботах [2-5] з метою поліпшення показників вилучення рудної маси запропоновані різні способи утворення компенсаційних просторів за рахунок природного укусу обвалених у порожни-ну камери порід. Але, такі технології дуже витратні та важко контрольований процес перепуску обвалених порід в камеру. Крім цього, в умовах неналежного контролю за процесами руху обвалених порід та рудної маси можливе зниження якості продукції. В роботі [6] пропонується обвалену рудну масу, яка злегла на породах лежачого боку покладу, переміщати за допомогою ряду вибухових свердловинних або концентраційних зарядів. Такі способи потребують значних витрат та в наслідку погіршується якість пересунутої рудної маси.

Покращати вилучення відбитих запасів можливо і за рахунок розташування так званих "уловлюючих" виробок в породах лежачого боку покладу [7, 8]. Для цього потребуються значні капітальні витрати на проведення додаткових підготовчих виробок. З метою підвищення ефективності видобутку автори робіт [9-11] пропонують різні форми, місця розташування компенсаційних просторів та їх орієнтацію в очисному блоці. Вони, як правило, вертикальні, горизонтальні, похилі і розташовані, в основному, в центрі виїмкової одиниці. Вирішення значущого покращання видобутку запасів корисних копалин, які розташовані у похилих боків покладів, не відбувається. З метою підвищення ефективності видобування руд на глибоких горизонтах за рахунок зменшення часу стояння конструктивних елементів системи розробки та її удосконалення запропонована нова технологічна схема відпрацювання покладів [12]. Досконалий аналіз наукових праць та винаходів вказує на те, що в практиці відпрацювання покладів корисних копалин на цей час немає досліджень по взаємозв'язку процесу утворення компенсаційних просторів з наступними показниками по вилученню руди з виїмкової одиниці. В умовах глибоких горизонтів шахт при очисному вийманні середньої та нижче середньої міцності руд об'єм компенсаційних просторів не перевищує 8-12% в залежності від коефіцієнта розпушення, що погіршує якість дроблення та текучість рудної маси. Тому значно знижується ефективність добування, в надрах залишається більше 15- 20% балансових запасів корисних копалин. До того ж засмічення у цих же межах за рахунок виймання запасів різного роду ціликів, похилих кутів залягання покладів знижує якість залізорудної сировини до 53-56%. Сучасні ринкові конкурентні відносини та вимоги металургійної промисловості потребують зростання якості реалізованої шахтами Криворізького басейну рудної маси у межах 59-64% загального заліза. Рентабельність роботи гірничорудних підприємств на пряму залежить від вказаного. Тому наукове обґрунтування розробки високоефективної технології утворення компенсаційних просторів, їх форм та місця розташування є актуальною проблемою сьогодення.

**Постановка завдання.** Для високоефективного відпрацювання похилих потужних покладів корисних копалин на глибоких горизонтах шахт необхідна інноваційна технологія та нові конструктивні особливості елементів виймання очисної одиниці в шахтовому полі. Однією із основних частин технологічної схеми є компенсація для обвалення руд, від параметрів якої та місця розташування значно залежать показники вилучення рудної маси та інтенсивність очисного виймання. Дослідженню закономірностей створення нового компенсаційного простору і присвячена робота.

**Викладення матеріалу та результати.** При відпрацюванні рудних покладів в останні роки на шахтах Криворізького басейну використовуються системи розробки підповерхового обвалення та камерні варіанти. Перші характеризуються більш гіршими по якості вилучення рудної маси з очисних блоків у порівнянні з системами з відкритим очисним простором. Але зараз, у зв'язку зі значними глибинами розробки та негативними проявами гірського тиску спостерігається тенденція відмови від камерних систем розробки та перехід до систем підповерхового обвалення з наслідками погіршення показників якості добування. А якщо і використовувати камерні системи, то необхідно із-за стійкості оголень зменшувати розміри камер з чистою рудою, а цілики з поганими показниками видобування збільшувати. Аналіз застосування вказаних технологічних схем на ряді шахт за минуле десятиріччя вказує, що частка камерних систем розробки зменшилась на 35-40% на користь систем з під поверховим обваленням. Важливим фактором є те, що при застосуванні камерних систем розробки похилих покладів значні запаси чистої руди безпосередньо з камер втрачаються на лежачому боці. Дослідженнями встановле-

но, що цього негативно можливо позбутися оптимальним проектуванням компенсаційних просторів на контакті руди з породою лежачого боку.

Нами розроблена та запропонована нова технологічна схема утворення компенсаційного простору, який розміщується у рудах контакту лежачого боку покладу та частково в прилеглих породах формою у вигляді зрізаного перевернутого конуса. Задачею та сутністю технології є удосконалення способу утворення компенсаційного простору шляхом надання йому вигляду відрізка перевернутого зрізаного площиною по лінії падіння покладу конуса та розміщення його у породах лежачого боку по центру камери (рис. 1).

Досліджені та обґрунтовані параметри при утворенні вказаного компенсаційного простору. Встановлено, що початкові втрати руди зі сторони лежачого боку складуть згідно виразу,  $m^3$

$$V_B = S_{\Delta ABC} \cdot l = \frac{h^2 \cdot l}{2} (ctg \alpha - ctg \beta), \quad (1)$$

де  $l$  – довжина блоку за простяганням, м;  $\alpha$  – кут падіння покладу (в діапазоні 45-60), град.,  $\beta$  – кут текучості відбитої руди, в залежності від ряду властивостей та факторів може складати 65-85, град.;  $h$  – висота блока, який відпрацьовується, м.

Нижня площина фігури компенсаційного простору оконтурюватиметься напівеліпсом з піввісьями  $b_0$  та  $\frac{a_0}{2}$ ;  $a_0$  та  $b_0$  – параметри фігури компенсації, які задаються у відповідності з конструкцією днища та розмірами виймальної одиниць. Так як  $b_0 = h(ctg \alpha - ctg \beta)$  – то є площа напівеліпса (випускний отвір або нижня складова компенсаційного простору), яка дорівнює

$$S_0 = \frac{1}{2} \pi \cdot b_0 \cdot \frac{a_0}{2} = \frac{\pi}{4} \cdot b_0 \cdot a_0, m^2. \quad (2)$$

З урахуванням останнього на висоті  $x$  в перетині фігури маємо напівеліпс з піввісьями  $b_x$  и  $\frac{a_x}{2}$ . При збільшенні  $x$  від 0 до  $h$  параметр  $b_x$  зменшується пропорційно від  $b_0$  до 0, а параметр  $a_x$  зростає від  $a_0$  до  $l$ . Тоді

$$b_x = b_0 \left(1 - \frac{x}{h}\right); \quad (3)$$

$$a_x = a_0 + (l - a_0) \frac{x}{h}. \quad (4)$$

З цього витікає, що площа полуеліпса на висоті  $x$  дорівнює

$$S(x) = \frac{1}{2} \pi \cdot b_x \cdot \frac{a_x}{2} = \frac{\pi}{4} \cdot b_x \cdot a_x \quad (5)$$

або 
$$S(x) = \frac{\pi}{4} \cdot b_0 \cdot \left(1 - \frac{x}{h}\right) \cdot \left[a_0 + (l - a_0) \cdot \frac{x}{h}\right]; \quad (6)$$

$$S(x) = \frac{\pi b_0}{4h^2} \cdot (h - x)[ah + (l - a) \cdot x]. \quad (7)$$

Перетворюємо та отримуємо

$$S(x) = \frac{\pi b_0}{4h^2} \cdot [a \cdot h^2 + h(l - 2a)x - (l - a)x^2]. \quad (8)$$

Об'єм гірничої маси, яку потрібно вийняти для утворення компенсаційного простору визначаємо згідно викладок

$$V = \int_0^h S(x) dx \quad (9)$$

$$\begin{aligned} V &= \frac{\pi b_0}{4h^2} \cdot \int_0^h [ah^2 + h(l - 2a)x - (l - a)x^2] dx = \\ &= \frac{\pi b_0}{4h^2} \left[ ah^2(x|_0^h) + h(l - 2a) \cdot \left(\frac{x^2}{2} \Big|_0^h\right) - (l - a) \cdot \left(\frac{x^3}{3} \Big|_0^h\right) \right] = \\ &= \frac{\pi b_0}{4h^2} \cdot \left[ ah^3 + \frac{1}{2} h^3(l - 2a) - \frac{1}{3} h^3(l - a) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

В результаті перетворень отримуємо

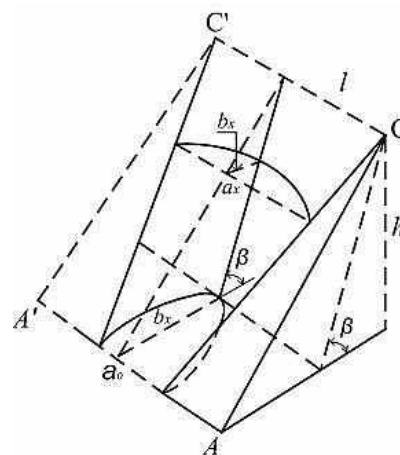


Рис. 1. Розрахункова схема

$$V = \frac{\pi}{24} \cdot h \cdot b_0(l + 2a) \quad (11)$$

$$\text{або} \quad V = \frac{\pi}{24} \cdot h^2 \cdot (l + 2a)(\operatorname{ctg} \alpha - \operatorname{ctg} \beta). \quad (12)$$

Для розглянутих гірничо-геологічних умов об'єм компенсаційного простору запропонованої форми (з еліптичною поверхнею) становить від 0,4 до 0,78 від об'єму можливих втрат руди на лежачому боці.

У відповідності з розрахунками приймаємо параметри компенсаційного простору. Таким чином діаметр нижньої основи його дорівнює відстані на горизонті воронки днища блоку між лінією падіння поклада та лінією природного укосу обваленої рудної маси. Верхня основа конуса є у вигляді сегмента еліпса з великою віссю рівною ширині камери за простяганням та з малою віссю за потужністю відрізної щілини навхрест простягання. Твірні бокові поверхні конуса проходяться під кутом більшим ніж кут природного укосу рудної маси. Виконується повний випуск порід при утворенні простору з подальшим його розширенням відбійкою похилих шарів руди, що дозволяє більш ефективно відпрацьовувати поклад, знизити втрати та засмічення рудної маси в блоці і підвищити безпеку ведення гірничих робіт. Верхні координати конуса регламентуються місцем пересікання ліній по висоті камери на всю її ширину за простяганням, а бокові поверхні відрізаної площиною контакту поклада з наступними породами лежачого боку конуса визначаються параметрами камери та кутом природного укосу обваленої рудної маси.

Запропонована технологічна схема утворення вказаного компенсаційного простору ілюструється схемами.

Компенсаційний простір в лежачому боці поклада утворюється наступним чином. Виїмковий блок відпрацьовується камерною системою розробки з поділенням його на камеру АБСД, стелину ВВ'С'С (рис. 2) та між камерний цілик KLMN (рис. 2, 3). Підготовка та нарізка блоку виконується шляхом проведення відкотного штреку 1, ортів-заїздів 2, піднятєвих 3, господарчого орта 4, доставочних штреків 5, рудозвальних 6, буропідсічного орта 7 та штреків 8, 9, бурового орта 10, вентиляційного-господарчого штреку 11. При цьому штрек 8 проходять по пустим породам лежачого боку на межі контуру майбутнього компенсаційного простору довжиною за простяганням, який дорівнює діаметру воронки випуску. Штрек 9 просувають косокуто воз'єднуючі ним штрек 8 з піднятєвими 12, які проходяться для утворення воронки 13 випуску руди з камери. Приймається одна воронка по центру камери у породах лежачого боку для випуску порід з майбутньої частини компенсації та в наступному рудної маси. Вона в подальшому переутворюється в компенсаційний простір у вигляді перевернутого зрізаного площиною по лінії падіння поклада конуса (рис. 2, 3). Твірні поверхні *СО* зрізаного конуса мають похилу під кутом більшим кута природного укосу і дорівнює куту утворення воронки випуску. Діаметр нижньої основи конуса регламентується відстанню між лінією падіння поклада та лінією *СО*. Для провітрювання та господарських робіт у лежачому боці проводиться вентиляційно-ходовий піднятєвий 14 (рис. 2, 4).

Безпосередньо компенсаційний простір виконується в такій послідовності. З дучки 15 проводиться відрізний піднятєвий 16 на висоту до пересікання з лінією падіння поклада. Останній відбійкою свердловин 17 (рис. 5) розширяється навхрест простягання у відрізню щілину *DOPR* у вигляді трапеції з нижньою основою відстанню підсікаємих порід лежачого боку, а верхньою основою – на ширину піднятєвого (рис. 2, 5). З підсічного штреку 8 вибураються, заряджаються та підриваються віяла свердловин 18 таким чином, щоб утворити сферичну поверхню у вигляді відрізка зрізаного конуса у межах підсікаємих порід (рис. 3, 4). На утворену компенсацію вибуреними з бурового орта 10 свердловинами 19 утворюється щілина *PCTR* у верхній частині камери (рис. 4). Для запобігання подальшого розубоження руди відбита порода селективно випускається скрізь воронки 13 та складається у раніше відпрацьовані простори попередніх блоків. Утворена у породах лежачого боку компенсація розширюється за рахунок підривання похилих шарів руди в камері. Для цього віялами свердловин 20, 21, які вибурені з виробки 7, та 10, у проекції на зрізаний конус (рис. 4) ведеться відбійка рудних шарів в камері. Після цього почергово зі сповільненням за стрілками (рис. 3) свердловинами 22 на компенсаційний простір розширюється на всю ширину камери. Його об'єм регламентується кількістю запасів при наступному масовому їх підриванні. При пошаровому відпрацьованні запасів камери вибурювання, заряджання та підривання похилих віялів свердловин виконується з виробок 7 та з коротким сповільненням 10. Випуск відбитої рудної маси ведеться через воронки 13, днища блока (рис. 2, 4). Обвалення стелини викону-

ється зі сповільнено-вільним підтриванням вибухових свердловин з відставанням руйнування міжкамерних ціликів масовим вибухом. Після цього виконується масовий донний випуск обваленої рудної маси та при забезпеченні кутів її текучості за рахунок твірних поверхонь створеного компенсаційного простору на лежачому боці похилого покладу.

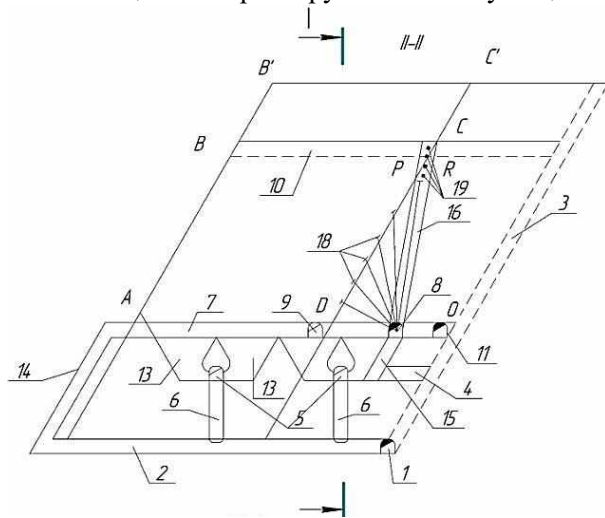


Рис. 2. Розріз покладу нахрест простягання по II-II з проектними контурами компенсаційного простору у породах лежачого боку зі схемою вибухових свердловин та виробками днища блоку

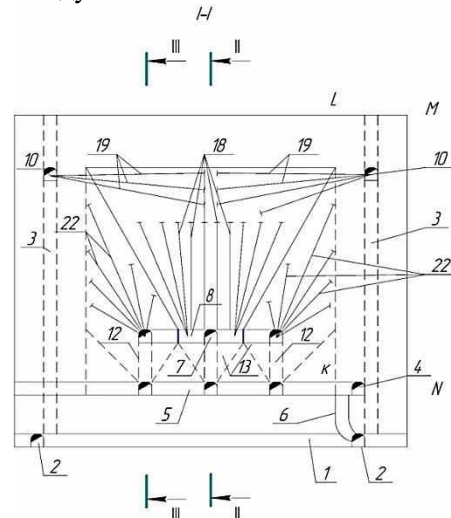


Рис. 3. Розріз за простяганням покладу по I-I з конструктивними елементами очисного блоку та схемою розбурення масиву для утворення компенсації

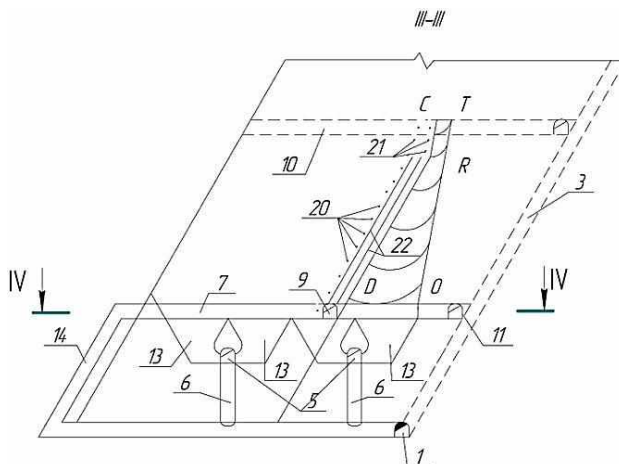


Рис. 4. Розріз нахрест простягання по III-III з виробками днища блоку, утвореним першочерговим компенсаційним простором у породах лежачого покладу та свердловинами для подальшого його розширення похилими шарами руди камерного запасу

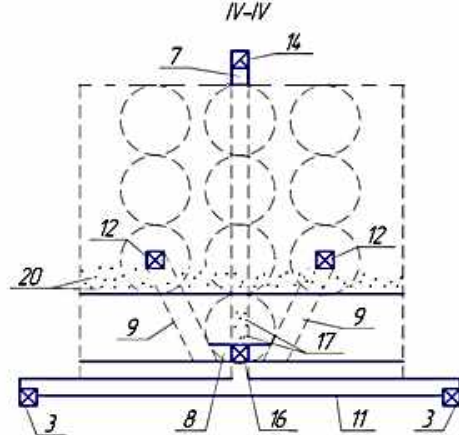


Рис. 5. Горизонтальна проекція IV-IV з виробками днища блоку та свердловинами для утворення компенсаційного простору

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Виконаний аналіз сучасного стану застосування систем розробки рудних покладів показав, що з поглибленням очисних робіт та більш активних проявів гірського тиску стає дуже проблематичним застосування камерних систем розробки особливо похилих покладів. Це при тому, що камерний запас виймається практично з балансовим вмістом корисного компонента. Крім цього, при відпрацюванні похилих покладів мають місце значні втрати рудної маси на лежачому боці покладу. Одним із заходів запобігання цим негативним явищам може бути створення умов стійкості оголень в камерах та забезпечення випуску рудної маси з мінімальними її втратами. Для цих цілей нами на основі виконаних досліджень розроблена інноваційна конструкція компенсаційного простору та технологічна схема його утворення на межі контакту рудного покладу з породами лежачого боку у вигляді зрізаного площиною по лінії падіння покладу конуса. Параметри компенсації пов'язані з розмірами блоку, кутом падіння покладу та можливістю виконання селективного випуску

порід для утворення компенсаційного простору першої черги, що дозволяє знизити втрати та засмічення корисних копалин на виїмковій ділянці та підвищити ефективність добування руд.

Технологічна схема утворення запропонованого компенсаційного простору може бути використана при розробці родовищ корисних копалин в інших гірничо-геологічних умовах. Реалізація даної моделі дозволяє підвищити ефективність відпрацювання запасів очисного блоку, значно зменшити втрати та засмічення рудної маси на лежачому боці і, в цілому, у виїмальній одиниці при її випуску. Також оптимізується час стояння конструктивних елементів системи розробки, підвищується інтенсивність випуску рудної маси та на 3...5% зменшується собівартість видобутку руди при її очисному виїманні. Встановлено, що для розглядаємих гірничо-геологічних умов об'єм компенсаційного простору запропонованої форми (з еліптичною поверхнею) становить від 0,4 до 0,78 від об'єму можливих втрат руди на лежачому боці.

В подальшому буде досліджено вплив застосування самохідної техніки на технологічні параметри конструктивних елементів системи розробки та їх взаємозв'язок з показниками вилучення рудної маси в очисному блоці.

### Список літератури

1. Теория и практика выпуск обрушенной руды/ Малахов Г.М., Безух В.Р., Петренко П.Д.// М: Недра, 1968г. -311с.
2. Технология отработки запасов потолочины при выемке крутонаклонных залежей./ Хивренко О. А., Кушнерёв И. П., Кривенко Ю.Ю.// Сб. Разработка рудных месторождений, вып.91, КТУ, 2007. -с.269-272.
3. Ступнік М. І. Спосіб розробки крутоспадних родовищ корисних копалин/ Ступнік М.І., Кушнерьов І.П., Кривенко Ю.Ю., Пирха О.Ю.// Патент України №52455, заяв. U201002664, опубл. 25.08.2010р, бюл. №16.
4. Ступнік М. І. Спосіб розробки похилих та крутоспадних родовищ корисних копалин камерними системами// Ступнік М. І., Кушнерьов І. П., Калініченко В., О.,Кривенко Ю.Ю., Грищенко М.А., Калініченко О.В.// Патент України №106516, заяв. U201511201, опубл. 25.04.2016р, бюл. №8.
5. Хивренко О.Я. Спосіб розробки похилих та крутоспадних родовищ корисних копалин// Хивренко О.Я., Кушнерьов І.П., Кривенко Ю.Ю., Прокопчук Я.К., Гаркуша А.Ф.// Патент України № 25318, заяв. U200701029, опубл. 10.08.2007р. бюл. №12.
6. Кушнерьов І. П. Спосіб підземної розробки похилих рудних покладів/ Кушнерьов І.П.,Хивренко О.Я., Кривенко Ю.Ю., Прокопчук К.Л.// Патент України №18734, заяв.u200605999, опубл.15.11.2006р, бюл.№11
7. Логачев Е.И., Кнюх В.В. Повышение эффективности отработки наклонных слоистоструктурных залежей в условиях ш. Октябрьская.Сб." Разработка рудных месторождений", Вып. 88, Кривой Рог, КТУ, с. 36-38.
8. Чернокур В.Р., Шкребо Г.С., Шелегеда В.И.. Добыча руд с подэтажным обрушением, М: Недра, 1992г – 272с.
9. Калініченко В.О., Колосов В.О., Ступнік М.І. Основи підземної розробки рудних родовищ. Навчальний посібник. КривийРіг, Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2015р., - с. 172-173.
10. Мартынов В. К. Проектирование и расчет систем разработки рудных месторождений, Киев, Вища школа, Головное изд-во,1987.-216 с.
11. КалініченкоВ. О., Ступнік М. І., Федько М. Б. Визначення параметрів підземної розробки рудних родовищ: підручник-Кривий Ріг:2019.-282с.
12. Кушнерьов І.П, Кривенко Ю.Ю. Інноваційна технологія відпрацювання потужних крутоспадних рудних покладів на глибоких горизонтах. Гірничий вісник №105, Кривий Ріг, 2019, с.52-58.

УДК 621.8:00494

О.В. БОНДАР, канд.тех.наук, доц., Д.Ю. КРАВЦОВА, канд.фіз.-мат.наук, ст. викл.,  
А.С. ЧУМАК, студ.

Криворізький національний університет

### ПОРІВНЯННЯ САПР КОМПАС-3D І POWERSHAPE ПО КРИТЕРІЯМ ФУНКЦІОНАЛЬНОСТІ ТА ЕКОНОМІЧНОСТІ

**Мета** даної статті полягає у визначення переваг і недоліків використання програмного забезпечення (ПЗ) КОМПАС-3D і PowerSHAPE для побудови корпусних деталей і визначення найбільш вигідного програмного забезпечення для поставлених цілей. У сучасному світі часто виникають питання з приводу актуальності використання того чи іншого програмного забезпечення для автоматизації процесів конструювання деталей та виробів. Тому тема та мета даної статті є досить важливою.

**Методи дослідження.** Дослідження проведено методами комп'ютерного моделювання у системах автоматизованого проєктування (САПР) КОМПАС-3D і PowerSHAPE та порівняння отриманих результатів. В статті надається

опис та порівняння наявного функціонала та особливостей програм, зокрема команд, які забезпечують створення деталей у даних програмних модулях. Аналізуючи в цьому контексті програмні забезпечення встановлено, що КОМПАС-3D – це система нижчого рівня, до якої висуваються мінімальні вимоги щодо компонентів, а PowerSHAPE – система середнього рівня з відповідними ознаками.

**Наукова новизна** полягає в аналізі використання конкретних програмних засобів для побудови корпусних деталей, що може полегшити вибір раціональної системи для конструкторського моделювання та проектування виробів.

**Практична значимість** роботи полягає в тому, що вона може бути використана керівниками підприємств для вибору оптимального програмного забезпечення з метою автоматизації процесів конструювання деталей.

**Результати** показали, що для невеликого підприємства з малим бюджетом, одиничним виробництвом і універсальним обладнанням раціональним буде використання ПЗ КОМПАС-3D, а для великого підприємства з широким спектром задач, середнесерійним і масовим виробництвом, для верстатів із числовим програмним керуванням, з необхідністю проведення інженерного аналізу та оптимізації конструкції – буде програма PowerSHAPE. Програмне забезпечення PowerSHAPE надає більш широкі можливості подальшої роботи з моделлю в різних пов'язаних програмних продуктах, аналізу моделі, розрахунків і т.д., ніж КОМПАС-3D. При цьому більш дорогим продуктом є PowerSHAPE, його вартість сягає \$7548,95. Вартість КОМПАС-3D становить \$2294,58.

**Ключові слова:** порівняння САПР, 3D-моделювання, корпусні деталі, КОМПАС-3D, AutoDesk PowerSHAPE, аналіз використання.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-136-142

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Успішна діяльність різних підприємств багато в чому залежить від їх здатності накопичувати і переробляти інформацію. Сьогодні без комп'ютерної автоматизації вже неможливо виробляти сучасну конкурентоспроможну техніку. САПР в машинобудуванні використовується для проведення конструкторських, технологічних робіт, робіт по технологічній підготовці виробництва [1, 7]. Будь-яке підприємство починається з проектування і подальшого запуску конструкторської і технологічної документації відповідно діючим на території України стандартам ЄСКД та ЄСТД [8]. Для досягнення успіху на ринку промислові підприємства працюють над скороченням терміну випуску продукції, зниженням її собівартості та підвищенням якості, з цією метою впроваджують сучасні комп'ютерні технології, які можуть автоматизувати, змінити саму технологію проектування та виготовлення виробів [12]. Таким чином, у сучасному світі часто виникають питання актуальності використання того чи іншого програмного забезпечення для автоматизації процесів конструювання деталей на підприємствах.

**Аналіз досліджень та публікацій.** У статті «Сучасні системи автоматизованого проектування в технології машинобудування» Ковалевська Е.С. і Рогоза Ю.В. проводять аналіз програмних продуктів, що використовуються при виготовленні деталей машин та надають опис використання ПЗ Delcam PowerSHAPE [2]. У статті «Автоматизація виготовлення виробів в машинобудуванні» Т.Н. Гальчук і М.В. Міскевич розглядають питання автоматизації роботи конструкторських і технологічних підрозділів машинобудівельних виробництв, можливість використання сучасних CAD/CAM систем. У публікації розглянуто використання ПЗ FeatureCAM і PowerSHAPE [3].

У зарубіжних джерелах також міститься інформація про використання систем автоматизованого проектування. До прикладу, в публікації 2017 року «Engineering applications using CAD-based application programming interface» створеної Anastasios Tzotzis, Cesar Garcia-Hernandez, Jose-Luis Huertas-Talon, Dimitrios Tzetzis, і Panagiotis Kyratsis [4].

Невирішені раніше частини загальної проблеми. Недоліком вже наявних методів є відсутність безпосереднього порівняння використання конкретних програм для побудови корпусних деталей, що могло б полегшити вибір оптимального програмного продукту представникам підприємств.

**Постановка задачі.** Зниження і оптимізація витрат на виготовлення виробів є визначальними факторами сучасного промислового виробництва. Успішна діяльність підприємства на світовому ринку залежить від проектно-технологічних і виробничих процесів [9-11]. Важливим є впровадження інтегрованих інформаційних технологій на всіх етап виготовлення виробу. Тому актуальною задачею даної статті є визначення переваг і недоліків використання ПЗ КОМПАС-3D і PowerSHAPE для побудови корпусних деталей і визначення найбільш вигідного ПЗ для поставлених цілей.

**Викладення матеріалу та результати.** В основі САМ-системи лежить автоматичне розпізнавання типових елементів із твердотільної поверхневої моделі і їх автоматична обробка із

застосуванням убудованої технологічної бази знань. Система КОМПАС-3D призначена для створення тривимірних асоціативних моделей окремих деталей (у тому числі, деталей, що формуються шляхом листового матеріалу шляхом його згинання) і складальних одиниць, що містять як оригінальні, так і стандартизовані конструктивні елементи. Delcam призначений для виробництва складних виробів [3]. Програми компанії Delcam охоплюють всі етапи виробничого циклу. Воно поєднує у собі функціональність з новітніми технологіями в області користувацького інтерфейсу. В результаті різке скорочення етапу проектування і підготовки виробництва [2]. PowerSHAPE - це програмні модулі CAD-системи для реалізації концепції "гібридного моделювання" (Hybrid Modelling), яка передбачає об'єднання у CAD-системі можливостей трьох типів 3D-моделювання, а саме – гібридного моделювання (твердотільного і поверхневого моделювання) і каркасного (триангулярного) моделювання виробів складних форм і поверхонь. Кінцевим призначенням PowerSHAPE застосування для автоматизованої підготовки керуючих програм (КП) виготовлення виробів на верстатах з ЧПУ за розробленими 3D-моделями виробів складних геометричних форм. Проектування таких складних деталей, як корпусу, завжди було непростим завданням. Система PowerSHAPE значно спрощує цей процес, оскільки ґрунтується на можливості поверхневого, твердотільного і каркасного моделювання [3].

Для виконання поставлених завдань було проведено побудову деталі корпусу редуктора в зазначених програмах (на рис. 1 та рис. 2 зображено побудовані моделі корпусу редуктора в системах КОМПАС-3D та PowerSHAPE).

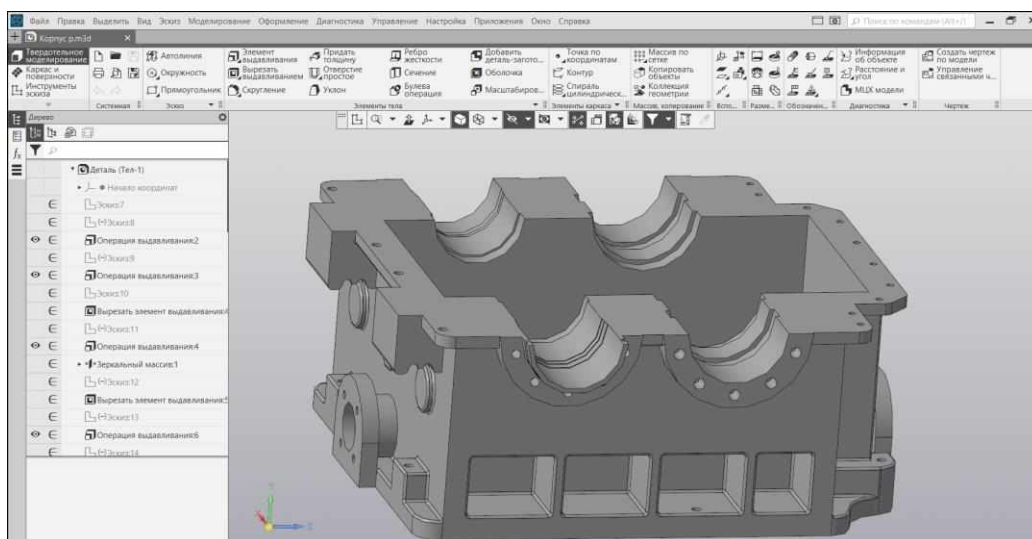


Рис. 1. 3D-модель корпусу редуктора побудована у середовищі САПР КОМПАС-3D

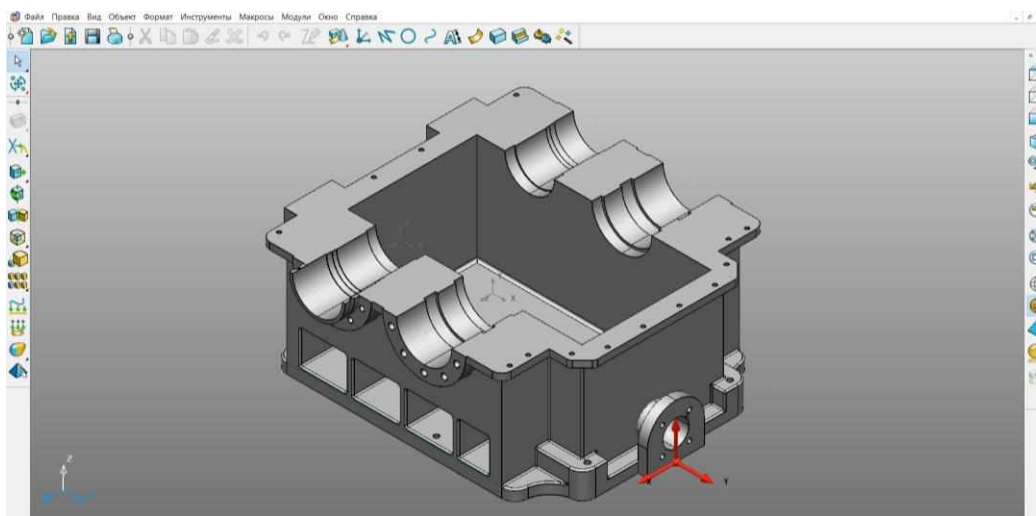


Рис. 2. 3D-модель корпусу редуктора побудована у середовищі САПР PowerSHAPE

В табл. 1 наведений перелік використаних операцій при побудові деталі корпус редуктора. Результати показали, що при роботі у програмі КОМПАС-3D знадобилося 29 операції для створення деталі, а програмі PowerSHAPE–22.

Таблиця 1

Операції, що використовуються при побудові деталі корпус редуктора

| КОМПАС-3D                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | PowerSHAPE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Видавлювання на 825 мм<br>Вирізання на 210 мм<br>Видавлювання на 25 мм<br>Вирізання через все<br>Видавлювання на 82,5 мм<br>Вирізання на 425 мм<br>Створення дзеркального масиву<br>Видавлювання на 100 мм<br>Вирізання на 140 мм<br>Створення дзеркального масиву<br>Вирізання на 1000 мм<br>Видавлювання на 40 мм<br>Видавлювання на 24 мм<br>Видавлювання на 50 мм<br>Видавлювання на 35 мм<br>Видавлювання на 110 мм<br>Вирізання на 24 мм<br>Створення дзеркального масиву<br>Вирізання на 16 мм<br>Видавлювання на 16 мм<br>Видавлювання на 24 мм<br>Вирізання на 100 мм<br>Створення дзеркального масиву<br>Видавлювання на 16 мм<br>Видавлювання на 60 мм<br>Вирізання на 600 мм в обидва напрямки<br>Створення дзеркального масиву<br>Вирізання на 46 мм<br>Створення дзеркального масиву | Витягування на 40 мм<br>Витягування на 60 мм<br>Витягування на 35 мм<br>Витягування на 75,77 мм<br>Симетричне відображення<br>Витягування на 410 мм<br>Вирізання на 20 мм<br>Вирізання на 140 мм<br>Витягування на 16 мм<br>Витягування на 25 мм<br>Віднімання<br>Витягування на 180 мм<br>Витягування на 55 мм<br>Віднімання<br>Обертання 1<br>Обертання 2<br>Віднімання<br>Віднімання<br>Вирізання на 10 мм<br>Вирізання наскрізне<br>Симетричне відображення<br>Обертання на 180 |

Розглянемо спільне і відмінне команд в ПЗ PowerSHAPE та КОМПАС-3D. Кожна програма має свої унікальні команди, проте деякі схожі за принципом дії і відрізняються лише назвами. Тому для прикладу у табл. 2 приведені назви аналогічних команд у даних системах.

На рис. 3 продемонстровано застосування команди Тіло витягування у PowerSHAPE. При виборі даної операції є можливість задати розміри та кути в обидва напрямки від активної локальної системи координат, а також розгорнути напрямки примітиву. В системі КОМПАС-3D аналогом даної операції є Видавлювання, функціонал якої набагато більше, ніж в PowerSHAPE. У діалоговому вікні, що відкривається при виборі даної операції є можливість обрати результат видавлювання: об'єднання, нове тіло, віднімання і перетин. Найявні такі способи видавлювання: на відстань, через усе, до об'єкта та до найближчої поверхні. При виборі першого способу наявна функція Симетрично, що при ввімкненні дозволяє розташувати довжину видавлювання симетрично відносно площини ескизу. Третій спосіб вимагає вказівки об'єкта, до якого потрібно здійснити видавлювання, вказати зміщення та чи потрібно відсікати об'єкт. Крім цього незалежно від способу видавлювання є можливість обрати кут, за потреби ввімкнути перемикачі Другий напрямок та Тонкостінний елемент. За бажанням також можна задати галузь застосування та властивості.

Таблиця 2

Назви аналогічних команд в системах PowerSHAPE та КОМПАС-3D

| PowerSHAPE                                   | КОМПАС-3D                                     |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Тіло витягування                             | Елемент видавлювання                          |
| Тіло обертання                               | Елемент обертання                             |
| Тіло по перетинам вздовж<br>напрямної кривої | Елемент по траєкторії<br>Елемент по перетинам |
| Створити виріз                               | Вирізати видавлюванням                        |

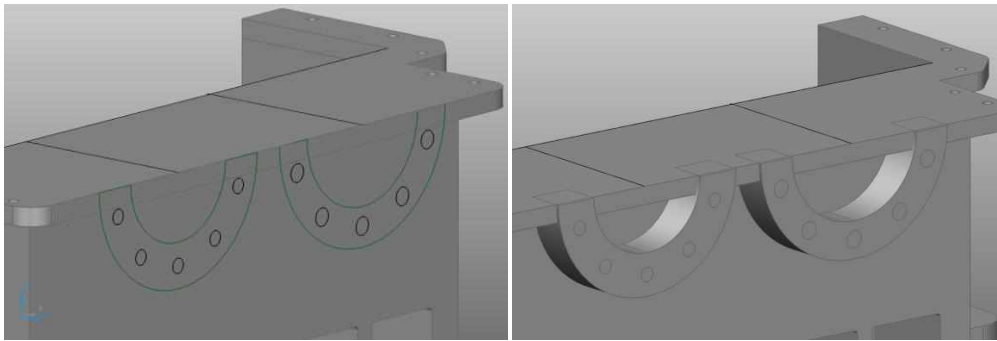


Рис. 3. Демонстрація операцій Витягування в PowerSHAPE

Існує досить багато відмінних рис між даними ПЗ. Характерною особливістю є те, що у системі КОМПАС-3D для побудови ескізу існує окремий режим. Щоб його активувати потрібно обрати площину для побудови (це може бути одна із площин системи координат, допоміжна площина або наявна у вже існуючій моделі). Особливостями КОМПАС-3D є наступні можливості: в режимі Ескіз можна використовувати допоміжні прямі та точки, спроектувати об'єкт; при роботі з моделлю є змога використання таких допоміжних об'єктів, як площини, осі, точки, а також можна додати компоновальну геометрію з іншого файлу. Корисною є можливість генерувати види із моделі у креслення із рамками за стандартом ЄСКД. Аналогом допоміжної геометрії у PowerSHAPE є прив'язки: горизонтальність, вертикальність, перетин, дотик, до центру, кінця, середини тощо. Зручною відмінністю PowerSHAPE є можливість використання декількох локальних систем координат (ЛСК). ЛСК (рис. 4) можна встановити в будь-якій точці простору або змодельованого тіла, зокрема, користуючись прив'язками. Це дуже допомагає при моделюванні тіл або поверхонь, розташованих на відстані та під кутом до наявної ЛСК.

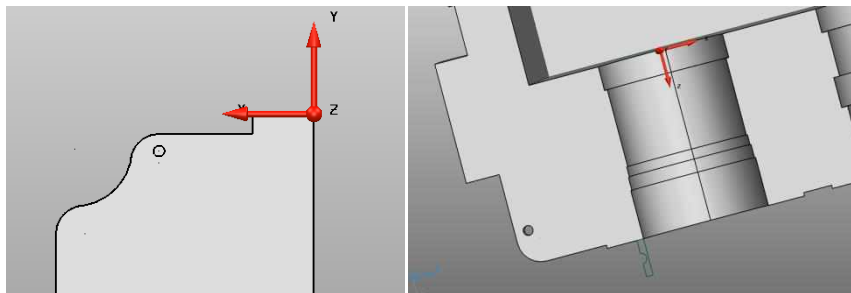


Рис. 4. Допоміжна геометрія – Локальні системи координат в системі PowerSHAPE

На рис. 5 демонструються операції Обертання та Віднімання в системі PowerSHAPE. Для першої було використано дві локальні системи координат. Перед її викликом необхідно обрати ЛСК та площину, відносно якої потрібно здійснити операцію. Після здійснення обертання, у діалоговому вікні можна ввести кут повороту та за потреби розвернути напрямок примітиву. Команди віднімання, додавання та перетин в ПЗ PowerSHAPE знаходяться в окремій вкладці під назвою Елемент. При виборі потрібної команди з даної вкладки ніяких додаткових даних не потрібно, діалогове вікно не з'являється. Команди передбачають взаємодію (віднімання, додавання, перетин) виділеного тіла й активного. В КОМПАС-3D проілюстровані на рис. 5 операції обертання та віднімання можна було б зробити в один крок. При виборі команди обертання є можливість зміни режиму отриманого тіла, як і при видавлюванні: об'єднання, нове тіло, віднімання та перетин. Також можливо здійснити різноманітні налаштування: обрати тип побудови (сфероїд, тороїд), спосіб (на кут або до об'єкту), за потреби ввімкнути перемикачі Симетрично, Другий напрямок та Тонкостінний елемент, а також задати область застосування та властивості.

Таким чином, на прикладі команд Витягування/Видавлювання, Обертання та Віднімання, здається що в ПЗ КОМПАС-3D функціонал дещо більший, ніж у його опонента. Проте система PowerSHAPE є більш простою та зрозумілою.

Також в КОМПАС-3D є використання стандартних виробів у кресленнях і моделях (наприклад, елементи кріплення, пружини, різні кришки та ін.), створення уніфікованих бібліотечних елементів для подальшого використання.

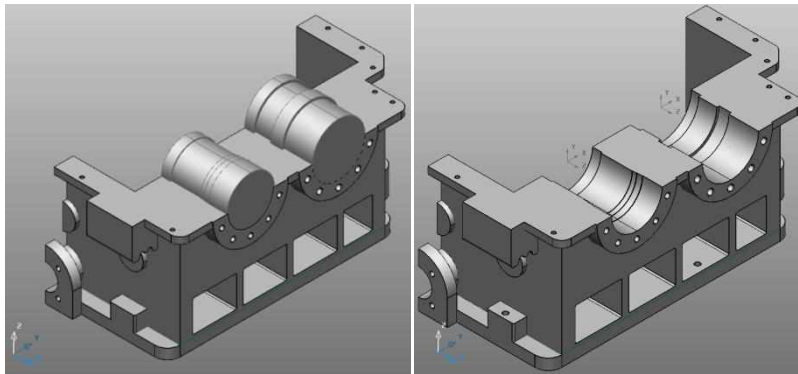


Рис. 5. Демонстрація операцій Обертання та Віднімання в PowerSHAPE

Програмне забезпечення PowerSHAPE надає більш широкі можливості подальшої роботи з моделлю в різних пов'язаних програмних продуктах, аналізу моделі, розрахунків і т.д., ніж КОМПАС-3D.

При цьому більш дорогим продуктом є PowerSHAPE, його вартість сягає \$7548,95 [5]. Вартість КОМПАС-3D становить \$2294,58 [6].

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** Впровадження інформаційних технологій у сферу виробництва технічного обслуговування і ремонту на основі програмного комплексу CAD / CAM систем є об'єктивною необхідністю і вимогою по досягненню стійких конкурентоспроможних переваг продукції на зовнішньому ринку. Тому саме застосування програмно-апаратних комп'ютерних засобів, які забезпечують нові інформаційні технології, сприяють широкому впровадженню системи автоматизованого моделювання та проектування на виробництві. ПЗ КОМПАС-3D і PowerSHAPE мають свої переваги.

Таким чином, для невеликого підприємства з малим бюджетом, одиничним виробництвом і універсальним обладнанням більш оптимальним буде використання ПЗ КОМПАС-3D, а для великого підприємства з широким спектром задач, середньосерійним і масовим виробництвом, для верстатів ЧПУ, CAD/CAE аналізу буде оптимальною програма PowerSHAPE.

Програми САПР широко використовуються в сучасному світі на виробництвах. Існує безліч різних програмних продуктів, які надають широкий спектр можливостей для побудови, редагування і аналізу моделей. Кожен з них має ряд переваг і недоліків, тому, визначення оптимального ПЗ є важливим моментом у роботі підприємства.

У подальших запланованих дослідженнях буде виявлено і проаналізовано причини та наслідки відмінності кількості операцій, які були виконані для створення однієї і тієї ж моделі у КОМПАС-3D і PowerSHAPE.

#### Список літератури

1. Девжеева Т.Г., Калінкін А.К. Актуальність застосування інформаційних технологій у машинобудуванні / Девжеева Т.Г., Калінкін А.К. Альметьевський державний нафтовий інститут, міжнародний науково-дослідний журнал.
2. Ковалевська Е.С., Рогоза Ю.В. Сучасні системи автоматизованого проектування в технології машинобудування / Ковалевська Е.С., Рогоза Ю.В. Науковий вісник ДГМА.
3. Т.Н. Гальчук, М.В. Міскевич. Автоматизація виготовлення виробів в машинобудуванні / Т.М. Гальчук, М.В. Міскевич. Луцький національний технічний університет.
4. Anastasios Tzotzis, Cesar Garcia-Hernandez, Jose-Luis Huertas-Talon, Dimitrios Tzetzis, i Panagiotis Kyratsis. Engineering applications using CAD-based application programming interface / Anastasios Tzotzis, Cesar Garcia-Hernandez, Jose-Luis Huertas-Talon, Dimitrios Tzetzis, i Panagiotis Kyratsis. MATEC Web of Conferences 94, (2017).
5. Soft Magazin [Електронний ресурс]: PowerShape2021. Режим доступу: <https://www.softmagazin.ru/autodesk/powershape-2021/>
6. Prof-it – ліцензійне програмне забезпечення [Електронний ресурс]: КОМПАС-3D v19, система тривимірного моделювання, ліцензія: Режим доступу: <https://www.softprof-it.ru/katalog/ascon/kompas-3d/kompas-3d-v15-sistema-trekhmernogo-modelirovaniya-litsenziya-detail>
7. Левін В.І. Информационные технологии в машиностроении / В.І. Левін. – М.: Видавничий центр «Академія», 2013. — 272.

8. **Козаков А.** ADEM – CAD/CAM-інтеграція високого рівня / А. Козаков, А. Красильников // САПР і графіка. – 2003 – №7 – С. 38-44.

9. **Норенков І.П.** Основы САПР [Електронний ресурс]: електронний підручник / І.П. Норенков, В.А. Трудоношин, М.Ю. Уваров, Е.В. Федорук. – Москва: МГТУ, 2010. – Режим доступу: <http://bigor.bmstu.ru/>.

10. **Квєтний Р.Н.** Комп'ютерне проектування систем і процесів [Електронний ресурс]: посібник / Р.Н. Квєтний, І.В. Богаць, О.Р. Бойко, О.Ю. Софіна, О.М. Шушура. – Режим доступу: [posibnyky.vntu.edu.ua/k\\_m/t1/173.htm](http://posibnyky.vntu.edu.ua/k_m/t1/173.htm).

11. **Ступницький В.В.** Ефективність впровадження CALS-технологій на машинобудівних підприємствах України / В.В. Ступницький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» «Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні». – 2009. – №642. – С. 80-84.

12. **Криськов О.Д.** САПР операцій механічної обробки. Математичне моделювання технологічних процесів / Криськов О.Д. – Кіровоград: КНТУ, 2004. – 75с

УДК 004.852

В. О. МІТРОШИН, студ., Н. Н. ШАПОВАЛОВА, І. О. ДОЦЕНКО, ст. викладачі,  
Н. Х. САЙГАРЕЄВ, доц.

Криворізький національний університет

## МОДЕЛЬ ПЕРСОНАЛІЗАЦІЇ РЕКОМЕНДАЦІЙ КОНТЕНТУ НА ОСНОВІ КОЛАБОРАТИВНОЇ ФІЛЬТРАЦІЇ

**Мета роботи** – розробити і теоретично обґрунтувати ефективність застосування персоналізованої рекомендаційної системи товарів, послуг або контенту на основі технології машинного навчання, яка поєднує в собі такі підходи до персоналізації рекомендацій, як колаборативна фільтрація та фільтрація контенту. Розробити механізм визначення доцільності використання певної метрики виявлення подібності користувачів і реалізувати його у режимі «реального часу» на розроблювальній системі. Створити безпечний сервіс з персоналізованою системою рекомендацій товарів, послуг або контенту, забезпечивши захист особистих даних користувачів.

**Методи дослідження.** У роботі використано наступні методи дослідження: аналіз джерел з досліджуваної теми, метричні методи визначення приналежності об'єктів до певної групи за їх схожістю, методи теорії штучного інтелекту, моделювання процесу навчання алгоритмів класифікації, формалізація побудованих моделей, методи проектування програмного забезпечення для розробки програмної моделі, емпіричні методи обґрунтування оптимальних параметрів навчання моделі, методи об'єктно-орієнтованого проектування та програмування.

**Наукова новизна** полягає в тому, що розроблена модель рекомендаційної системи дозволяє на початковому етапі роботи системи оцінити вподобання користувача, майже не володіючи інформацією про його прихильності. В роботі запропоновано механізм підбору певної метрики для визначення групи приналежності користувача, що в цілому має забезпечити точність наданої рекомендації.

**Практична значимість** виконаної роботи полягає в тому, що розроблено веб-сервіс, який надає персоналізовані рекомендації товарів, послуг або контенту щодо уподобань користувача, з забезпеченням вимог захисту персональної інформації, високої точності виконаних рекомендацій. Модуль рекомендаційної системи оформлено у вигляді прикладного програмного інтерфейсу, що дозволяє його застосування на будь-якій веб-платформі.

**Результати.** Запропоновано особистісно-орієнтований підхід до рекомендацій товарів, послуг або контенту, розроблено універсальну рекомендаційну систему, яка поєднує в собі і колаборативну, і фільтрацію контенту, а також розроблено веб-сервіс, з урахуванням вимог безпеки персональних даних користувачів.

**Ключові слова:** Рекомендаційна система, машинне навчання, метричний метод, метрика, колаборативна фільтрація, фільтрація контенту.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-142-146

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами.** В даний час кожна сучасна людина щодня стикається з різноманітними веб-сайтами та соціальними мережами. Будь-які онлайн-сервіси, зокрема постачальники фільмів і серіалів, товарів та послуг, надаючи свій контент, прагнуть максимально догодити користувачам. Такі ресурси автоматично редагують свої зміст і наповнення, налаштовуючись до вподобань кожного конкретного користувача. Одним з рішень задач персоналізації контенту є рекомендаційні системи. Рекомендаційні системи – це програмні модулі, які аналізують інтереси користувачів і намагаються передбачити, який саме набір фільмів або товарів і послуг буде найцікавішим конкретному користувачеві в даний момент часу, тим самим підвищуючи рівень його лояльності.

Вдалі рекомендації збільшують рівень задоволення користувачів, що в свою чергу підвищує їх лояльність, що в кінцевому рахунку призводить до зростання прибутку. Таким чином, одним з найбільш частих запитів на розробку заснованих на машинному навчанні маркетингових рішень, є розробка рекомендаційних моделей. Яскравою ілюстрацією актуальності розробки рекомендаційних систем є історія компанії Netflix і її конкурс Netflix Prize [1]. У 2006 році компанія Netflix володіла унікальним алгоритмом Cinematch [2]. Він дозволяв рекомендувати клієнтам фільми не за загальним середнім рейтингом, а робити це індивідуально. Але в Netflix хотіли піти ще далі.

Конкурс Netflix Prize було розпочато в 2006 році і тривав він протягом майже трьох років. Його суть полягала в підвищенні якості існуючого алгоритму на 10%. Учасниками могли бути всі бажаючі розробники з усього світу, а призовий фонд становив 1000000 \$. До тих же пір, поки не був завойований головний приз, щорічно кращій команді присуджувався приз за прогрес в розмірі 50000 \$. Остаточну перемогу в 2009 році здобула команда BellKor's Pragmatic Chaos, розділивши перше місце з командою The Ensemble, але випередивши її у відправці рішення по часу. Випередження склало всього 20 хвилин [3].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Для створення рекомендаційних систем існують дві основні стратегії: фільтрація контенту і колаборативна фільтрація. У разі фільтрації контенту створюються профілі користувачів і об'єктів. Профілі користувачів і об'єктів представляють собою суху характеристику користувачів і товарів. Даний підхід є найпростішим, але він формує тільки неперсоналізовані рекомендації [4].

У разі ж колаборативної фільтрації, використовується інформація про минулу поведінку користувачів. Наприклад, інформація про вподобання чи оцінки будь-якого товару, фільму тощо. У такому випадку не має значення, з якими типами об'єктів ведеться робота, але при цьому до уваги беруться неявні характеристики, які складно враховувати в момент створення профілю. Колаборативна фільтрація є одним з найефективніших засобів створення рекомендацій, що складається з трьох етапів: збір інформації про користувачів, побудова матриці для розрахунку асоціацій і формування імовірної рекомендації [5]. Саме на неї і впав остаточний вибір для вирішення поставленого завдання, а для її реалізації був використаний один з методів машинного навчання – метод  $k$ -найближчих сусідів.

**Постановка завдання.** Проектування веб-сервісу з рекомендаційною системою складається з реалізації наступних завдань: розробка веб-сайту й наповнення його контентом; розробка модуля рекомендаційної системи, яка в свою чергу включає етап автоматизованого аналізу даних, підбору оптимального типу метрики для реалізації методу визначення групи вподобань певного користувача, безпосередньо реалізація алгоритму машинного навчання для визначення прогнозованої рейтингової оцінки фільму, захист персональних даних користувачів; підбір контенту з урахуванням прогнозованого рейтингу.

**Викладення матеріалу та результати.** Метод  $k$ -найближчих сусідів ( $k$  Nearest Neighbor,  $k$ -NN) є метричним методом, тобто для прогнозування цільового значення об'єкта використовується поняття метрики – відстані від об'єкта до найближчих його сусідів по їх ознаковому опису. Ідея методу полягає в пошуку таких найближчих об'єктів. Після їх виявлення новий об'єкт буде віднесений до того ж класу, що і його сусіди. У разі реалізації завдання регресії, значення прогнозованої величини розраховується як середнє значення сусідів. Зважений метод  $k$  сусідів дає більш точні оцінки. В якості параметрів (ваг) такого методу можна використовувати функцію від відстані до об'єктів або функцію від номера найближчих сусідів.

Виникає питання як визначити ступінь близькості між об'єктами. Сусідство об'єктів визначається за допомогою метрики – функції, яка задає відстань в метричному просторі. Таких функцій існує безліч, найбільш відомими з них є Евклідова метрика, метрика Мінковського і манхеттенська відстань. На площині і в просторах невеликої розмірності доцільно використовувати Евклідову метрику. Однак, із зростанням розмірності простору ознак опису об'єктів, визначити відстань стає все складніше, тому що простори з високою розмірністю схильні до так званого «прокляття розмірності». Цей термін характеризує сукупність труднощів, що виникають при обробці інформації в просторах багатьох вимірів. А саме з такими даними, як правило, доводиться працювати в реальних умовах. Якщо виходити з поставленого завдання, то опис кожного користувача становить кількість вимірів, рівну кількості представлених на платформі фільмів. Не важко здогадатися, що це дуже велике число вимірювань, причому, матриця характери-

стик в достатній мірі розріджена. Таким чином, необхідно визначити яку метрику доцільно використовувати для вирішення поставленого завдання.

Оскільки нас цікавить не стільки відстань або ступінь віддаленості об'єктів один від одного, скільки міра їх схожості, близькості по ознаковому опису, будемо використовувати показник, що описує силу статистичного зв'язку – коефіцієнт кореляції Пірсона (1). Очевидно, що якщо зв'язок між випадковими користувачами значний, то можна прогнозувати значення рейтингових оцінок фільмів для того користувача, який ці фільми ще не дивився

$$w_{i,j} = \frac{\sum_a (r_{i,a} - \bar{r}_i)(r_{j,a} - \bar{r}_j)}{\sqrt{\sum_a (r_{i,a} - \bar{r}_i)^2} \sqrt{\sum_a (r_{j,a} - \bar{r}_j)^2}}, \quad (1)$$

де  $i$  – індекс користувача, для якого розраховується рейтингова оцінка;  $j$  – індекс користувача, по оцінках якого розраховується рейтингова оцінка;  $a$  – індекс фільму;  $r_{i,a}$  – оцінка  $i$ -го користувача за  $a$ -ий фільм;  $\bar{r}_i = \frac{1}{N_i} \sum_a r_{i,a}$  – середні оцінки  $i$ -го користувача;  $N$  – кількість фільмів, що

продивився  $i$ -ий користувач.

Для реалізації колаборативної фільтрації використовуються два різних підходи: Item-Based і User-Based. Item-Based заснований на пошуку схожих об'єктів – в нашому випадку фільмів (в датасеті вони розташовані у колонках) [6]. На противагу цьому User-Based заснований на пошуку схожих користувачів, тобто по рядках. Підсумкове підсумовування ведеться лише за тими фільмами, які дивилися обидва користувачі.

Узагальнюючи вищесказане, можемо визначити послідовність процесу формування рейтингу фільму і прийняття рішення про рекомендацію його користувачеві: перетворити дані в векторну модель User-Based, отримуючи тим самим вподобання всіх зареєстрованих користувачів у вигляді дійсних значень оцінок; розрахувати коефіцієнти кореляції з кожним користувачем; сортувати користувачів по спадаючій мірі близькості; використовуючи метод  $k$ -NN, знаходимо рейтингову оцінку для кожного користувача по заданому фільму за формулою (2). Тут сума у чисельнику і знаменнику підраховується лише по кількості обраних сусідів

$$\hat{r}_{i,a} = \bar{r}_i + \frac{\sum_{j \in kNN(i)} (r_{j,a} - \bar{r}_j) w_{i,j}}{\sum_{j \in kNN(i)} |w_{i,j}|}. \quad (2)$$

Навчання методу полягає в налаштуванні параметра  $k$  – кількості сусідів, за якими буде будуватися прогноз [8]. Помилка отриманої моделі оцінюється метрикою RMSE [7] – корінь з суми квадратів різниць між прогнозованою і істинною оцінкою (3)

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^N (\hat{r}_{i,a} - r_{i,a})^2}. \quad (3)$$

Щоб уникнути явища перенавчання [8], коли модель буде підлаштовуватися під дані, що знаходяться в навчанні, і робити невірні прогнози для об'єктів, яких в навчанні не було, використовується стратегія крос-валідації. Вибірка об'єктів ділиться на навчальну і тестову в пропорції 3:1 (75% і 25% вибірки відповідно). У свою чергу, на навчальній вибірці проводиться процедура крос-валідації [9]. Ця процедура складається з наступних етапів: навчальна вибірка ділиться на  $n$  рівних частин ( $n$  фолдів), і кожна з частин в процесі  $n$  ітерацій буває тестовою, інші ж – формують навчальну вибірку. На кожній з  $n$  ітерацій оцінюється якість моделі, а потім усереднюється. Отримуємо середнє значення якості моделі на  $n$  підвибірках. Контрольне ж визначення якості виконується на відкладених 25% вихідної вибірки. Таким чином підбирається параметр методу  $k$  – кількість сусідів. В ході навчання було підібрано  $k = 11$  на вибірці з 1000 об'єктів (рис. 1). При цьому якість моделі складає 92%.

Основною технологією для реалізації системи було використаний мову програмування Python і одна з найпопулярніших бібліотек машинного навчання Scikit-learn [10].

Отримавши модуль рекомендацій і реалізувавши його для розроблюваного веб-сервісу, стикаємося з однією важливою проблемою – так званою проблемою холодного старту.

Холодний старт – це стандартна ситуація, яка виникає, коли ще не накопичено достатню кількість даних для коректної роботи рекомендаційної системи. Це може відбуватися при появі нових фільмів або фільмів, які мало переглядаються, а також при реєстрації нового користувача. Для вирішення цієї проблеми буде використаний підхід Item-Based. Ідея полягає в тому, що

при реєстрації на веб-сервісі, перші рекомендації будуть ґрунтуватися не на перевагах користувача, а на першому вподобаному фільмі, який він переглянув або за результатами невеликого опитування про улюблені фільми, який буде запропонований користувачеві. Таким чином, рекомендація буде формуватися на основі загальної інформації по характеристикам фільму: режисер, акторський склад, жанр, рік виробництва тощо. В якості джерела подібної інформації була обрана найбільша в світі база даних про кінематограф IMDb.

**Рис. 1** Помилка моделі в залежності від кількості сусідів  $k$ -NN

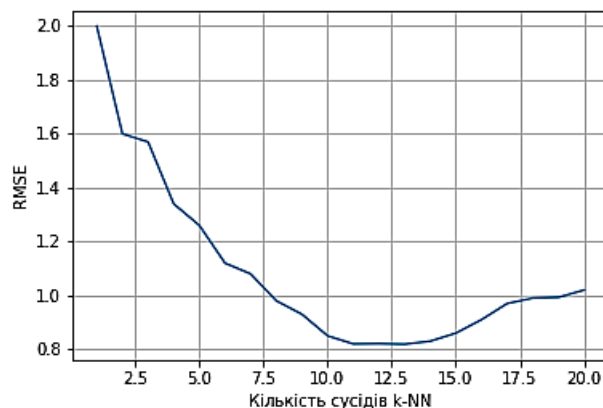
IMDb функціонує на основі вільного програмного забезпечення [11]. Деякий час назад даний веб-сайт вивантажив набори своїх датасетів у вільний доступ на платформу Kaggle [12], ці дані були використані в роботі.

Рішення проблеми холодного старту також реалізовано метричним методом, проте в якості метрики використовується Евклідова відстань. Оскільки розмірність простору ознак не настільки велика, як в даних, які використовуються в основному модулі, це дозволяє застосувати інтуїтивно зрозумілий підхід, який легко інтерпретується. Метод зваженого  $k$ -NN також пройшов навчання, отримано оптимальну кількість сусідів, рівне п'яти, параметри моделі обчислювалися як функція від номера найближчого сусіда. Валідація моделі проводилася на п'яти фолдах і показала якість на тестовому наборі 86,6%. Треба зазначити, що авторами не ставилася мета домогтися максимальної якості моделі, оскільки перші рекомендації новому користувачеві не повинні складатися виключно з фільмів його «улюбленого» режисера з участю «улюбленого» актора: автори залишили за собою право привнести в рекомендацію елемент «спонтанного» вибору, дотримуючись основних ознак вподобань конкретного користувача.

Таким чином для вирішення проблеми холодного старту був розроблений додатковий модуль, який формує рекомендації за допомогою фільтрації контенту. Надалі, коли буде отримана значна власна база даних, буде проведений перехід на основний модуль, який формує рекомендації з допомогою колаборативної фільтрації.

В розробці приділено чималу увагу безпеці збереження користувацьких даних. Будемо виконувати шифрування даних на стороні клієнта, тобто у базу даних вони надходитимуть вже у зашифрованому вигляді [13]. Таким чином не потрібно окремо піклуватися про захист каналу передачі даних: якщо зломисник перехопить пакет, то отримає повністю зашифровані дані. Недолік цього методу полягає у зниженні швидкодії обробки запиту, але, оскільки обсяг передачі не значний (лише логін і пароль), то на продуктивність веб-сервісу такий підхід не вплине. Реалізація шифрування на стороні застосунку використовує готове рішення на сервері CryptDB MySQL. Ідея полягає у використанні детермінованих шифрів (клас шифрів DET), тобто таких шифрів, які при однаковому ключі той самий текст шифрують однаково [14]. При використанні DET не виключена вразливість перед деякими видами відомих атак, тому пропонується використовувати асиметричне шифрування. Асиметричне шифрування, звісно програє по швидкодії симетричному, але при невеликих обсягах даних, можемо знехтувати цим фактом на користь більшої безпеки.

**Висновки та напрямки подальших досліджень.** У процесі дослідження проблеми розробки веб-сервісу з рекомендаційною системою було проаналізовано форми і підходи до реалізації фільтрації контенту, обґрунтовано вибір метрик у методах машинного навчання, що дають змогу віднайти близьких за вподобаннями користувачів і схожі за певними ознаками фільми. В результаті навчання моделей підібрано оптимальні значення гіперпараметрів методу  $k$ -NN: кількість сусідів та функцію ваг, які дають змогу робити рекомендації для певного користувача з достовірністю у 92%. Цей рівень якості моделі цілком задовольняє рівень достовірності того факту, що запропонований контент користувачеві сподобається. В роботі враховано умови безпечного збереження даних і конфіденційності користувачів сервісу. В подальшому планується



вдосконалити захист даних, розширити базу контенту сервісу і провести дослідження щодо налаштування рекомендацій нейромереживими методами.

### Список літератури

1. The Netflix Prize Rules [Електронний ресурс] / – 2006. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.netflixprize.com/assets/rules.pdf>.
2. Stephanie Crawford. How Netflix Works [Електронний ресурс] / Stephanie Crawford, Tracy V. Wilson. – 2010. – Режим доступу до ресурсу: <https://electronics.howstuffworks.com/netflix2.htm>.
3. Michael Jahrer. The BigChaos Solution to the Netflix Prize 2008 [Електронний ресурс] / Michael Jahrer, Andreas T'oscher. – 2008. – Режим доступу до ресурсу: [https://www.netflixprize.com/assets/ProgressPrize2008\\_BigChaos.pdf](https://www.netflixprize.com/assets/ProgressPrize2008_BigChaos.pdf).
4. Bharat Bhasker. Recommender Systems in e-Commerce / Bharat Bhasker, K Srikumar. // EC '99: Proceedings of the 1st ACM conference on Electronic commerce. – 2010. – С. 158–166.
5. Fleder D., Hosanagar K. Blockbuster Culture's Next Rise or Fall: The Impact of Recommender Systems on Sales Diversity (журнал) // Management Science, Vol. 55, No. 5, May 2009, pp. 697-712. — 2009. — P. 1 - 49.
6. Muffaddal Qutbuddin Comprehensive Guide on Item Based Collaborative Filtering [Електронний ресурс] / Muffaddal. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://towardsdatascience.com/comprehensive-guide-on-item-based-recommendation-systems-d67e40e2b75d>.
7. Гудфеллоу Я., Бенджо И., Курвилль А. Глубокое обучение / пер. с англ. А. А. Слинкина. – 2-е изд., испр. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 652 с.: цв. ил.
8. Сегаран Т. Программируем коллективный разум. – Пер. с англ. – СПб.: Символ-Плюс. 2008. – 368 с.
9. Введение в кросс-валидацию k-fold [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://codecamp.ru/blog/cross-validation-k-fold/>.
10. Introduction to scikit-learn [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://neurohive.io/ru/osnovy-data-science/vvedenie-v-scikit-learn/>
11. Сайт компанії IMDb – Режим доступу до ресурсу: <https://www.imdb.com/>
12. Kaggle [Електронний ресурс] / Режим доступу до ресурсу: <https://www.kaggle.com/ashirwadsangwan/imdb-dataset>
13. Luc Bouganim, Yanli Guo. Database Encryption // Encyclopedia of Cryptography and Security / Ed. by Henk C. A. van Tilborg and Sushil Jajodia. — Springer, 2011. — P. 307—312.
14. Rakesh Agrawal, Jerry Kiernan, Ramakrishnan Srikant, Yirong Xu. Order preserving encryption for numeric data (англ.) // Proceedings of the 2004 ACM SIGMOD international conference on Management of data - SIGMOD '04. — Paris, France: ACM Press, 2004. — P. 563

УДК 52-1:524.382

Ю. Д. ТКАЧЕНКО, студ., Д. В. ШВЕЦЬ, Н.О. КАРАБУТ, старші викладачі  
Криворізький національний університет

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ ТА СПОСТЕРЕЖЕННЯ ПОДВІЙНИХ ЗІРОК

**Мета.** Метою дослідження є розгляд та класифікація існуючих методів реєстрації та спостереження подвійних зірок.

**Методи дослідження.** Проведено системний аналіз існуючих способів виявлення подвійних систем, проаналізовано наявні на сьогодні підходи та розглянуто їх особливості.

**Наукова новизна.** Розглянуто типи подвійних зірок, які можна класифікувати як візуальні, що виглядають як два окремих компоненти, відносно положення яких змінюється через рух вздовж своїх орбіт, астрометричні, в яких візуально помітна тільки одна компонента зі змінним рухом, який спричиняється гравітаційним впливом другої компоненти, спектроскопічні, спектри яких виявляють регулярні зміни та фотометричні, періодичні коливання повної яскравості яких викликані рухом компонентів подвійної системи.

**Практичне значення.** Фізичні подвійні зірки представляють для астрономії як науки в цілому фундаментальний інтерес, який здебільшого визначається тим, що саме вивчення подвійних зірок дозволило однозначно встановити єдність закону всесвітнього тяжіння Ньютона у Всесвіті і отримати, спираючись на спостереження, фундаментальні знання про маси зірок, їх світності і еволюції.

**Результати.** Використовуючи існуючі на сьогодні методи виявлення подвійних зірок можливо з'ясувати велику кількість їх параметрів незалежно від типу подвійних систем. Відповідно до методу спостереження і виявлення тієї або іншої системи зірок, можна скористатись різними варіантами знаходження параметрів світил. Зміна блиску тіла системи зазвичай викликана зміною взаємного положення тіл, внаслідок їх руху по орбітах, а також обертанням тіла навколо власної осі. В останньому випадку крива блиску дозволяє встановити період обертання тіла на час спостереження. У змінних зірок зміна блиску може бути пов'язана з рухом навколо неї менш яскравої зірки-компаньйона, а також може свідчити про наявність планет коло неї. Зміни зсувів або роздвоєнь спектральних ліній спектрально-

подвійних зірок дозволяють визначити променеву швидкість, яка є проекцією орбітальної швидкості на промінь зору. Криві променевих швидкостей одного або обох компонентів дають можливість обчислити елементи істинної орбіти.

**Ключові слова:** астрономія, подвійні зірки, астрофізика, спектральний аналіз.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-146-150

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Подвійні зірки (системи зірок) – це пари зірок, що мають спільний центр мас та пов'язані між собою силами гравітації. Вони мають ті чи інші особливості, за допомогою яких вивчення зірок в цілому, як окремого явища, стає більш продуктивним.

Серед подвійних зірок традиційно виділяють фізичні і оптичні пари. Перші являють собою системи близько розташованих в просторі зірок, що обертаються навколо спільного центру тяжіння за законами Кеплера. Оптичні пари, в свою чергу, складаються з фізично віддалених в просторі об'єктів, що випадковим чином проектується на небосхил в прилеглих областях з точки зору спостерігача. На сьогодні оптичні пари не являють інтересу для науки, на противагу фізичним парам [1].

**Аналіз досліджень та публікацій.** Подвійні оптичні системи зірок були виявлені ще в середині XVII століття Галілео Галілеєм. Далі вивченням цього явища займалися такі вчені, як астрофізик Вільям Гершель, який склав каталог з понад 700 подвійних зірок, а потім до досліджень долучився його син, Джон Гершель, який проводив спостереження в Південній Африці [2]. В Європі дослідженнями подвійних зірок займалися Василь Струве і його син Отто Струве, які загалом відкрили більш ніж 3000 систем зірок [3]. Всі ці зірки відносяться до класу візуально-подвійних. Для своїх спостережень вони використали телескопи-рефрактори, що дозволило їм покращити результати Гершелів. Зі збільшенням об'єктивів телескопів та вдосконалення технічної бази збільшувалась і кількість нових відкритих подвійних систем. Так, на початку XX сторіччя було відомо вже понад 13000 подвійних зірок, а в 1961 було видано каталог з понад 64000 подвійних зірок [1]. На сьогодні це питання досліджується досить активно [4-9].

**Постановка завдання.** Метою досліджень є аналіз існуючих методів виявлення та спостереження подвійних зірок.

**Викладення матеріалу та результатів.** Подвійні системи можуть класифікуватися за методом їх відкриття як візуальні, астрометричні, спектроскопічні та фотометричні подвійні зірки [1].

*Фізичні візуально-подвійні зірки* помітні як два окремих компоненти, відносно положення яких змінюється, так як вони рухаються по своїм орбітам. Це, здебільшого, зірки з достатньо великим періодом обертання, що зумовлюється великою відстанню між компонентами. Через великий період простежити орбіту подвійної зірки можна тільки завдяки великій кількості спостережень протягом десятків років [3]. Першою орбітою подвійної зірки, яка була визначена в 1830 році, була орбіта  $\xi$  Великої Ведмедиці (рис. 1) [10].

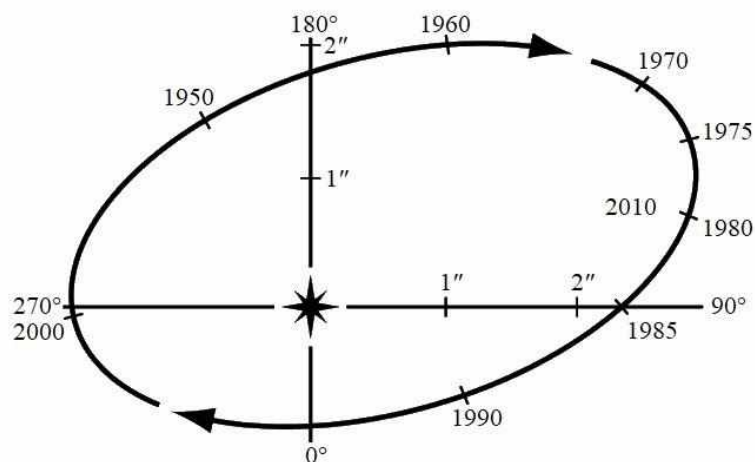


Рис. 1. Орбіта  $\xi$  Великої Ведмедиці

Спостереження візуальних подвійних зірок дозволяють отримати лише проекцію орбітального еліпса на площину неба. При цьому форма та орієнтація справжньої орбіти залишаються невідомими. Однак з урахуванням того, що первинний компонент має бути розташований в фокальній точці відносної орбіти, вони можуть бути розраховані. Абсолютний розмір орбіти може бути визначений лише у випадку, коли відома відстань до подвійної зірки. Використовуючи третій закон Кеплера, можна розрахувати повну масу цієї системи, а власні маси компонент системи можна визначити, спостерігаючи їх рух щодо центру мас.

*Астрометричні подвійні зірки* – це системи зірок, в яких візуально помітна лише одна компонента, але її рух на небосхилі змінний, що вказує на наявність другого компоненту, що гравітаційно впливає на неї. Натомість, у випадку з візуально-подвійними зірками можна спостерігати рух на небосхилі одночасно двох об'єктів. Якщо з тих чи інших причин не можна спостерігати один з компонентів, то подвійну систему все одно можна визначити через зміну положень на небосхилі іншого компоненту. Це дозволяє говорити про астрометричну подвійну зірку [3].

У астрометричних подвійних зірок може спостерігатися тільки більш яскравий компонент, що обертається навколо центру мас. Якщо оцінена маса видимої компоненти, наприклад із світності, то маса невидимого компонента також може бути оцінена.

Першою астрометричною подвійною зіркою, у якій спостерігався хвилеподібний власний рух (рис. 2), був Сіріус. З цього зробили висновок, що у нього є малий компаньйон, який був візуально відкритий кілька десятиліть потому. Він отримав назву Сіріус В, та виявився абсолютно новим на той час типом об'єктів – білим карликом.

Власний рух близьких зірок корисно вивчати в пошуках планетних систем. Перші надійно виявлені планети були відкриті радіоастрономами в 1991 році в околиці нейтронної зірки-радіопульсара PSR 1257+12 по періодичному доплеровському зміщенню частоти його імпульсів. Ця система складається, як мінімум, з трьох планет з масами порядку маси Землі. Присутність планет поруч зі звичайними зірками вперше було виявлено в 1995 році методом оптичної спектроскопії.

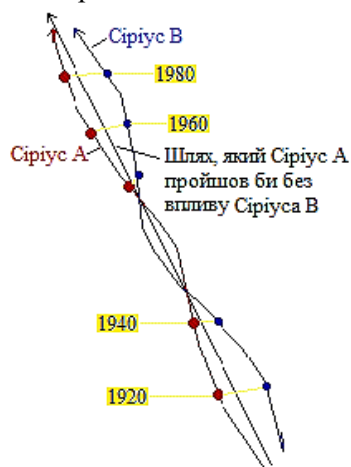


Рис. 2. Хвилеподібний рух Сіріуса

*Спектроскопічні подвійні зірки* виглядають як одиночні навіть при спостереженнях дуже потужними телескопами, але їх спектри виявляють регулярні зміни.

Доплерівське зміщення спектральної лінії прямо пропорційно радіальній швидкості. Тому поділ спектральних ліній найбільший, коли один компонент наближається, а інший віддаляється від спостерігача. Період зміни спектра і є орбітальним періодом зірок.

Роздвоєння і зміщення ліній у спектрах спектрально-подвійних зірок зображено на рис. 3. Періодична зміна швидкості відносно променя зору призводить до періодичної зміни зсувів відповідних ліній. Розщеплення спектральних ліній спостерігається в подвійних системах, де обидва компонента є яскравими зірками. Коли ж один з компонентів слабкіше в порівнянні з іншим,

то на спектрах будуть видні лінії тільки однієї, більш яскравої зірки. Їх зміщення також буде змінюватися періодично. Під час затемнення більш яскравої зірки другою компонентою можна побачити лінії менш яскравої зірки. Проводячи систематичні спостереження таких зсувів, можна встановити залежність зміщень від часу і обчислити такі основні характеристики, як маси компонент подвійної системи, відстань між ними, ексцентриситет і орієнтацію орбіти.

Слід зазначити, що немає загального способу визначення просторового положення орбіти. Видима швидкість  $v$  пов'язана з істинною швидкістю  $v_0$  співвідношенням

$$v = v_0 \sin i,$$

де  $i$  – кут між променем зору та нормаллю орбітальної площини.

*Фотометричні подвійні зірки.* У фотометричних подвійних зірках періодичні коливання повної яскравості викликані рухом компонентів подвійної системи. Як правило, фотометричні подвійні зірки є затемненими змінними, в яких зміна яскравості зумовлена проходженням компонентів один перед одним. Клас фотометричних подвійних зірок, в яких немає реальних затемнень,

відноситься до еліпсоїдальних змінних. У цих системах, принаймні, один з компонентів викривлений в еліпсоїдальну форму приливним тяжінням іншого. На різних ділянках орбіти проекція площі поверхні викривленого компонента змінюється. Поверхнева температура також буде нижчою на краях приливних горбів. Разом ці фактори викликають невеликі зміни яскравості.

Нахил орбіти затемненої подвійної зірки має бути дуже близьким до  $90^\circ$ . Цей кут може бути визначений з так званої кривої блиску. Кривою блиску називається зміна зоряної величини затемненої змінної як функції часу. Відповідно до форми кривої блиску, фотометричні зірки розбиті на три основних типи: типу Алголя, типу  $\beta$  Ліри і типу W Великої Ведмедиці.

**Рис. 3.** Роздвоєння і зміщення ліній у спектрах спектрально-подвійних зірок

**Зірки типу Алголя.** Затемнювані змінні типу Алголя названі так по першій відкритій зірці цього типу –  $\beta$  Персея (Алголь). Протягом більшої частини періоду крива блиску залишається досить постійною. Це відповідає фазам, протягом яких зірки видно роздільно одна від одної і повна зоряна величина залишається постійною.

На кривій блиску є два різних мінімуму, один з яких первинний, що зазвичай набагато глибший, ніж другий. Це зумовлено відмінностями в яскравості зірок. Коли більша зірка, яка зазвичай є холодним гігантом, закриває менший і більш гарячий компонент, на кривій блиску з'являється глибокий мінімум. Коли мала, яскрава зірка, проходить по диску гіганта, повна зоряна величина системи сильно не змінюється.

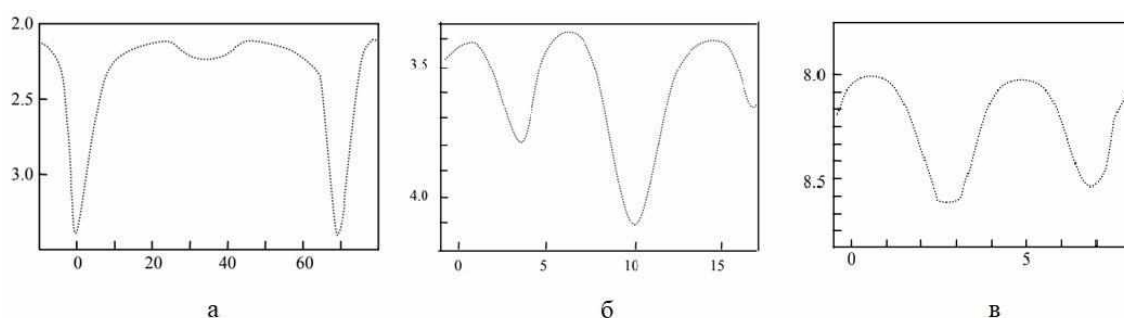
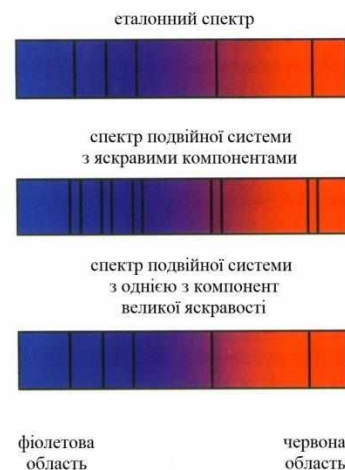
Форма мінімумів залежить від того, чи відбуваються окремі затемнення або повні. При окремому затемненні крива блиску гладка, тому що яскравість змінюється плавно зі зміною глибини затемнення. При повному затемненні є інтервал, протягом якого один компонент повністю невидимий. Повна яскравість залишається тоді постійною, а крива блиску має майже плоский мінімум. Дані зміни проілюстровано на рис. 4а. Таким чином, форма мінімуму в змінних типу Алголя дає інформацію про нахил орбіти.

Тривалість мінімумів залежить від відношення зіркових радіусів до розміру орбіти. Якщо зірка є також спектроскопічно-подвійною, можуть бути знайдені справжні розміри орбіти. В цьому випадку маси і розміри орбіти, а також радіуси можна визначити, не знаючи відстань до системи.

**Зірки типу  $\beta$  Ліри.** У подвійних системах типу  $\beta$  Ліри повна зоряна величина змінюється безперервно (рис. 4б). Зірки розташовані настільки близько одна до одної, що принаймні одна з них набуває еліпсоїдальної форми. Тому яскравість змінюється також поза затемнень. Змінні типу  $\beta$  Ліри можна розглядати як еліпсоїдальні затемнювані змінні.

У самій системі  $\beta$  Ліри одна зірка має перепопуну межу Роша і стійко втрачає масу на свого компаньйона. Переміщення маси викликає додаткові особливості в кривій блиску.

**Зірки типу W Великої Ведмедиці (W UMa).** У зірках типу W UMa мінімуми кривої блиску майже ідентичні, дуже круглі і широкі (рис. 4в). Це тісні подвійні системи, в яких обидва компонента перепопнують свої порожнини Роша, утворюючи так звану контактну подвійну систему.



**Рис. 4.** Зміна кривої блиску в залежності: а - від розташування зірок, б - блиску в залежності від зміни зоряної величини, в - в зірках типу W Великої Ведмедиці (W UMa)

**Висновки і напрямки подальших досліджень.** Завдяки сучасним методам виявлення подвійних зірок можливо з'ясувати безліч їх параметрів незалежно від їх типу. Відповідно до методу спостереження і виявлення тієї або іншої системи зірок, можна використовувати різні варіанти знаходження параметрів світил.

Зміна блиску тіла системи зазвичай викликана зміною взаємного положення тіл, внаслідок руху тіл по орбітах, а також обертанням тіла навколо власної осі. В останньому випадку крива блиску дозволяє встановити період обертання тіла на час спостереження.

У змінних зірок зміна блиску часто пов'язана з пульсаціями зірки, з рухом навколо неї менш яскравої зірки-компаньйона (затемнена змінність) та з іншими причинами. Крім того, порівняно слабкі зміни блиску зірки можуть свідчити про наявність у неї планет.

Зміни зсувів або роздвоєнь спектральних ліній спектрально-подвійних зірок дозволяють визначити променеву швидкість, яка є проекцією орбітальної швидкості на промінь зору. Криві променевих швидкостей – одного компонента або обох, якщо супутник не надто відрізняється за блиском від головної зірки – дають можливість обчислити елементи істинної орбіти.

У разі, коли подвійна зірка є затемненою, то стає можливим побудувати залежність інтегрального блиску від часу. Змінність блиску на цій кривій буде залежати від затемнень, ефектів еліпсоїдальності, ефектів відображення (перетворення випромінювання однієї зірки в атмосфері іншої).

Аналіз кривих блиску дає можливість визначити не тільки елементи орбіти затемненої подвійної зірки, але й деякі характеристики самих компонентів (наприклад, форму та розміри).

#### Список літератури

1. Киселев А. А. Двойные звезды и значение их наблюдений в астрономии / А. А. Киселев. - Соросовский образовательный журнал, 1996, №4, с. 69-73.
2. Паннекук А. История астрономии / А. Паннекук. - М.: Наука, 1966 – 592с.
3. Куто П. Наблюдение визуально-двойных звезд. - Пер. с фр. А. М. Черепашука. - М.: Мир, 1981. - 238 с.
4. Липунов В. М. В мире двойных звёзд / В. М. Липунов. - М.: Книжный дом "ЛИБРОКОМ", 2009. - 256 с.
5. Чинарова Л.Л. Двойные звезды и их эволюция: Метод. указания для школьников ст. кл., студ. физ.-мат. спец. ун-тов и любителей астрономии. - Одесса.: НИИ "Астрономическая обсерватория" ОНУ им. Мечникова, 2007.
6. Куликовский П. Г. Двойные звёзды / П. Г. Куликовский. - Физика космоса: Маленькая энциклопедия (2-е изд.). - М.: Советская энциклопедия, 1986. - 783 с.
7. Бакулин П.И. Курс общей астрономии./ П.И. Бакулин, Э.В. Кононович, В.И. Мороз. - М.: Наука, 1983. - 560 с.
8. Мур П. Астрономия с Патриком Муром. / П. Мур. - Москва, Файр-Пресс, 2004, 364 с.
9. Климишин И. А. Элементарная астрономия / И. А. Климишин. - Москва: Наука, 1991. - 464 с.
10. Список подвійних зірок у Великій Ведмедиці. [Електронний ресурс] - Режим доступу до ресурсу: <https://tls-urist.ru/uk/seven-stars-of-the-big-bear-the-constellation-of-a-large-bear.html>

УДК 621.311

О.В. ЗАМИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., О.В. ГРИЦЕНКО, асист.  
Криворізький національний університет

#### ДОСЛІДЖЕННЯ ФОТОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ З СИСТЕМОЮ ОХОЛОДЖЕННЯ

**Мета роботи.** Метою даної роботи є вибір найбільш ефективної системи охолодження для установки фотоелектричного перетворення з концентратором сонячного випромінювання.

**Методи дослідження.** У роботі використані чисельні методи, методи математичного аналізу, математичне моделювання, програмування.

**Наукова новизна.** Встановлено вперше, що залежності температури води на виході від ККД теплообмінника мають лінійний характер. Побудовано графік ККД систем охолодження.

**Практичне значення.** На сьогоднішній день в світі спостерігається стрімке зростання використання фотоелектричних перетворювачів. Тому підвищення ефективності перетворення сонячної енергії в електричну є актуальне наукове завдання. Використання системи охолодження підвищує стійкість фотоелектричного перетворювача до високих температур, що дозволяє не тільки збільшити генерацію електрики влітку, але і продовжити термін служби модулів.

**Результати.** Сонячна панель під дією світла виробляє не тільки електроенергію, але і тепло. У звичайній сонячній панелі в точці максимальної потужності лише 10-15% сонячної енергії, яка падає на неї, перетворюється в електрику; 4 % відбивається від лицьової поверхні сонячної панелі; більша частина решти перетворюється в тепло. Нормальною для роботи фотоелектричного перетворювача є температура 25 °С. З ростом температури потік електронів усередині елемента зростає, що викликає збільшення сили струму і падіння напруги. Падіння напруги при цьому більше, ніж збільшення сили струму. Тому загальна потужність зменшується, що призводить до того, що панель працює з меншою ефективністю. Для того щоб знизити температуру фотоелектричного перетворювача, необхідно передбачити систему охолодження. В роботі розглядаються системи охолодження водою, повітрям та туманом для установки фотоелектричного перетворення з концентратором сонячного випромінювання. Виконано моделювання процесу охолодження водою сонячної панелі з використанням теплообмінника прямо трубного типу в програмі SolidWorks. Також виконано розрахунок системи охолодження туманом та повітрям. Виявлено найбільш ефективну систему охолодження.

**Ключові слова:** фотоелектричний перетворювач, охолодження, теплообмінник, сонячна панель, температура панелі, тепло, сонячна радіація, температура води.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-150-156

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Сонячна енергія є однією з вагомих серед альтернативних енергетичних джерел і найбільш перспективною з точки зору кількості ресурсів і високої екологічності. Як відомо, при експлуатації альтернативних джерел живлення на базі сонячних батарей з практичної точки зору може виникнути ряд проблем, однією з яких є забезпечення їх якісного охолодження.

Більшість компаній, виробники сонячних панелей, використовують кремній для перетворення сонячного світла в електрику. Але типові кремнієві елементи перетворюють тільки 10%-15% сонячної радіації, яка потрапляє в них. Інша частина перетворюється в тепло, яке нагріває панелі. З кожним градусом температури вище 25 °С ефективність панелі падає. Значне підвищення температури сонячної панелі може привести до теплових деформацій обладнання і навіть до виходу його з ладу. Вирішення проблеми поглинання надлишкової теплової енергії є актуальним та своєчасним завданням [1].

**Аналіз досліджень і публікацій.** У розвиток світової геліотехники - фотоелектричного і теплового способів перетворення сонячної енергії внесли великий вклад такі вчені: Бариков М.Я., Віссаріонов В.І., Дерюгін Г.В., Кузнецов В.А., Малінін Н.К., Умаров Г. Я., Єршов А.А., Васильєв А.М., Ландсман А.П., Фаренбрух А., Бьюба Р., Баум В.А., Алфьоров Ж.І., Андрєєв В.М., Баранов В.К. Васильєв А.М., Гріліхес В.А., Євдокимов В.М., Вавилов В.С., Каган М.Б., Колтун М.М., Кондратьєв К.Я., Лідоренко Н.С., Ландсман А.П., Пивоварова З.І. та ін.

В [2] розглянуто можливості підвищення ефективності сонячних когенераційних установок на базі фотоелектричних теплових модулів. Запропоновано конструкцію установки, яка забезпечує отримання гарячої води із заданою температурою при збереженні високих значень ККД фотоелектричного перетворення. Фотоелектричний тепловий модуль був досліджений в натурних умовах при різних умовах експлуатації. Для цього була розроблена спеціальна система одночасного моніторингу метеопараметрів, контролю електричних і теплових параметрів фотоелектричного теплового модуля і температури різних точок модуля. Було проведено комплекс досліджень характеристик фотоелектричного теплового модуля в різних умовах експлуатації, рівні сонячної радіації і метеопараметрів. Було показано, що зміни рівня сонячної радіації протягом дня істотно впливають на вихідні параметри фотоелектричного теплового модуля.

У дослідженні [3] автори представляють набір тестових вимірювань для вибору схеми охолодження фотоелектричного модуля, щоб забезпечити найкращу раціональність в однорідності водної плівки, знизити температуру модуля, знизити споживання води і, нарешті, максимізувати вихідну потужність модуля. Експерименти проводилися з фотоелектричним модулем потужністю 230 Вт в лабораторії рідинних машин і енергетичних систем на кафедрі промислової інженерії Падуйського Університету, Італія. Після проведення експериментів результати показують, що система охолодження обладнана трьома характерними форсунками з кутом уприскування 90°, які працюють при вхідному тиску 1,5 бар протягом 30 секунд і вимкненими протягом 20 секунд, можливо, для зменшення модуля температури до 28 °С, що підвищує ефективність модуля приблизно на 14%.

Краутер [4] розробив активний метод охолодження водою на поверхні фотоелектричного модуля потоком плівки. Автор використав плівку зовнішнього потоку, утворену водою на по-

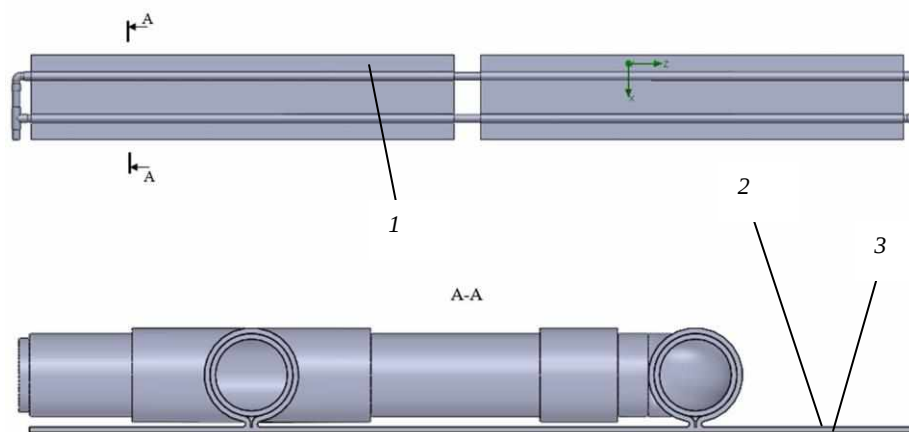
верхні модуля, яка витикає з сопла, розташованого у верхній частині модуля. Експериментальні результати показали, що поточна плівка сприяє підтримці чистоти поверхні модуля і зниження втрат на відбиття на 2-3,6%. Температура поверхні фотоелектричного модуля впала до 40° С, а вихід електроенергії за весь день збільшився на 10,3%.

Також у роботах [5-9] доказана ефективність охолодження фотоелектричного перетворювача.

Аналіз наукових досліджень на тему фотоелектричного перетворення з системою охолодження показав, що в даний час сформована певна теоретична і експериментальна база.

**Постановка задачі.** Вартість сонячних батарей можна істотно знизити за допомогою концентрації сонячного випромінювання. У цьому випадку забезпечується різке зменшення площі фотоелектричного перетворювача, і якщо вартість одиниці площі концентратора багато менше, ніж у сонячного елемента, то при збереженні загального ККД перетворення можна знизити вартість одиниці потужності. Через використання концентраторів сонячної енергії збільшується температура настільки, що може вивести з ладу фотоелектричний перетворювач [10,11]. Таким чином пошук способів зниження температури є актуальним завданням. Для вирішення цього завдання необхідно дослідити декілька систем охолодження та вибрати найефективнішу.

**Викладення матеріалу та результати.** Для системи охолодження водою підібрано теплообмінник прямотрубного типу (рис.1).



**Рис. 1.** Вид прямотрубного теплообмінника спереду та в розрізі: 1 – мідна труба  $D = 15 \times 1 \text{ мм}$ ; 2 – мідна пластина; 3 – фотоелементи з пластиковою EVA плівкою

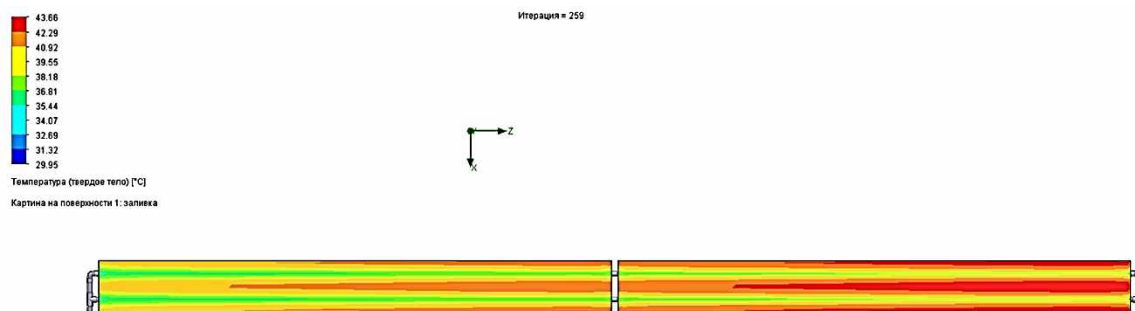
Виконано моделювання процесу охолодження сонячної панелі з використанням теплообмінника прямотрубного типу в програмі SolidWorks. Для перевірки працездатності розрахованого теплообмінника виконано моделювання процесу охолодження при різних температурах рідини на вході в теплообмінник 15, 30, 45 та 60 °С і сонячній радіації 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Результати моделювання представлені у табл. 1. Значення середніх температур навколишнього середовища взяті для Дніпропетровської області. Коефіцієнт концентрації сонячної радіації для установки - 5. Коефіцієнт альбедо - 0,6.

Також нижче представлена картина температури на поверхні сонячної радіації при температурі води на вході в теплообмінник 30°С (рис. 2) і без охолодження (рис. 3).

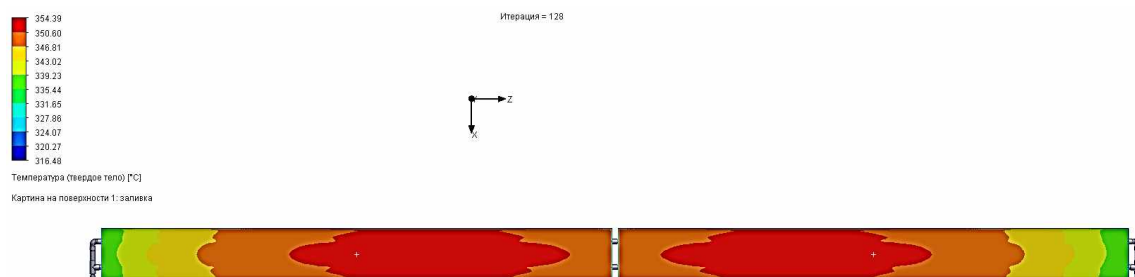
Таблиця 1

Результати моделювання прямотрубного теплообмінника в SolidWorks

| Температура середовища, °С | Сонячна радіація $q$ , Вт/м <sup>2</sup> | Температура рідини на вході, °С | Температура рідини на виході, °С | ККД теплообмінника | Температура панелі з охолодженням, °С |                             | Температура панелі без охолодження, °С |                             | Швидкість рідини в теплообміннику, м/с |
|----------------------------|------------------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|----------------------------------------|
|                            |                                          |                                 |                                  |                    | середня температура, °С               | максимальна температура, °С | середня температура, °С                | максимальна температура, °С |                                        |
| 21,4                       | 1000                                     | 15                              | 18,79                            | 0,93               | 28,37                                 | 31,35                       | 348,62                                 | 352,22                      | 0,7                                    |
|                            |                                          | 30                              | 33,22                            | 0,79               | 40,43                                 | 43,39                       |                                        |                             |                                        |
|                            |                                          | 45                              | 47,58                            | 0,63               | 53,51                                 | 56,03                       |                                        |                             |                                        |
|                            |                                          | 60                              | 61,94                            | 0,47               | 66,76                                 | 68,81                       |                                        |                             |                                        |



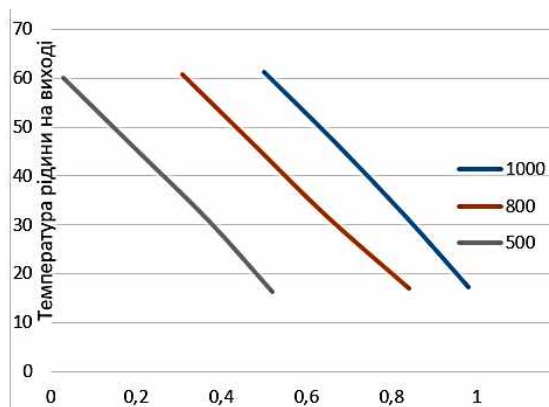
**Рис. 2.** Картина температури на поверхні сонячної панелі з охолодженням при сонячній радіації  $1000 \text{ Вт/м}^2$  і температурі рідини на вході  $30^\circ\text{C}$



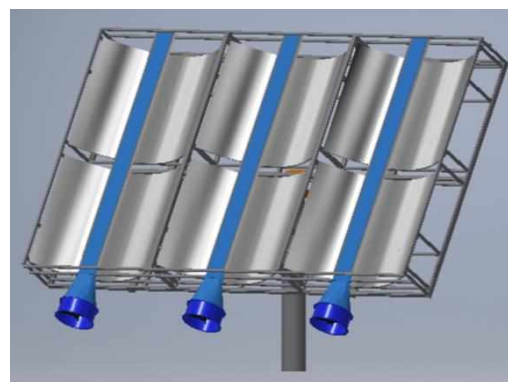
**Рис. 3.** Картина температури на поверхні сонячної панелі без охолодження при сонячній радіації  $1000 \text{ Вт/м}^2$

На рис. 4 представлено графік залежності температури води на виході від ККД теплообмінника для  $1000, 800, 500 \text{ Вт/м}^2$ .

Система охолодження повітрям заснована на відводі тепла від сонячної панелі потоком повітря від вентилятора. Охолодження сонячної панелі за допомогою вентилятора здійснюється за рахунок вимушеної конвекції. Для охолодження повітрям обираємо вентилятор VENTS VKF 4D 450 з об'ємною витратою повітря  $V = 1,47 \text{ м}^3/\text{с}$ . Сонячну батарею з системою охолодження повітрям показано на рис.5.



**Рис. 4.** Графік залежності температури води на виході від ККД теплообмінника для  $1000, 800, 500 \text{ Вт/м}^2$



**Рис. 5.** Сонячна батарея з використанням повітряного охолодження

Виконано розрахунок даної системи. Метою розрахунку є перевірка здатності охолодити сонячну панель до температури  $25 - 60^\circ\text{C}$ .

Вхідні дані:

$Q_{\text{сон}} = 2574 \text{ Вт}$  – кількість сонячної радіації;

$b = 0,156 \text{ м}$  – ширина панелі;

$a = 3,3$  – довжина панелі;

$F = 0,5148 \text{ м}^2$  – площа панелі;

$\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$  коефіцієнт теплопровідності повітря;

$\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – кінематична в'язкість повітря;

$t = 21,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  – температура навколишнього середовища;

$S = 0,026\text{ м}^2$  – площа перерізу теплообмінника;

$V = 1,47\text{ м}^3/\text{с}$  об'ємна витрата повітря (продуктивність вентилятора);

$aa = 0,6$  – коефіцієнт Альбедо для сонячної панелі;

Наведемо результати розрахунків [12-14].

Швидкість потоку повітря від вентилятора, м/с

$$w = \frac{V}{S} = 56,5. \quad (1)$$

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{w \cdot a}{\nu} = 1,24 \cdot 10^7. \quad (2)$$

При  $Re < 10^5$

$$Nu_{жл} = 0,57 Re_{жл}^{0,5}. \quad (3)$$

При  $Re > 10^5$

$$Nu_{жл} = 0,032 Re_{жл}^{0,8}. \quad (4)$$

Коефіцієнт тепловіддачі повітря,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$

$$\alpha = \frac{Nu_{жл} \cdot \lambda}{a} = 118,7. \quad (5)$$

Температура сонячної панелі,  $^{\circ}\text{C}$

$$t_c = t + \frac{Q_{сон} \cdot aa}{\alpha \cdot F} = 46,7. \quad (6)$$

Охолодження сонячної панелі можливо шляхом охолодження сумішшю вологого повітря і дрібних крапель води. Використання такої суміші значно ефективніше, ніж сухого повітря [15].

По-перше, зовнішнє повітря після зволоження охолоджується до рівня психрометричної температури (температури "морого" термометра), тому набуває здатності знижувати температуру сонячної панелі. По-друге, краплі води, які знаходяться в повітрі, стикаючись з поверхнею нагрітої панелі, утворюють на поверхні тонку плівку, яка нагрівається і, інтенсивно випаровуючись, додатково, через прямий контакт, охолоджують її.

Високонапірна туманоутворююча система (рис.6), як випливає з назви, працює при високому тиску води. Для цього застосовується поршневий насос на 70-100 бар з продуктивністю 1-8 літрів в хвилину і вбудованим таймером.

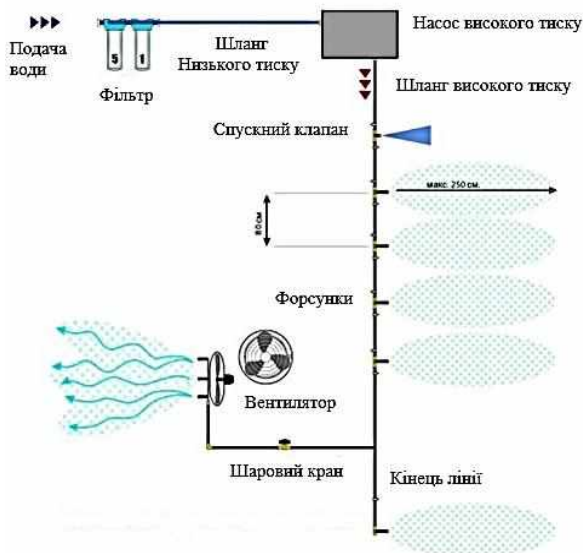


Рис.6. Схематичний приклад монтажу системи

Виконано розрахунок системи охолодження туманом. Приймаємо температуру панелі  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Метою цього розрахунку є перевірка здатності системи охолодити сонячну панель до заданої температури і знаходження витрати форсункою. Для охолодження туманом обираємо вентилятор VENTS VKF 4D 450 з об'ємною витратою повітря  $V = 1,47\text{ м}^3/\text{с}$ .

Вхідні дані:

$Q_{сон} = 2574\text{ Вт}$  – кількість сонячної радіації;

$b = 0,156\text{ м}$  – ширина панелі;

$a = 3,3$  – довжина панелі;

$F = 0,5148\text{ м}^2$  – площа панелі;

$\lambda = 2,59 \cdot 10^{-2}\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$  коефіцієнт теплопровідності повітря;

$\nu = 15,06 \cdot 10^{-6}\text{ м}^2/\text{с}$  – кінематична в'язкість повітря;

$t_n = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$  – температура СП;

$t_c = 21,4\text{ }^{\circ}\text{C}$  – температура сухого повітря;

$t_b = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$  – температура перенасиченого вологого повітря;

$S = 0,026\text{ м}^2$  – площа перерізу теплообмінника;

$V = 1,47\text{ м}^3/\text{с}$  – об'ємна витрата повітря (продуктивність вентилятора);

$w = 56,5\text{ м/с}$  – швидкість потоку повітря від вентилятора;

$aa = 0,6$  – коефіцієнт Альбедо для сонячної панелі;

Наведемо результати розрахунків.

Число Рейнольдса

$$Re = \frac{w \cdot a}{\nu} = 1,24 \cdot 10^7. \quad (7)$$

Коефіцієнт тепловіддачі повітря, Вт/(м<sup>2</sup>·К)

$$\alpha = \frac{Nu_{жл} \cdot \lambda}{a} = 118,7. \quad (8)$$

Коефіцієнт масовіддачі між мокрою поверхнею і середовищем, кг/(м<sup>2</sup>·с)

$$\alpha_T = \frac{2,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha}{q_{вип}} = 0,131, \quad (9)$$

де  $q_{вип} = 2258 \cdot 10^3$  Дж/кг – питома теплота випаровування води.

Кількість тепла, яке йде на випаровування, Вт

$$Q_{вип} = q_{вип} \cdot \alpha_T \cdot n \cdot F \cdot (d_n - d_e) = 610,9, \quad (10)$$

де  $n = 0,4$  – коефіцієнт заповнення ділянки  $F$  об'єкта краплями, які випаровуються;  $d_n = 0,02$  – коефіцієнт вмісту вологи насиченого повітря при температурі  $t_n$ ;  $d_e = 0,01$  – коефіцієнт вмісту вологи насиченого повітря при температурі  $t_e$ .

Температура сонячної панелі, °С

$$t_{\Pi} = t_B + \frac{Q_{солн} \cdot \alpha_{aa} - Q_{вип}}{\alpha \cdot F} = 30,3. \quad (11)$$

Витрата форсунки, кг/с

$$G = \frac{c \cdot \rho \cdot V \cdot (t_c - t_B)}{q_{вип}} = 0,005, \quad (12)$$

де  $c = 1005$  Дж/(кг·град) – питома ізобарна теплоємність повітря;  $\rho = 1,2$  кг/м<sup>3</sup> – щільність повітря.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Проаналізувавши отримані дані про охолодження водою, можна зробити висновок, що запропонований теплообмінник працездатний і охолоджує панель навіть при температурі води на вході 60 °С і сонячній радіації 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Охолодження потоком повітря зі швидкістю 56,5 м/с дозволяє знизити температуру сонячної панелі до 46,7°С при сонячній радіації 1000 Вт/м<sup>2</sup>. Система охолодження туманом з заданими параметрами охолоджує сонячну панель до температури 30,3 °С. Порівнявши три системи охолодження, отримали, що найбільш ефективна система – система охолодження туманом. Її ККД (рис.7) близько до 1.

Напрямок подальших досліджень полягає в удосконаленні запропонованих методів охолодження та пошук нових.

#### Список літератури

1. Арбузов Ю.Д., Евдокимов В.М. Основы фотоэлектричества. М.: ГНУ ВИЭСХ, 2007. 292 с.
2. Харченко В.В. Комплекс мониторинга основных параметров гелиоустановок с фотопреобразователями / В.В. Харченко, П.В. Тихонов // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 02 (119). – С.32–36.
3. Benato A., Stoppato A. An Experimental Investigation of a Novel LowCost Photovoltaic Panel Active Cooling System // Energies. 2019. vol 12.8. pp. 14- 48.
4. Krauter S. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels // Solar energy materials and solar cells. 2004. vol. 82.1-2. pp. 131-137.
5. Irwan Y. M., Leow W. Z., Irwanto M., Amelia A. R., Gomes N., Safwati I. Indoor test performance of pv panel through water cooling method // Energy Procedia. 2015. vol. 79. pp. 604-611.
6. Zilli B.M., Lenz A.M., de Souza S.N.M., Secco D., Nogueira C.E.C., Junior O.H.A., Nadalite W.C., Siqueira J.A.C., Gurgacz F. Performance and effect of water-cooling on a microgeneration system of photovoltaic solar energy in Paraná, Brazil // Journal of Cleaner Production. 2018. vol. 192. pp. 477-485.
7. Д. Мак-Бейг Применение солнечной энергии. — М.: Энергоиздат, 1981. — Тираж 5 600 экз.
8. Bahaidarah H., Subhan A., Gandhidasan P., Rehman S. Performance evaluation of a PV (photovoltaic) module by back surface water cooling for hot climatic conditions // Energy. 2013. vol. 59. pp 445-453..
9. Hachicha A.A., Ghenai C., Hamid A.K. Int. J. Energy Power Eng. 2015. vol. 9.9. pp 1106-1109.
10. Стребков Д.С., Майоров В.А., Панченко В.А., Осьмаков М.И., Плохих С.А. Солнечная установка с матричными фотоэлементами и концентратором. Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность, 2013, № 2, с. 50-52.

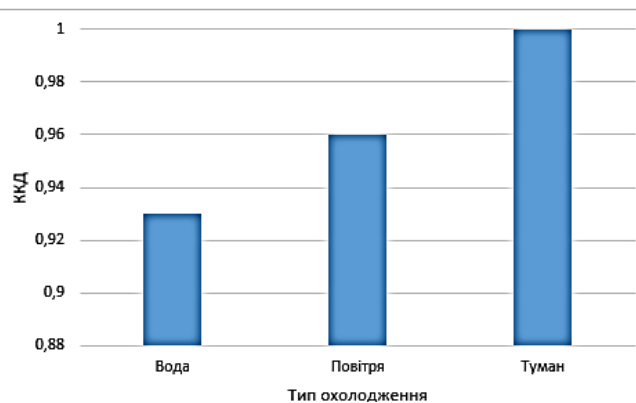


Рис.7. Діаграма ККД систем охолодження

11. **Boxwell M.** Solar Electricity Handbook: A Simple, Practical Guide to Solar Energy - Designing and Installing Solar Photovoltaic Systems. 2019 Edition-е изд. internet linked, 2019.
12. **Суслов В.А.** Тепломасообмен: учеб. пособие / СПбГТУРП. СПб., 2016. Часть 1. – 98 с.
13. **Константинов С. М.** Тепломасообмін: Підручник. - К.:ВПІ ВПК "Політехніка": Інрес, 2005.
14. **Погорєлов А.І.** Тепломасообмін (основи теорії та розрахунку): Навчальний посібник для вузів. - Львів: "Новий Світ-2000", 2006.
15. **Савосин С.И.** Тропический лес в центре столицы / Журн. Технология адиабатического увлажнения CAREL, 2016. Вып. 1.

УДК 622.27

С.В. ПИСЬМЕННИЙ, канд. техн. наук, доц., В.О. БІЛЮК, студ.  
Криворізький національний університет

### ДОСЛІДЖЕННЯ ТВЕРДЮЧИХ СУМІШЕЙ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ КРИВОРІЗЬКОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО РОДОВИЩА ІМ. КІРОВА ПРАТ «ЦГЗК»

**Мета.** Метою даної роботи є обґрунтування камерної системи розробки із подальшою закладкою виробленого простору і вибору закладального матеріалу для підземного видобутку магнетитових кварцитів в умовах шахти ім. Артема ПрАТ «ЦГЗК» для збереження земної поверхні, площа якої забудована житловими та промисловими спорудами і ускладнена зонами обвалення від розробки покладів багатих залізних руд.

**Методи дослідження.** В роботі використано комплексний метод досліджень, що включає в себе аналіз і узагальнення відомих розробок в досліджуваній області.

**Наукова новизна.** Новизна полягає в удосконаленні очисних камер шляхом надання їм склепінної форми при розробці родовища камерною системою із подальшою закладкою виробленого простору, що дозволить збільшити об'єм камер, а також сприятиме збереженню їх стійкості протягом усього строку експлуатації. В якості твердуючої закладки запропоновано використовувати суміш, до складу якої входять полімерні добавки, що сприяють покращенню властивостей готової закладки, а також дозволяють знизити її вартість за рахунок зменшення обсягу компонентів на 1 м<sup>3</sup>, а також дають змогу ширше використовувати відходи гірничо-видобувної галузі.

**Практична значимість.** В результаті використання камерних систем, що передбачають застосування твердуючої закладки, в 3-4 рази знижуються втрати і засмічення при видобутку руди, а при додаванні полімерних добавок до її складу дозволить у 2 рази зменшити вартість закладки, за рахунок чого забезпечується високий економічний ефект і з часом затрати на закладні роботи окупаються.

**Результати.** Досліджено, що для відпрацювання запасів магнетитових кварцитів залізорудним родовищем ім. Кірова доцільно застосовувати камерну систему розробки з закладкою виробленого простору, з метою збереження денної поверхні. Для відпрацювання запасів у поверсі 220-130 м, з метою збереження стійкості налягаючих порід, пропонується формувати очисну камеру склепінчастої форми у верхній частині очисного блоку. Згідно виконаних укрупнених техніко-економічних показників встановлено, що при забезпеченні однакових фізичних властивостей закладального матеріалу, закладка на основі полімерів дешевша в 2 – 3 рази у порівнянні з закладкою на основі цементного розчину.

**Ключові слова:** магнетитові кварцити, очисна камера, закладка, стійкість, міцність, камерна система розробки.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-156-164

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Родовище залізних руд шахти ім. Артема ПрАТ «ЦГЗК» займає площу між гірськими відводами шахт «Родина» ПАТ «Кривбасзалізорудком» – на півночі і ш. «Гігант-Глибока» ПрАТ «ЦГЗК» – на півдні, нижче горизонту 1045 м шахтою Артем шахтоуправління ПАТ Арселор-Міттал ведеться відпрацювання багатих залізних руд підземним способом. Протяжність гірничого відводу рудника з південного заходу на північний схід 2,2 км [1].

В геологічній побудові родовище представлено метаморфічним комплексом порід Криворізької серії, гранітоїдні породи Дніпровсько-Токівської і Кіровоградсько-Житомирської серій. У лежачому боці відпрацьованих покладів багатих залізних руд знаходяться магнетитові кварцити у складі I і II залістистих пластів, які, в свою чергу, складені мартитовими, гетит-гематит-мартитовими, силікат-карбонат-магнетитовими, силікат-магнетитовими і магнетитовими кварцитами з прошарками сланців. Потужність залістистих пластів коливається в межах від 4 до 100 м. Сланцеві пласти представлені кварц-серіцит-хлоритовими і іншими сланцями з прошар-

ками безрудних кварцитів. Їх потужність складає 20 – 100 м. Пласти магнетитових кварцитів і поклади багатих залізних руд відносяться до Саксаганської синкліналі і є основним рудним джерелом родовища. Інші розвинені у четвертому, п'ятому та шостому залізистих пластах. До вміщуючих порід належать кварц-біотит-хлоритові сланці першого, другого і третього сланцевого пластів, а також магнетит-карбонат-силікатні кварцити перехідних пачок першого і другого залізистих пластів [2].

Якість залізистих кварцитів першого і другого залізистих пластів родовища по падінню і по простяганню має істотні зміни, так, коливання між максимальним і мінімальним значеннями вмісту заліза в  $S_x^{1f}$  досягають 1,6 – 1,3% для заліза загального 1,68 – 1,23% та для заліза магнетитового, у другому залізистому пласті  $S_x^{2f}$  - відповідно 1,9 – 0,8% і 4,3 – 3,5%. За простяганням ці коливання в першому залізистому пласті для заліза загального знаходиться на рівні 1,7 – 1,0% і магнетитового – 2,5 – 2,0%, для другого – відповідно 4,1 – 2,9% і 4,6 – 2,5%. Розподіл запасів залізистих кварцитів по першому та другому пластам за категоріями наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Запаси і масова частка заліза в магнетитових кварцитах

| Бортовий вміст Fe, % | Страт. індекс | Запаси кварцитів по категоріям, тис.т |        | Масова доля заліза, % |       |       |       |
|----------------------|---------------|---------------------------------------|--------|-----------------------|-------|-------|-------|
|                      |               |                                       |        | $C_1$                 |       | $C_2$ |       |
|                      |               | $C_1$                                 | $C_2$  | заг.                  | магн. | заг.  | магн. |
| 20                   | $S_x^{1f}$    | 341284                                | 62543  | 33,2                  | 24,8  | 32,6  | 24,4  |
|                      | $S_x^{2f}$    | 218140                                | 52335  | 32,8                  | 25,8  | 31,8  | 25,3  |
|                      | Всього        | 559424                                | 114878 | 33,0                  | 25,2  | 32,2  | 24,8  |
| 16                   | $S_x^{1f}$    | 505760                                | 82339  | 32,2                  | 22,2  | 32,0  | 22,2  |
|                      | $S_x^{2f}$    | 241607                                | 55189  | 32,5                  | 24,5  | 31,8  | 24,9  |
|                      | Всього        | 747367                                | 137528 | 32,3                  | 22,9  | 31,9  | 23,3  |
| 10                   | $S_x^{1f}$    | 617895                                | 103782 | 31,2                  | 20,0  | 31,0  | 19,6  |
|                      | $S_x^{2f}$    | 294966                                | 65656  | 31,6                  | 21,7  | 29,9  | 20,5  |
|                      | Всього        | 912861                                | 169438 | 31,3                  | 20,5  | 30,6  | 19,9  |

В даний час територія гірничого відводу не лише забудована житловими та промисловими спорудами, а й ускладнена зонами обвалення від розробки покладів багатих залізних руд родовищ вищевказаних гірничо-видобувних підприємств, крім того, по простяганню родовища проходить залізничний шлях Укрзалізниці та упорядковане шосе, що з'єднує житлові масиви.

Розробку магнетитових кварцитів в межах родовища пропонується двома варіантами: системою камера-цілик в інтервалі глибин або системою з повною закладкою виробленого простору. Вилучення з надр магнетитових кварцитів передбачає утворення камер об'ємом близько 1,2 млн  $m^3$  на рік, що, відповідно, призведе до осідань земної поверхні. При застосуванні систем із закладкою, порожнини повністю заповнюються твердіючою сумішшю, яка перешкоджає процесу осідання поверхні. Однак, при відпрацюванні кварцитів системою камера-цілик, не дивлячись на наявність в надрах пустот, так само не буде відбуватися значних осідань поверхні, у зв'язку із залишенням в надрах запобіжних ціликів [3].

В обох варіантах передбачаються заходи щодо запобігання розвитку зони зрушень. Таким чином, залучення в зону зсуву нових площ водоносних горизонтів відбуватися не буде, а з огляду на вкрай низькі фільтраційні параметри, як магнетитових кварцитів, так і вміщуючих порід, розміри депресійної воронки, утвореної при осушенні природно-багатих залізних руд, практично не збільшаться.

При підрахунку запасів I і II залізистих пластів в гірничому відводі ім. Кірова враховувались два варіанти відпрацювання запасів магнетитових кварцитів: 1 варіант – система розробки з відкритим очисним простором з залишенням ціликів та 2 варіант – система розробки з відкритим очисним простором із закладкою виробленого простору. Експлуатаційні запаси по запропонованим варіантам зі зміною бортового вмісту з 20% до 10%, збільшуються відповідно з 73723 до 116586 тис. т та з 228453 до 361248 тис. т (див. табл. 1).

При застосуванні 1 варіанту, кількість запасів, що підлягають виїмці, зменшується в 2,0–2,5 рази. До того ж, виникає необхідність додаткового контролю, за станом міжкамерних ціликів після виїмки основних запасів родовища. Це зумовить підтримку головних і вентиляційних стволів, основних відкотних горизонтів в робочому стані. Застосування системи розробки зі

твердуючою закладкою виробленого простору, навпаки, дозволить більш повно відпрацювати дане родовище [4].

На підставі вищесказаного, в подальших дослідженнях щодо відпрацювання магнетитових кварцитів доцільно розглядати 2-й варіант – із застосуванням системи розробки із закладкою виробленого простору.

На теперішній час, при видобутку багатих руд в Криворізькому залізорудному басейні, річне пониження гірничих робіт не перевищує 17 – 19 м, при цьому необхідно враховувати, що низький рівень пониження гірничих робіт пов'язаний з підйомними можливостями рудовидаючих стволів і значною глибиною розробки 1200 – 1300 м. Максимальне річне пониження гірничих робіт при підземній розробці залізистих пластів із застосуванням системи із закладкою виробленого простору становить 17,5 м при застосуванні традиційних технологічних процесів [5].

З аналізу роботи шахти Запорізького залізорудного басейну (ЗЗРК), на якому використовується самохідна техніка, мінімальне річне пониження гірничих робіт при застосуванні систем розробки зі закладкою становить 11,9 м при річній продуктивності 3000 тис. т, а максимальне пониження згідно норм технологічного проектування – 17,5 м. Ширина камер прийнята 15 – 30 м, хоча іноді успішно відпрацьовували камери шириною до 60 м. Висота очисної камери на початку відпрацювання родовища становила 40 м. Однак, надалі висоту камер збільшили до 100 м надаючи їм ромбовидну форму. Дана форма очисних камер дозволила суттєво зменшити втрати руди в міжповерхових ціликах. Одночасно в межах ділянки знаходяться у відпрацюванні 1 або 2 камери. Їх відпрацьовують в такому порядку, щоб між двома камерами, в яких ведеться відбійка руди, знаходився цілик з руди або закладки потужністю 30 м (ширина двох камер).

Закладку готують на спеціальному комплексі, розташованому на поверхні. Закладну суміш спускають на рівень закладного горизонту по трубах, поміщених у дві свердловини, які пробурені з будівлі закладального комплексу. Закладальний комплекс складається зі складів: піску, шлаку і цементу, а також корпусу, де знаходяться млини для подрібнення шлаку і змішувачі. Проектна продуктивність закладного комплексу 1,5 млн м<sup>3</sup> закладної суміші.

При відпрацюванні родовища були досягнуті наступні техніко-економічні показники по системам розробки з різними формами закладних камер, табл.2.

Таблиця 2

Техніко-економічні показники

| Показники                                  | Форма камери |            |
|--------------------------------------------|--------------|------------|
|                                            | прямокутна   | ромбовидна |
| Продуктивність праці по шахті, т/зміну     | 9,6          | 11,6       |
| Витрати підготовчо-нарізних робіт, м/тис т | 3 – 9        | 4 – 7      |
| Втрати відбитої руди (%) від видобутку     | 9,0          | 8,2        |
| Засмічення руди (%) від видобутку          | 5,6          | 4,0        |
| Вартість 1 м <sup>3</sup> закладки, долл.  | 65 – 82      | 65 – 82    |
| Собівартість видобутку(франко-люк), долл/т | 68 – 77      | 65 – 71    |

В результаті аналізу відпрацювання родовищ підземним способом було встановлено, що при виїмці запасів широке застосування знаходять камерні системи розробки або із закладкою виробленого простору [6–9].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Дослідженням складу твердіючої закладки та технології ведення закладних робіт присвятили свої праці видатні вчені: М.Н. Цигалов, М.І. Агошков, О.Н. Байконур, Р.М. Бронніков, В.В. Куликов, К.В. М'ясников, Е.О. Штернбек, В.П. Кравченко, А.М. Кузьменко, Г.Т. Фаустов, З.Р. Маланчук, В.Г. Перепелиця, С.А. Курносов, К.Ю. Репп, Н.Ф. Замесов, А.Л. Требуков, В.П. Волощенко, В.І. Ляшенко, Є.П. Чистяков та ін.

Головними критеріями вибору складу твердіючої закладки є технологічність (міцність, транспортність властивості) і економічність (вартість компонентів закладки, транспортні витрати). Досвід виконання закладних робіт свідчить про прямо пропорційну залежність збільшення міцності закладного масиву від витрат в'язучої речовини.

В результаті досліджень вченими зроблений великий внесок в підвищення ефективності розробки рудних родовищ системами розробки із закладкою, які полягали в повноті вилучення запасів, а також в розробці безцементних закладних сумішей з місцевих матеріалів, що посприяло зниженню собівартості закладних робіт. Значні запаси шлаків чорної та кольорової металургії, що накопичилися у відвалах і отруюють навколишнє середовище, знайшли застосування в

складах закладних сумішей багатьох рудників у якості в'язучих матеріалів. Це дозволило зменшити витрати дорогого портландцементу, цементу або взагалі відмовитися від його застосування, а також утилізувати відходи виробництва в підземному просторі [14, 15].

В роботі [15] доведена економічна ефективність застосування відходів гірничо-збагачувальних комбінатів ГЗК з додаванням до закладки добавки класу полігексаметиленгуанідинів, а також обґрунтовано надійності закладки пропонованого складу.

В роботі [16] описано деформаційні характеристики тампонажного матеріалу, отриманого на основі композицій з полімерних волокон. Випробування такого матеріалу показують обнадійливі результати – при використанні поліпропіленових волокон підвищується міцність бетону на зріз, що може дати альтернативний метод проектування з'єднань елементів конструкцій з розчинів і бетону. Автори зазначають, що звичайні суміші, які застосовуються для закладки підземних пустот, мають велику деформативну здатність, а також незначну міцність, що в кінцевому підсумку зумовлює зрушення масивів гірських порід після ліквідації порожнин. Тому в якості основних закладних сумішей для закладних робіт (або консервації підприємства) рекомендуються суміші з наявністю армуючого елементу, таким є, наприклад, дисперсна фібра зі сталі або поліпропілену.

Крім того, численні дослідження показали, що ППВ в кількості 0,1% по об'єму забезпечує стійкість до виступання води, осідання, розтріскування при пластичній усадці, стирання, циклам заморожування / відтаювання, опір удару, а також вогнестійкість, залишкову міцність, антимікробний захист і знижену проникність. Вищеописана характеристика матеріалу означає, що ППВ можна використовувати в усіх областях застосування розчину і бетону. Переваги розчину з ППВ полягають в кращому зчепленні суміші, що прискорює укладку. При високому дозуванні довших фібрілірованих волокон міцність суміші може зрівнятися з бетоном, що містить 25 – 30 кг сталевих арматур.

Підсумовуючи все вищесказане, сфера використання даних матеріалів на сьогодні є невичерпною. В майбутньому перспектива розвитку широкого спектру використання полімерів лише зростатиме.

**Постановка задачі.** Для забезпечення високих показників виймання і збереження земної поверхні від значних просідань в умовах шахти ім. Артема ПрАТ «ЦГЗК» для підземного видобутку магнетитових кварцитів актуальним є дослідження варіанту застосування камерної системи розробки з подальшою альтернативною закладкою виробленого простору.

**Викладення матеріалу та результати.** В умовах шахтного поля ім. Кірова для видобутку запасів магнетитових кварцитів рекомендуємо застосовувати поверхово-камерну систему розробки із закладкою виробленого простору.

При відпрацюванні поверху 220-130 м пропонується застосовувати поверхово-камерну систему розробки з формуванням камери у верхній частині склепінчастої форми. Сутність запропонованого варіанту системи розробки полягає у наступному [10].

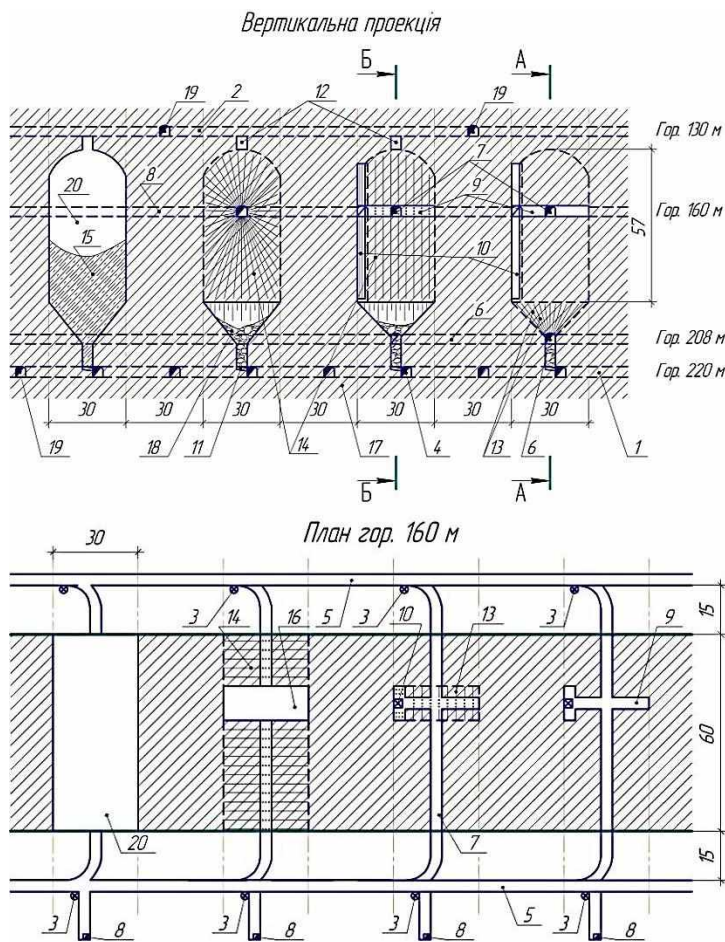
Родовище по простяганню ділиться на камери першої та другої черги по 30 м з висотою поверху 90 м, (рис. 1 – 3). На гор. 220 м проходиться відкотний штрек і закладний штрек гор. 130 м. Після чого проходять вентиляційно-ходовий підняттявий лежачого боку і орти заїзди через кожні 30 м. Далі проходять вентиляційно-ходовий підняттявий висячого боку та вентиляційні підповерхові штреки.

На кожен підповерх з гор. 220 м проходять матеріальні підняттяві по яким підіймають матеріали і обладнання. З вентиляційних штреків проходять підповерхові орти. У нижній частині блоку формують траншейну підсічку шляхом розбурювання рудного масиву штанговими шпурами з підсічного орта.

Після формування траншейної підсічки утворюють вертикальну компенсаційну камеру шляхом розбурюванням висхідних і низхідних віял глибоких свердловин з відрізного штреку. Потім розбурюють масив віялами глибоких свердловин з бурового орта, див. рис. 1 – 3.

Після заряджання і підривання глибоких свердловин виконується випуск заваленої руди з очисної камери. Випуск і доставка зруйнованої руди здійснюється за допомогою спарених віброживильників, що дозволяють збільшити продуктивність в 1,5 рази.

Очисна камера, після повного випуску руди, заповнюється твердуючою закладкою, яка транспортується до камер по закладному штреку і далі потрапляє у камеру по закладному орту.

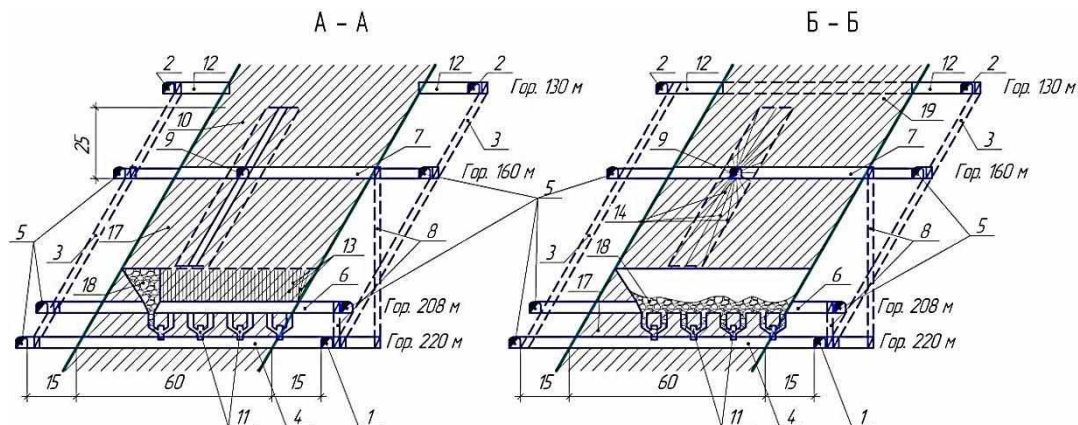


**Рис. 1.** Поверхово-камерна система розробки із закладкою виробленого простору для відпрацювання запасів шахтного поля ім.Кірова при виїмці поверху 220-130 м: 1 – відкотний штрек; 2 – закладний штрек; 3 – вентиляційно-ходовий піднятевий; 4 – орт-заїзд; 5 – вентиляційний підповерховий штрек; 6 – підсінний орт; 7 – буровий орт; 8 – матеріальний піднятевий; 9 – відрізний штрек; 10 – відрізний піднятевий; 11 – спарений віброживильник; 12 – закладний орт; 13 – штангові шури; 14 – глибокі свердловини; 15 – твердюча закладка; 16 – вертикальна компенсаційна камера; 17 – рудний масив; 18 – завалена руда; 19 – вентиляційний орт; 20 – закладна камера

**Рис.2.** Плани поверхово-камерної системи розробки із закладкою виробленого простору для відпрацювання запасів шахтного поля «ім.Кірова» при виїмці поверху 220-130 м: 1 – 20 – умовні позначення наведені на рис. 1

Відпрацювавши камери першої черги поверху 220-130 м починають виїмку камер другої черги (міжкамерних ціликів камер першої черги). Також під час відпрацювання магнетитових кварцитів можли-

ве застосування потужної самохідної техніки при випуску гірської маси. З аналізу відпрацювання родовищ, широке застосування знаходять навантажувально-доставні машини.



**Рис. 3.** Розрізи поверхово-камерної системи розробки із закладкою виробленого простору для відпрацювання запасів шахтного поля «ім.Кірова» при виїмці поверху 220-130 м: 1 – 20 – умовні позначення наведені на рис. 1

У лабораторії Криворізького національного університету були проведені дослідження по стійкості камер різної форми [11, 12]. В результаті досліджень встановлено, що при відпрацюванні запасів магнетитових кварцитів найбільш стійкими є камери склепінчастої форми [13].

Принциповою відмінністю масиву твердючої від сухої і гідравлічної закладки є здатність її не тільки самостійно зберігати свою форму і властивості, але і витримувати різні навантаження. Ці особливості твердючої закладки надали революціонізуючий вплив на вдосконалення застосовуваних і створення нових способів виконання очисних робіт при видобутку корисних копалин. Даний вид закладки застосовується для створення монолітних штучних ціликів (стовпів), огорожувальних підпірних стінок, перемичок, штучних масивів. Твердюча закладка стала за-

стосовуватися в гірничо-добувному виробництві порівняно недавно (останні 50-60 років) - це, по суті, різновиди «худих» бетонів, досвід отримання і вивчення яких налічує сотні років. У зв'язку з високою вартістю тверднучих матеріалів, даний вид закладки використовується після техніко-економічного аналізу доцільності цього варіанту [17].

Глибина ведення гірничих робіт є головним критерієм, який регламентує міцність закладного масиву з твердіючих сумішей. На глибинах розробки понад 600 м витрату в'язучих компонентів становить 300 кг/м<sup>3</sup> і більше. Дана ситуація вимагає пошук більш економічних шляхів підвищення міцності закладного масиву [18-20].

Використання дорогих матеріалів призводить до пошуку альтернативних складових закладного масиву, що нашоухує на думку впровадження до складу суміші матеріалів не тільки більш дешевого, але і сучасного сегменту. Такі добавки можуть також вигідно змінювати властивості суміші, при цьому не поступаючись за якістю звичним складам.

Додавання полімерів можливо не тільки в бетони і цементні розчини, так як ці речовини прекрасно працюють з будь-якими видами в'язучого і заповнювачів. Вони дозволяють отримати суміші з необхідною рухливістю для полегшення її закладки і якості виконуваних робіт, так само прекрасно себе проявляють при різних температурних режимах (морозостійкі добавки) і швидше тверднуть зі збільшенням температури. Розчини з полімерними добавками в процесі застигання набирають на 20 – 25% більше міцності, стають більш пластичними і легкозакладними, а також споживають на 20% менше води та на 15% менше в'язучого не втрачаючи при цьому своєї якості.

Для зміцнення зв'язків між складовими в розчині застосовують армуючу добавку - поліпропіленову фібру в співвідношенні 0,6 – 0,9% на 1м<sup>3</sup>. Введення фібри в суміш одразу сприяє підвищенню зчеплення бетонної суміші, перешкоджаючи осіданню великих і важких частинок при ущільненні, забезпечуючи пластичність суміші з фіброю в рідкому стані і полегшуючи подачу бетонної суміші насосом.

Підвищення пластичності при додаванні поліпропіленової фібри в рідкопластичному стані запобігає утворенню розривів і розшаровування цементних продуктів на окремі складові при формуванні їх з бетонної суміші або цементного розчину.

З метою підвищення міцнісних характеристик існуючих закладних сумішей, які на даний момент широко використовуються для систем розробки з подальшою закладкою виробленого простору, в рецептурі розчинів пропонується додавати прості полімерні закладки у вигляді пластифікаторів (наприклад, СП-1ВП) і армуючих волокон поліпропіленової фібри, табл. 3.

Таблиця 3

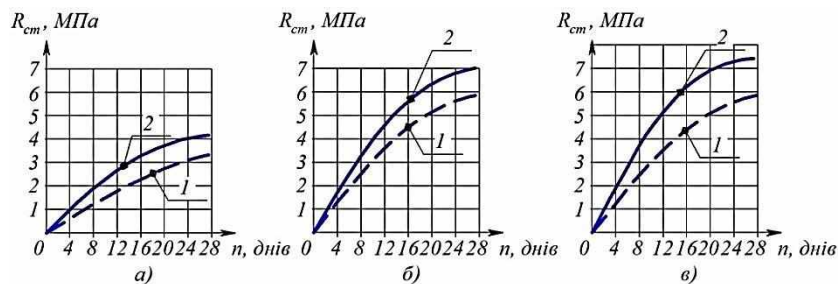
Склад закладних сумішей

| Найменування зразка | Цемент М300, кг/м <sup>3</sup> | Цемент М400, кг/м <sup>3</sup> | Пісок річковий, кг/м <sup>3</sup> | Щебінь (20-40мм), кг/м <sup>3</sup> | Доменний гранульований шлак, кг/м <sup>3</sup> | Відходи флюсового вапняку, кг/м <sup>3</sup> | Дроблені відвальні породи, кг/м <sup>3</sup> | Добавка СП-1ВП, кг/м <sup>3</sup> | Добавка поліпропіл. фібра (12+ см), кг/м <sup>3</sup> (%) | Вода, л/м <sup>3</sup> | Міцність у віці 28 днів, МПа |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------------------------|------------------------|------------------------------|
| №1                  | 300                            | -                              | 1400                              | -                                   | -                                              | -                                            | -                                            | -                                 | -                                                         | 410                    | 3 – 4                        |
|                     | 255                            | -                              | 1400                              | -                                   | -                                              | -                                            | -                                            | 1,35                              | -                                                         | 328                    |                              |
| №2                  | -                              | 382                            | 705                               | 1080                                | -                                              | -                                            | -                                            | -                                 | -                                                         | 220                    | 30 – 32                      |
|                     | -                              | 324                            | 705                               | 1080                                | -                                              | -                                            | -                                            | 1,94                              | -                                                         | 176                    |                              |
| №3                  | -                              | -                              | -                                 | -                                   | 400                                            | 1050                                         | 362                                          | -                                 | -                                                         | 400                    | 6 – 7                        |
|                     | -                              | -                              | -                                 | -                                   | 360                                            | 50                                           | 362                                          | 2,16                              | 0,6                                                       | 320                    |                              |

Переваги суміші з пластифікуючими добавками: економія цементу; зниження трудовитрат для отримання гладкої поверхні; зменшення ризику розтріскування; підвищення стійкості до стирання; поліпшення зв'язку з арматурним каркасом (якщо є); зниження усадки; підвищення

стійкості до температурних коливань; забезпечення можливості вкладання суміші без вібрації; продовження циклу «життя» бетонної суміші до двох годин; зниження ризику розшарування і раннього затвердіння.

Переваги використання фібри: знижує процеси тріщиноутворення; підвищує стійкість до зламу і усадки; знижує ефект розшарування (відшарування); зменшує зношуваність. Потрібно зазначити, що одним з критеріїв, який значно впливає на вибір закладки, є її вартість. Важливо сказати, що не завжди додавання полімерів до складу закладки є більш вигідно, але іноді собівартість такого штучного масиву може коштувати менше і, крім того, мати покращені властивості прикладом чого є рис. 4.



**Рис. 4.** Тенденція набору міцності зразків протягом відведеного часу: а – закладка на основі цементу М300; б – закладка на основі цементу М400; в – закладка на основі доменного шлаку; 1 – без додавання полімерів; 2 – з полімерами

При застосуванні дорогих систем розробки з подальшою закладкою виробленого простору намагаються зменшити затрати на матеріали, шляхом підбору оптимального складу суміші, враховуючи всі вимоги до подальшого штучного масиву. Звичайно, використання дороговартісних матеріалів дозволить отримати більш якісні розчини (звичайні важкі бетони) і більш чітко спрогнозувати їх поведінку в подальшому.

На основі вищевикладеного можна зобразити тенденцію набору міцності зразків за відведений час. Тому застосування цих матеріалів доцільне лише при встановленні необхідності наявності тих чи інших властивостей розчинів. Для обґрунтування доцільності використання даних систем і порівняння між собою варіацій з різною формою очисних камер і закладних сумішей техніко-економічні розрахунки зведені в табл. 4.

Таблиця 4

Техніко-економічні показники по варіантам очисної камери

| Найменування показників                             | Форма очисної камери |           |
|-----------------------------------------------------|----------------------|-----------|
|                                                     | прямокутна           | склепінна |
| Запас руди в блоці, тис.т                           | 525,0                | 450,0     |
| Питомі затрати підготовчо-нарізних виробок, м/тис.т | 4,7                  | 3,9       |
| Питомі затрати вибухової речовини, кг/т             | 0,28                 | 0,28      |
| Продуктивність праці по системі розробки, т/зм:     | 195,0                | 223,0     |
| Середньомісячна продуктивність блоку, тис.т         | 14,6                 | 16,7      |
| Вміст заліза магнітного, %:                         |                      |           |
| в масиві                                            | 25,16                | 25,16     |
| у видобутій рудній масі                             | 24,47                | 24,51     |
| Втрати руди, %                                      | 9,0                  | 8,5       |
| Засмічення руди, %                                  | 5,0                  | 4,7       |
| Собівартість закладальних робіт, грн/т:             |                      |           |
| №1 (Цемент М300)                                    | 140,7                | 164,1     |
| №2 (Цемент М400)                                    | 273,1                | 318,6     |
| №3 (Доменний шлак)                                  | 64,4                 | 75,1      |
| №1а (Цемент М300)                                   | 136,6                | 159,4     |
| №2а (Цемент М400)                                   | 196,7                | 229,5     |
| №3а (Доменний шлак)                                 | 64,0                 | 74,7      |

Аналізуючи дані отримані в табл. 4 видно, що при відпрацюванні блоку очисна камера прямокутної форми має більше запасів на 75 тис.т, при цьому різниця у продуктивності по системам – 2,1 тис.т/міс., втрати руди і засмічення – на 0,5% і 0,3%, вміст заліза магнітного знижується на 0,04%.

**Рис. 5.** Гістограма собівартості видобутку 1 т руди із закладними роботами з відповідними зразками при різних формах очисної камери

Так, з гістограми на рис. 5 видно, що при застосуванні закладок на основі цементу М300 при різних формах очисних камер різниця у собівартості видобутку 1 тони руди із закладними роботами коливається в межах 4,1 – 4,7 грн/т, на основі цементу М400 – 76,4 – 89,1 грн/т, а на основі доменного шлаку – 0,4 грн/т.

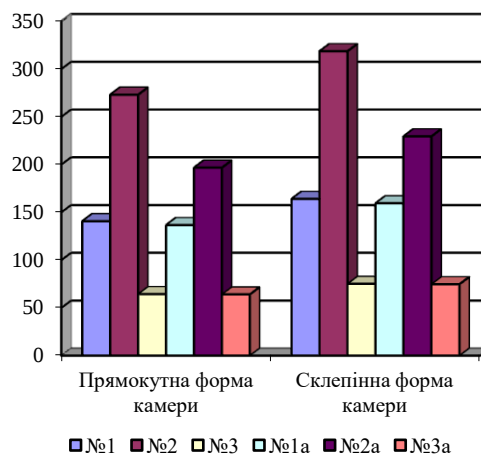
**Висновки та напрямок подальших досліджень.** В результаті виконаних наукових досліджень зроблено наступні висновки: при відпрацювання запасів магнетитових кварцитів рекомендуємо застосовувати камерну систему розробки з закладкою виробленого простору, яка дозволяє зберегти земну поверхню від значних деформацій та утворення воронки обвалення; виконавши аналіз існуючих твердуючих сумішей, встановлено, що закладка на основі цементного розчину має значну кількість недоліків: значна її вартість та особливі умови її транспортування. Однак, при застосуванні закладки на основі полімерів, виключається необхідність у створенні особливих умов її транспортування; згідно виконаних укрупнених техніко-економічних показників нами було виявлено, що при забезпеченні однакових фізичних властивостей закладального матеріалу закладка на основі полімерів дешевша в 2-3 рази у порівнянні з закладкою на основі цементного розчину.

Таким чином, пропонуємо при застосуванні камерного варіанту з закладкою виробленого простору при відпрацювання запасів шахтою ім. Артема в якості твердіючої суміші застосовувати полімерну закладку на основі доменного шлаку.

Подальші дослідження полягатимуть у вивченні фізико-механічних властивостей закладального матеріалу в умовах агресивного шахтного простору, а саме хімічного впливу на закладку мінералізованих вод і поведінки середовища, в яке буде виділена велика кількість теплоти після заповнення очисної камери закладкою.

#### Список літератури

1. Техніко-економічне обґрунтування виробничого значення і обґрунтування параметрів кондицій для підрахунку запасів I і II залізистих пластів в гірничому відводі ГП «Рудник ім.Кірова». – Кривий Ріг: Кривбаспроект, 2005.
2. **Ступник Н.И.** Параметры этажно-камерной выемки железистых кварцитов с наклонными целиками / Н.И. Ступник, С.В. Письменный // Гірничий вісник: Науково-технічний збірник. – Кривий Ріг, 2013. – № 96. – С. 3-7.
3. **Маланчук З.Р.** Дослідження стійкості оголень камерних систем розробки при відпрацюванні складноструктурних покладів залізних руд Криворізького басейну / З.Р. Маланчук, М.І. Ступник, М.Б. Федько, С.В. Письменный, В.О. Колосов, С.А. Курносів // Вісник НУВГП: Серія «Технічні науки». – 2018. – Випуск 3 (83). – С. 162-175.
4. **Письменный С.В.** Исследования устойчивости целиков от формы очистной камеры при отработке магнетитовых кварцитов в полях действующих шахт подземным способом / С.В. Письменный // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2014. – № 36. – С. 9-13.
5. **Письменный С.В.** Отработка сложно-структурных залежей богатых руд камерными системами разработки / С.В. Письменный // Гірничий вісник : Науково-технічний збірник. – Кривий Ріг, 2014. – № 97. – С. 3-7.
6. **Ступник Н.И.** Моделирование очистной камеры в неустойчивых рудах при разработке рудных месторождений / Н.И. Ступник, В.А. Калиниченко, В.А. Колосов, С.В. Письменный // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 4. – С. 68-71.
7. **Егорочкин А.А.** Совершенствование технологии очистной выемки руды с закладкой при отработке крутопадающих рудных тел в сложных горно-геологических условиях / А.А. Егорочкин, А.Е. Еженов // Повышение технического уровня горного производства: Труды ВНИИцветмета. Усть-Каменогорск, 1988. – С. 109-122.
8. **Письменный С.В.** Определение параметров компенсационной камеры сводчатой формы / С.В. Письменный, В.О. Хивренко, В.А. Сбитнев, Н.В. Полухина // Разраб. рудн. месторождений. – Кривой Рог: КТУ, 2002. – Вып. 79. – С. 48-52.
9. Определение и контроль допустимых размеров конструктивных элементов систем разработки рудниках Кривбасса / **Цариковский В.В., Сакович В.В., Недзвецкий А.В. и др.** // Кривой Рог: НИГРИ, 1987. – 76 с
10. **Ступник Н.И.** Отработка природно-бедных руд Криворожского железорудного бассейна с закладкой выработанного пространства / Н.И. Ступник, В.А. Колосов, С.В. Письменный, М.Б. Федько // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2014. – № 3. – С. 95-98.
11. Розробка технології відпрацювання складноструктурних покладів, що контактують з налягаючими глини-



місними породами: Звіт про НДР № 30-79-09 (Заключний) № ДР 0109U002336/Криворізький технічний університет: – Кривий Ріг: КТУ, 2010. – 246 с.

12. **Ступник Н.И.** Физическое моделирование формы компенсационных камер при отработке блоков на больших глубинах / Н.И. Ступник, С.В. Письменный // Вісник Криворізького національного університету, 2012. – №31. – С. 3-7.

13. **Письменный С.В.** Методика визначення активної зони склепоутворення на контурі підземно-транспортної виробки при комбінованій розробці залізрудних родовищ / С.В. Письменный // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 16 (1238). – С. 99-106.

14. **Кузьменко А.М.** Твердіюча закладка при відпрацюванні рудних крутих покладів у складних гірничо-геологічних умовах / А.М. Кузьменко, М.В. Петльованый, В.Ю. Усатий // Монографія. М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: НГУ, 2015. – 139 с.

15. **Горбунова О.А.** Розробка складів твердіючої закладки на основі відходів гірничо-збагачувального виробництва з додаванням полімерів класу полігексаметиленгуанідинів // ГІАБ. – 2010. – 145 с.

16. **Страданченко С.Г.** Об использовании тампонажного фиброраствора на основе полимера / С.Г. Страданченко, А.А. Шубин // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». – 2008. – №7(135). – С. 36-39.

17. **Васил'єв В.В.** Полімерні композиції в гірничій справі. М.: Наука, 1986. – 294 с.

18. **Кузьменко А. М.** Стан та перспективи розвитку закладних робіт на підземних рудниках України / А.М. Кузьменко, М.В. Петльованый // Геотехнічна механіка. – 2013. – Вип. 110. – С. 90-98.

19. **Ляшенко В.И.** Развитие технологий и технических средств для управления техногенными образованиями и отходами горно-металлургического производства / В.И. Ляшенко, О.Е. Хоменко, Т.В. Чекушина, Т.В. Дудар, И.А. Лисовой // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – №5. – С. 16-23.

20. **Ляшенко В.И.,** Создание и внедрение природоохранных технологий подземной добычи руд в энергонарушенных массивах / В.И. Ляшенко, О.Е. Хоменко, В.И. Голик // Маркшейдерия и недропользование. – 2020. – №4. С. 18-28.

УДК: 620.91

Ю.С. РУДЬ, д-р техн. наук, проф., В.Ю. БІЛОНОЖКО, ст. викл.

Криворізький національний університет

## РОЗРОБКА ЗАХОДІВ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА АГЛОМЕРАТУ НА ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТАХ

**Метою** даної роботи є аналіз проблеми енергозбереження в технологічному виробництві агломерату на гірничо-збагачувальних комбінатах і розробка конструкторських рішень, які забезпечують рекуперацію технологічного тепла і його використання для підвищення техніко-економічних характеристик обладнання. Можливі варіанти рішення проблеми показано на прикладі трьох конструкцій агломераційних машин.

**Метод досліджень** заснований на поєднанні методів аналізу складових проблеми енергозбереження в технологічному виробництві агломерату, а також відомих конструкцій агломераційних машин, і синтезу нових підходів до вирішення цієї проблеми з метою розробки нових конструкторських рішень.

**Наукова новизна.** Результати аналізу проблеми енергозбереження в технологічному виробництві агломерату на гірничо-збагачувальних комбінатах дозволили теоретично обґрунтувати тезу, що для рекуперації тепла можливо ефективно використовувати два джерела: 1) тепло газів, які засмоктуються ексаустером через вакуум-камери при спіканні шихти; 2) тепло газів, які перекачуються димосмоком через шар агломерату при його охолодженні.

**Практичне значення.** Тепло, отримане при рекуперації енергії технологічного процесу спікання залізрудної шихти на агломераційних машинах, може бути використано для підвищення техніко-економічних показників агломераційної фабрики гірничо-збагачувального комбінату. Обсяги тепла, які містяться в газі і парі, що прокачуються ексаустером і димосмоками машини і які можуть бути використані у виробництві, складають 64,9% від загального значення витратної частини теплового балансу виробництва агломерату або 1050-1730 кДж / кг (250-412 ккал / кг).

**В результаті** використання рекомендацій авторів статті забезпечується зростання продуктивності агломераційних конвеєрних машин шляхом інтенсифікації процесу спікання за рахунок рекуперації тепла газів і пари, що прокачуються ексаустерами та димосмоками. При рекуперації тепла, яке створюється в технологічному процесі спікання шихти, росте коефіцієнт корисної дії агломераційної машини і техніко-економічні показники гірничо-збагачувального підприємства. При цьому досягається значна економія газу та знижується кількість шкідливих викидів.

**Ключові слова:** агломераційна конвеєрна машина, процес спікання, рекуперації технологічного тепла, конструктивні рішення, техніко-економічні характеристики.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-164-169

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Технологічний процес виготовлення агломерату на агломераційних фабриках пов'язаний зі значними енергетичними витратами, а також з неминучими втратами теплової енергії. Для визначення джерел неминучих втрат теплової енергії та розробки обґрунтованих заходів з їх скорочення необхідно розуміння особливостей технології агломерації на обладнанні фабрик гірничо-збагачувальних комбінатів (рис. 1) [1]. Залізрудний концентрат, агломераційна руда, дрібний кокс, вапняк (при необхідності) стрічковими конвеєрами подаються в барабани-змішувачі, а потім в барабани-грудкувачі. В барабанах досягається перемішування сировини та формування гранул при додаванні води, які забезпечують газову проникність шихти. Грудкована шихта шаром 400 - 600 мм завантажується на колосникові ґрати агломераційної машини, під якими утворюється розрідження близько 70-100 кПа. Для захисту колосникових ґрат від дії високих температур, а також щоб уникнути втрат сировини на ґратах на них укладають шар спеченого агломерату діаметром 30-50 мм, який виділяється з готового продукту («постіль»). За допомогою інтенсивного джерела тепла підпалюють паливо (дрібний кокс), що додається в шихту. Розрідження забезпечує просмоктування повітря через ґрати та шар шихти і відсмоктування газів, які створюються при згорянні коксу та спіканні шихти. Горіння коксу, розпочавшись у верхньому шарі шихти, поступово поширюється на всю товщину шару і закінчується у поверхні колосникових ґрат. Кількість газів, що створюються при спіканні шихти, становить 333-1600 тис. м<sup>3</sup>/год, залежно від розмірів фабрики і умов роботи. Зазвичай на тону агломерату приходить від 1500 до 2500 м<sup>3</sup>/т відпрацьованих газів. Агломераційні машини з площею всмоктування більше 250 м<sup>2</sup> і/або ґратами шириною більше трьох метрів мають дві системи уловлювання відпрацьованих газів з окремими екстаустерами і пиловловлюючими пристроями для скорочення викидів. При згорянні палива шихти температура досягає 1300-1480° С; цього достатньо для часткового сплаву шматочків шихти і спікання їх між собою. Після закінчення процесу горіння весь шар шихти являє собою пористий, ніздрюватий кусковий продукт. Готовий агломерат після дроблення та відділення від нього дрібного циркуляційного матеріалу розмірами до 5 мм, надходить на охолодження. Для цього може виділятися окрема зона конвеєрної агломераційної машини або використовується кільцевий охолоджувач діаметром 20-30 м. Кільцевий охолоджувач складається з окремих секцій і має кільцевий жолоб з колосниковим днищем, що обертається в горизонтальній площині. Агломерат завантажується на колосникове днище шаром до 1 м і охолоджується повітрям, що постійно циркулює через шар. У більшості випадком повітря потрібно 1000-1500 нм<sup>3</sup>/т агломерату. Теплота відхідних газів, отриманих при охолодженні агломерату (температуру до 300° С), може бути повторно використаною в котлі-утилізаторі, наприклад, шляхом рециркуляції гарячих газів для підігріву повітря в запалювальному горні або для підігріву агломераційної шихти [2].

**Аналіз досліджень і публікацій.** В роботі [3] на базі даних, отриманих при аналізі хімічного складу шихти аглофабрики МК «Запоріжсталь» [4], проведено дослідження залежності кількості виділеної і внутрішньої теплової енергії в розглянутому одиничному обсязі шару шихти від середнього діаметру частинки  $d_{cp}$ . Із застосуванням даних теплофізичних вимірювань, результатів промислових випробувань, комплексної математичної моделі агломераційного процесу, теплового балансу агрегату і узагальнених теплотехнічних характеристик автором дисертації [5] проаналізована і представлена раціональна теплова схема для типової агломераційної машини. Встановлено, що тепловий к.к.д. агломераційної машини знаходиться в межах 0,45 – 0,55 і за рахунок утилізації тепла гарячого агломерату та рециркуляції теплоти відхідних газів може бути збільшений на 10-15%. Коефіцієнт використання палива агломераційною машиною становить 0,35 – 0,45 і також може бути підвищений на 20 - 25%.

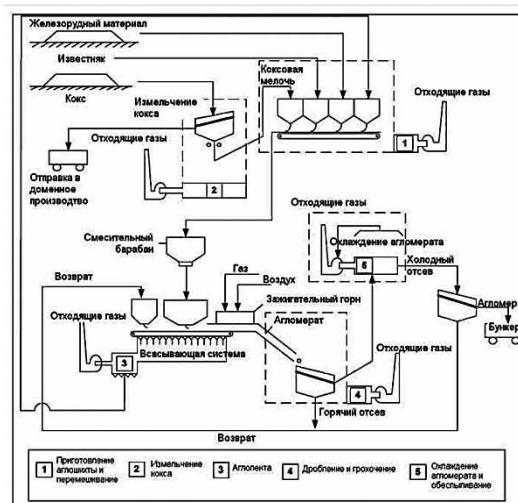


Рис. 1. Схема агломераційної фабрики з одною конвеєрною машиною

Теплові потреби процесу спікання забезпечуються на 94% за рахунок спалення твердого палива, що знаходиться в шихті, а 6% - за рахунок спалення газу. Прибуткова частина теплового балансу процесу агломерації включає тепло горнових газів при запаленні і додатковому нагріванні (6,2% від загального значення прибуткової частини теплового балансу), тепло від згорання палива шихти (80,9% від загального значення прибуткової частини теплового балансу) і сірки шихти (1,4%), окислення двовалентного заліза в тривалентне, процесів шлакоутворення [6]. Такого ж порядку значення теплового балансу процесів агломерації наводить автор роботи [7]. Витратна частина теплового балансу процесів агломерації враховує тепло шару агломерату (16,8% від загального значення витратної частини теплового балансу) або сировини, що повертається в процес (3,8% від загального значення витратної частини теплового балансу), газів, що відходять від вакуум-камер (46,7% від загального значення витратної частини теплового балансу), і пари (18,2% від загального значення витратної частини теплового балансу), прямого відновлення оксидів заліза. Крім того, витратна частина теплового балансу враховує втрати тепла агломераційною установкою і поверхнею шару агломерату в довкілля.

На забезпечення ендотермічних реакцій агломераційного процесу і охолодження агломерату витрачається 46% сумарної кількості тепла. Залишкові 54% можуть бути утилізованими у вигляді тепла технологічних газів та повітря охолодження. В [1] повідомляється про т.з. «систему селективної рециркуляції відпрацьованих газів», яка дозволить скоротити викиди газів, що відходять в агломераційному виробництві, майже на 50%. Це істотно знижує вплив на навколишнє середовище, а також витрати енергії. Максимальне зниження шкідливих викидів в ході агломерації досягається при використанні системи MEROS від Primetals Technologies. Однак, детальна інформація відсутня.

Крім того, треба враховувати те, що робота агломераційних установок призводить до виділення забруднюючих атмосферу речовин, таких як, оксиди азоту ( $\text{NO}_x$ ), оксиди сірки ( $\text{SO}_x$ ) і неметанові газоподібні органічні сполуки, які створюються в результаті горіння [8].

**Постановка задачі.** Задачею даної роботи є аналіз проблеми енергозбереження в технологічному процесі виробництва агломерату на гірничо-збагачувальних комбінатах і розробка конструктивних рішень, що забезпечують підвищення його техніко-економічних характеристик за рахунок використання технологічного тепла, що створюється в технологічному обладнанні.

**Викладення матеріалу та результати.** Потенційно для рекуперації тепла можливо використовувати два джерела агломераційного виробництва: 1) тепло газів, які засмоктуються ексгаустером через вакуум-камери при спіканні шихти; 2) тепло газів, які перекачуються димососом через шар агломерату при його охолодженні. При нормальних умовах експлуатації тепло, одержане при рекуперації, може бути використане в котлі-утилізаторі для нагрівання води для центрального опалення, підігрівання повітря, яке використовується в горні для запалення шихти, підігрівання шихти, в системі рециркуляції відпрацьованих газів. Для вирішення проблеми енергозбереження в гірничо-металургійному промисловому комплексі і підвищення техніко-економічних характеристик технологічного обладнання агломераційних фабрик гірничо-збагачувальних комбінатів шляхом використання технологічного тепла, яке створюється в технологічному обладнанні цікавим є рекуперація газів, що відходять від вакуум-камер, і пари, що разом складають 64,9% від загального значення витратної частини теплового балансу або 1050...1730 кДж/кг (250...412 ккал/кг).

З метою підвищення техніко-економічних характеристик, в т.ч. коефіцієнта корисної дії агломераційної конвеєрної машини для підігрівання шихти до 300-350° С до її запалювання, авторами пропонується система рекуперації технологічного тепла, яке створюється в процесі спікання шихти. Агломераційна конвеєрна машина за [9] працює таким чином (рис. 2). Змонтований на жорсткому каркасі 1 привод 2 рухає візки 4 із колосниковими ґратами 5 по напрямним 3 в напрямку розвантажувальної частини агломераційної конвеєрної машини. Призначена для спікання шихта за допомогою пристрою для завантаження 6 подається на колосникові ґрати 5 рухомих візків 4 і транспортується до розвантажувального кінця машини. Рух візків 4 по напрямним 3, розміщеним на жорсткому каркасі 1, здійснюється за допомогою привода 2. При переміщенні рухомих візків 4 в зону запалювального горна 21, верхній шар завантаженої на колосникові ґрати 5 шихти 7 підігрівається горілками горна 21 до температури 1200-1300° С. При цьому запалюється кокс, який знаходиться у складі шихти. Для підтримання процесу горіння палива в шарі шихти 7, завантаженої на колосникові ґрати 5 візків 4, за допомогою екса-

устера 10 через вакуум-камери 8, що з'єднуються з вакуум-колектором 9, просмоктується повітря Відсмоктані ексгаустером 10 відхідні газы після їх очищення викидаються в атмосферу. Зона горіння палива, що знаходиться у шихті 7, поступово переміщується з верхніх шарів в напрямку до колосникових ґрат 5. Швидкість руху візків 4 по напрямним 3 вибирається такою, щоб зона горіння палива наближалася до колосникових ґрат 5 поступово і досягла поверхні ґрат 5 над останньою вакуум-камерою 20. В результаті повного вигорання палива шихти 7 процес її спікання закінчується по всій висоті шару, а отже весь об'єм шихти перетворився в готовий продукт - агломерат. Отриманий агломерат розвантажується із колосникових ґрат 5 візків 4 агломераційної конвеєрної машини.

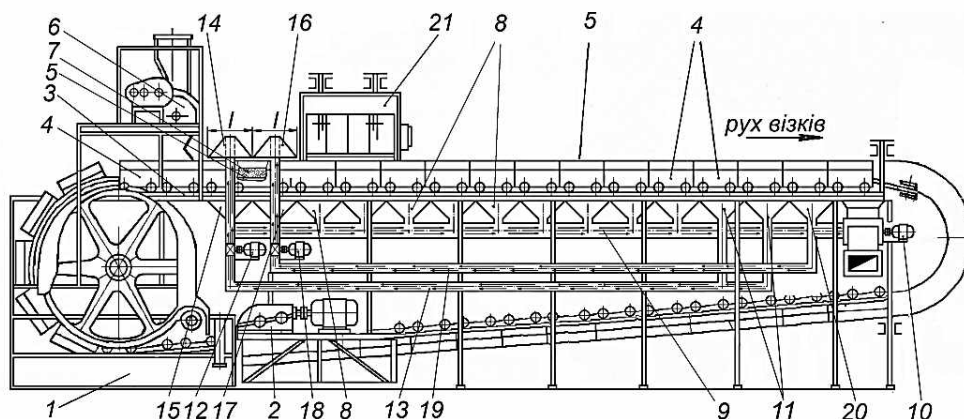


Рис. 2. Схема рекуперації технологічного тепла агломераційної конвеєрної машини. Патент №137964 Україна

Ексгаустер 10 просмоктує повітря через вакуум-камери 8, 11, 20 та через шар шихти 7, завантаженої на колосникові ґрати 5 візків 4, що рухаються в напрямку розвантажувальної частини агломераційної конвеєрної машини. Температура відхідних газів у вакуум-камерах 8, 11, 20 поступово підвищується і над останньою вакуум-камерою 7 досягає  $350^{\circ}\text{C}$ . Зазвичай відхідні газы технологічного процесу спікання через вакуум-камери 7, 11, 20 і вакуум-колектор 8 після їх очищення ексгаустером 10 видаляються в атмосферу. Шихта 7 до її запалювання горілками горня 21 підігривається за рахунок рекуперації технологічного тепла, яке створюється в процесі спікання шихти. Підігрівання шихти до її запалювання можливе до температури відхідних газів останньої вакуум-камери 7, яка досягає  $350^{\circ}\text{C}$  і проводиться в два етапи. На першому етапі відхідні газы з відокремлених від загального вакуум-колектора 9 вакуум-камер 11 вентилятором 12 через газопровід 13 подаються за допомогою камери 14 в шар завантаженої на колосникові ґрати 5 шихти 7. Вакуум-камери 11 розміщені поряд з вакуум-камерою 20, яка має максимальну температуру. Температура відхідних газів вакуум-камер 11 нижча від максимальної. Але теплоємність відхідних газів вакуум-камер 11 достатня для підігрівання всього об'єму шихти 7, завантаженої на колосникові ґрати 5 візків, до високої температури. Камера 14 установлена над відкритою частиною першої вакуум-камери 15 на відстані 0,05-0,2 висоти шару шихти 7 і виконана у вигляді чотиригранної зрізаної піраміди із відкритими верхньою та нижньою основами. Ширина нижньої відкритої основи камери 14 не перевищує ширини колосникових ґрат 5 візків 4, а довжина  $l$  дорівнює ширині відкритої частини першої вакуум-камери 15. На другому етапі підігрівання шихти 7 до її запалювання відхідні газы з відокремленої від загального вакуум-колектора 9 вакуум-камери 20 вентилятором 18 через газопровід 19 подаються за допомогою камери 16 в шар завантаженої на колосникові ґрати 5 шихти 7. Відхідні газы вакуум-камери 20 мають максимальну температуру, яка досягає  $350^{\circ}\text{C}$ . Теплоємність відхідних газів вакуум-камери 20 достатня для підігрівання всього об'єму шихти 7, завантаженої на колосникові ґрати 5, до максимально можливої температури, так як шихта попередньо підігріта на першому етапі підігрівання. Камера 16 установлена над відкритою частиною другої вакуум-камери 17 на відстані 0,05-0,2 висоти шару шихти 7 і виконана у вигляді чотиригранної зрізаної піраміди із відкритими верхньою та нижньою основами. Ширина нижньої відкритої основи камери 17 не перевищує ширини колосникових ґрат 5 візків 4, а довжина  $l$  дорівнює ширині відкритої частини другої вакуум-камери 17. Підігрів шихти перед її завантаженням забезпечує зростання продук-

тивності конвеєрної агломераційної машини. Причому зростання продуктивності агломераційної машини тим більше, чим вища температура шихти [10].

Порівняно з агломераційною конвеєрною машиною [9] агломераційна конвеєрна машина [11] додатково забезпечена другою камерою 16 для подавання відхідних газів в шар завантаженої на колосникові ґрати 5 шихти 7, яка має конструкцію, однакову з першою камерою 14 і розміщена над відкритою частиною другої вакуум-камери 17 на відстані 0,05-0,2 висоти шару шихти 7 і виконана у вигляді чотиригранної зрізаної піраміди із відкритими верхньою та нижньою основами. Ширина нижньої відкритої основи камери 14 не перевищує ширини колосникових ґрат 5 візків 4, а довжина  $l$  дорівнює ширині відкритої частини першої вакуум-камери 15. Відкрита верхня основа камери 17 забезпечена вентилятором 18 та з'єднана газопроводом 19 з герметичною ємністю вакуум-камери 20, відхідні гази якої мають максимальну температуру. Розміри площі нижньої основи додаткової камери 16 для подавання підігрітого повітря в шар шихти 7, так же як і в камери 14, обмежені конструктивними можливостями агломераційної конвеєрної машини. Запалювальний горн 21 зміщено по відношенню до першої вакуум-камери 15 в напрямку розвантажувальної частини машини. Відстань нижньої основи камер 15 та 17 від поверхні завантаженої на колосникові ґрати 5 шихти 7 вибрана за умови виконання вимог з виключення несприятливих підсосів атмосферного повітря в камери 15 та 17. Для різних типів агломераційних конвеєрних машин і для різної вихідної сировини висота шару шихти 7 на колосникових ґратах 5 складає 200-450 мм, а отже відстань нижньої основи камер 15 та 17 від шару завантаженої на колосникові ґрати 5 шихти 7 складає  $(200 \dots 450 \text{ мм}) \times (0,05 \dots 0,15) = 10 \dots 67,5 \text{ мм}$ .

Подальшим розвитком системи конструктивних рішень з проблеми рекуперації тепла технологічного процесу спікання залізорудної шихти є агломераційна конвеєрна машина за [12]. Метою пропонованої робочої моделі є підвищення коефіцієнту корисної дії агломераційної конвеєрної машини за рахунок рекуперації технологічного тепла, яке створюється в процесі спікання шихти, для підігрівання шихти до 300-350° С до її запалювання. Вказана мета досягається тим, що агломераційна конвеєрна машини містить жорсткий каркас, на якому змонтовано привод, напрямні, на яких установлені візки з колосниковими ґратами, пристрій для завантаження шихти з приводом, вакуум-камери, що з'єднані з вакуум-колектором, запалювальний горн, який зміщено по відношенню до першої вакуум-камери в напрямку розвантажувальної частини машини на відстань двох окремих вакуум-камер, відокремлених від загального вакуум-колектора, камеру для подавання відхідних газів в шар завантаженої на колосникові ґрати шихти, яка забезпечена вентилятором та газопроводом і установлена над відкритою частиною першої вакуум-камери на відстані 0,05-0,2 висоти шару шихти і виконана у вигляді чотиригранної зрізаної піраміди із відкритими верхньою та нижньою основами, причому ширина нижньої відкритої основи не перевищує ширини колосникових ґрат візків, а довжина - дорівнює ширині відкритої частини першої вакуум-камери. Агломераційна конвеєрна машина додатково забезпечена другою камерою для подавання відхідних газів в шар завантаженої на колосникові ґрати шихти, яка має конструкцію, однакову з першою камерою і розміщена над відкритою частиною другої вакуум-камери, причому відкрита верхня основа камери забезпечена вентилятором і з'єднана газопроводом з герметичною ємністю вакуум-камери, відхідні гази якої мають максимальну температуру, а відкрита верхня основа камери для подавання відхідних газів в шар завантаженої на колосникові ґрати шихти, яка установлена над відкритою частиною першої вакуум-камери, забезпечена вентилятором і з'єднана газопроводом з герметичними ємностями вакуум-камер, розміщених поряд з вакуум-камерою, відхідні гази якої мають максимальну температуру.

**Висновок та напрямок подальших досліджень.** Проведений аналіз проблеми енергозбереження в технологічному виробництві агломерату на гірничо-збагачувальних комбінатах дозволяє зробити висновок, що потенційно для рекуперації тепла можна використовувати два джерела агломераційного виробництва: 1) тепло газів, які засмоктуються екстаустером через вакуум-камери в процесі спікання шихти; 2) тепло газів, які перекачуються димососом через шар агломерату при його охолодженні. Тепло, одержане при рекуперації технологічної енергії, може бути використане для підвищення техніко-економічних характеристик обладнання агломераційних фабрик гірничо-збагачувальних комбінатів шляхом рекуперації тепла газів і пари вакуум-камер, що разом складає 64,9% від загального значення витратної частини теплового

балансу або 1050-1730 кДж/кг (250-412 ккал/кг). В результаті використання технологічного тепла, одержаного в процесі рекуперації тепла відхідних газів, забезпечується зростання продуктивності агломераційної конвеєрної машини. При підігріванні шихти до температури 300-350°С до її запалювання в горні досягається інтенсифікація процесу спікання та зростання коефіцієнта корисної дії. Крім того, при цьому досягається значна економія газу за рахунок використання технологічного тепла, одержаного в процесі рекуперації тепла відхідних газів.

### Список літератури

1. Аналитический обзор - ВЭР черной металлургии. URL: <https://metalspace.ru/production-science/ecology/813-analiticheskij-obzor-tehnologii-bref.html> (дата звернення: 26.02.2021).
2. Metalspace / Аналитический раздел. URL: <https://metalspace.ru/images/logo.png> (дата звернення: 26.02.2021).
3. Мных А.С. Исследование количества тепловыделения в слое агломерационной шихты // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2014. 6/5 (72).
4. Мных А.С. Исследование влияния фракционного состава агломерационной шихты на распределение химических компонентов слоя материала для условий комбината «Запорожсталь» // Теория и практика металлургии. 2014. № 3 (6). С. 35–38.
5. Каплун Л.И. Анализ процессов формирования агломерата и совершенствование технологии его производства. URL: <https://www.dissercat.com/content/analiz-protsssov-formirovaniya-aglomerata-i-sovershenstvovanie-tehnologii-ego-proizvodstva> (дата звернення: 26.02.2021).
6. Рязанцев А.П. Нагрев агломерационной шихты / А.П. Рязанцев. – М.: Металлургия, 1968. – 167 с.
7. Савицкая Л.И. Развитие агломерационного производства в странах западной Европы // Черная металлургия. Серия «Подготовка сырых материалов к металлургическому переделу». Обзорная информация. 1982. Выпуск 2. – М.: ЦНИ Черметинформации. – 24 с.
8. Джероуен Кузнен. Руководство по инвентаризации выбросов ЕМЕП/ЕАОС, 2013 // URL: [www.eea.europa.eu/tu/ds\\_resolveuid/8zxnftehr3](http://www.eea.europa.eu/tu/ds_resolveuid/8zxnftehr3). (дата звернення: 26.02.2021).
9. Патент №93303 Україна. МПК F27B 21/00 Агломераційна конвеєрна машина / Рудь Ю.С., Кучер В.Г.; Власник ДВНЗ «Криворізький національний університет». – у 2014 04257; заяв. 22.04.2014; опубл. 25.09.2014. – Бюл. № 18.
10. Крижевский А.З., Стольберг Е.Я., Кучер В.Г. Влияние предварительного подогрева шихты на производительность агломерационной установки // Автоматизация агломерационного и доменного производства. – Київ, Техніка, 1969. С. 68-70.
11. Патент №101724 Україна. МПК F27B 21/00 Агломераційна конвеєрна машина / Рудь Ю.С., Кучер В.Г.; Власник ДВНЗ «Криворізький національний університет». – у 2015 03382; заяв. 10.04.2015; опубл. 25.09.2015. – Бюл. № 18.
12. Патент №137964 Україна. МПК F27B 21/06 C22B 1/20 Агломераційна конвеєрна машина / Рудь Ю.С., Кучер В.Г., Білоножко В.Ю.; Власник ДВНЗ «Криворізький національний університет». – у 2019 04934; заяв. 10.05.2019; опубл. 11.1.2019. – Бюл. №21

УДК 628.517.2

М. В. ХУДИК, В. А. ШАПОВАЛОВ, О. Л. ШЕПЕЛЬ, кандидати техн. наук, доценти  
Криворізький національний університет

## ЗАСОБИ ЗНИЖЕННЯ ВИРОБНИЧОГО ШУМУ КОМПРЕСОРНИХ СТАНЦІЙ ШАХТ

**Мета.** Метою даної роботи є аналіз існуючих рішень при проектуванні компресорних станцій для зниження шумового навантаження, яке впливає на обслуговуючий компресори персонал. Робота відцентрових компресорів супроводжується утворенням та поширенням підвищеного рівня виробничого шуму високочастотного і тонального характеру. Для попередження поширення виробничого шуму у приміщеннях компресорних станцій, джерела його утворення можуть обладнуватись звукопоглинальними укрітнями, які виготовляються з різних матеріалів. Недосконалість монтажу звукопоглинальних укріттів або невірний підбір звукоізолюючого матеріалу призводить до зниження їх звукопоглинальної ефективності погіршуючи санітарно-гігієнічні умови праці працівників.

**Методи дослідження.** Використовувався аналіз та узагальнення літературних джерел, охоронних документів на винаходи та корисні моделі щодо типів та конструктивних рішень звукоізолюючих пристосувань для зниження рівня шумового навантаження.

**Наукова новизна.** Розглянуто можливості зниження шумового навантаження на обслуговуючий персонал при роботі відцентрових компресорів за рахунок використання різних звукопоглинальних матеріалів для монтажу звукопоглинальних укріттів та пристосувань.

**Практична значимість.** Проведений аналіз показав, що для забезпечення допустимих рівнів шумового наван-

таження у приміщеннях компресорних станцій і на території оточуючих житлових районів необхідно враховувати розташування житлових районів на стадії проектування компресорних станцій уникаючи розміщення системи скидання повітря у бік цих районів, проникання виробничого шуму із приміщення у приміщення при відкритих вікнах та дверях, додаткове шумове навантаження, яке виникає при роботі вентиляторів вентиляційних систем.

**Результати.** Проведені дослідження роботи відцентрових компресорів компресорних станцій шахт показали необхідність застосування вбудованих у привід збуджувальних систем або тиристорних перетворювачів замість окремих електромеханічних збудників, проведення дистанційного контролю вібрації підшипників для скорочення часу знаходження обслуговуючого персоналу біля компресорної установки, обладнання звукопоглинальних укриттів турбін, редукторів і муфт. Ці та інші заходи та засоби дозволять поліпшити санітарно-гігієнічні умови праці обслуговуючого персоналу компресорних станцій шахт.

**Ключові слова:** відцентровий компресор, компресорна станція, виробничий шум, звукопоглинальне укриття, звукоізоляційний матеріал, шумове навантаження.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-169-175

**Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями.** Відцентрові компресори різного виду і призначення широко використовуються в різних галузях промисловості України, зокрема на шахтах для отримання стисненого повітря, необхідного для ведення видобувних робіт.

Перевагами відцентрових компресорів перед іншими компресорами є компактність та мала маса, надійність та довговічність, рівномірність подача стисненого газу, можливість використання з високооборотними двигунами. Разом з тим, велика швидкість обертання, зменшення металоємності, складність забезпечення надійної динамічної зрівноваженості є одними з причин підвищеного рівня виробничого шуму при роботі відцентрових компресорів. За результатами вимірювань, проведених згідно з ДСН 3.3.6.037-99 [1], рівень шумового навантаження на обслуговуючий персонал компресорних станцій шахт Кривбасу сягає 103-106 дБ при нормованому значенні 80 дБ.

На території компресорної станції шахти виробничий шум створюється, головним чином, під час викиду повітря у атмосферу і його рівень перевищує нормовані значення на відстані до 15 м від системи скидання, оскільки швидкість витікання повітря при цьому сягає 100 м/с. Додатковим джерелом шумового навантаження є проникаючий шум від роботи компресора, особливо, при відкритих дверях і вікнах у теплий період року через низьку ефективність системи вентиляції.

У приміщенні компресорної станції шумове навантаження створюється внаслідок сумарної генерації виробничого шуму при роботі повітроохолоджувачів, редукторів, турбін та збудників.

Постійний вплив інтенсивного шумового навантаження вище 80 дБ викликає у людини порушення функцій слухового нерву різного ступеня складності, що при медичному огляді виявляється у зниженні слуху до сприйняття шепітної мови та втраті гостроти слуху, а також порушення роботи інших органів і систем, що проявляється у зміні функціонування центральної нервової системи (виникають апатія, ослаблення пам'яті, дратівливість), системи травлення (виникають зміни секреторної й моторної функції шлунково-кишкового тракту), порушення обмінних процесів [2, 3].

Захист обслуговуючого персоналу компресорних станцій шахт від шумового навантаження регламентується ДБН В.1.1-31:2013 [4].

**Аналіз досліджень і публікацій.** Питанню боротьби з виробничим шумом, що генерується при роботі різного технологічного обладнання і, зокрема, компресорів, присвячено роботи ряду вітчизняних та закордонних авторів В.Д. Афанасьєва, А.А. Животовського, М.І. Швидкого, Е.Я. Юдіна, В.І. Заборова, Г.А. Хорошева, О.В. Калмикова, Л.Ф. Журбинського, Ю.Л. Кузнецова, Р.Д. Байнза, Т.П. Брамера, Дж. Д. Вебба та багатьох інших [5-12].

Як засоби боротьби з виробничим шумом різні автори рекомендують різноманітні звукопоглинаючі матеріали: мінеральну вату [5], керамзит різної крупності [7], склотканину [9], склопластики з епоксидною зв'язувальною речовиною [10, 11] та ін.

**Постановка задачі.** До теперішнього часу не вирішене питання зниження рівня виробничого шуму відцентрових компресорів у джерелі його утворення і тому першочерговою задачею є розробка засобів зниження шумового навантаження при експлуатації відцентрових компресо-

рів і при проектування компресорних станцій шахт для покращення санітарно-гігієнічних умов праці обслуговуючого персоналу.

**Викладення матеріалу та результати.** Для зниження шумового навантаження на обслуговуючий персонал компресорних станцій шахт слід передбачати:

для зниження рівня виробничого шуму від місця викиду повітря – зменшення швидкості витікання повітря та застосування глушників шуму, вбудованих у повітропровід системи скидання;

для зниження проникаючого шуму з приміщення компресорів – підвищення звукоізоляції вікон та дверей, підвищення ефективності вентиляційної системи для запобігання відкриванню вікон та дверей у теплий період року;

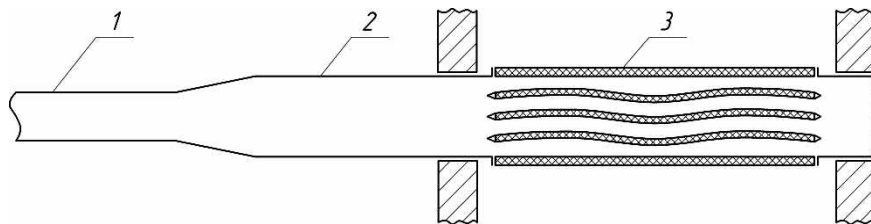
для зниження шумового навантаження при роботі відцентрового компресора - застосування звукоізолюючих панелей для огороження повітроохолоджувачів, компресора та редуктора, застосування тиристорних перетворювачів або збудників закритого виконання, застосування звукопоглинаючих покриттів повітропроводів, застосування глушників та віброізоляторів при роботі вентиляторів.

Для ефективного зниження рівня виробничого шуму від місця викиду повітря необхідно зменшити швидкість витікання повітря до 40 м/с, що дозволить використати глушник шуму активного типу. Це можливо досягти за рахунок використання спеціального колектора, який повинен бути у 1,5-1,6 рази більше відвідного повітропроводу, що дозволить знизити рівень шумового навантаження на

$$\Delta L = 60 \lg \frac{V_0}{V_{рек.}} \approx 18-24 \text{ дБ},$$

де  $V_0$  – фактична швидкість витікання, м/с;  $V_{рек.}$  – рекомендована швидкість витікання, м/с.

Для подальшого зниження рівня шумового навантаження слід використовувати глушник шуму активного типу, який вбудовується у систему скидання повітря в атмосферу (рис. 1).



**Рис. 1.** Система скидання повітря в атмосферу: 1 – відвідний повітропровід; 2 – колектор; 3 – глушник шуму

Ефективність роботи глушника шуму забезпечується дотриманням ряду вимог:

переріз глушника повинен бути не менше перерізу колектора (не менше 0,3 м<sup>2</sup>);

довжина глушника повинна бути не менше 1,5-2 м;

кількість пластин зі звукопоглинального матеріалу, з урахуванням звукопоглинального облицювання стінок глушника повинна бути не менше 5 шт.;

товщина пластин у залежності від матеріалу приймається у межах 60-80 мм;

відстань між пластинами не повинна перевищувати 150 мм;

пластини з обох сторін повинні мати обтічники;

як звукопоглинальний матеріал можуть використовуватись плити ПП-80, СТВ, ВТ-4 та ін.;

для попередження виносу звукопоглинального матеріалу його необхідно помістити у подвійні чохла з нетканої тканини або склотканини типу Е-0,1;

пластини та внутрішні стінки глушника виготовляються з перфорованої листової сталі товщиною до 2 мм з коефіцієнтом перфорації не більше 0,3 (перфорація виконується отворами діаметром до 6 мм з кроком не більше 10 мм) або сітки з вічками 10-20 мм і товщиною проволоти до 3 мм;

товщина стінок корпусу глушника приймається із умови забезпечення стійкості повітря і необхідної тривалості експлуатації;

конструкція глушника повинна виконуватись розбірною для забезпечення періодичного огляду і заміни зношених пластин;

для попередження потрапляння сторонніх предметів до системи скидання повітря необхідно на виході встановити сітку.

Розрахункова ефективність глушника з вищевказаними параметрами наведена на рис. 2.

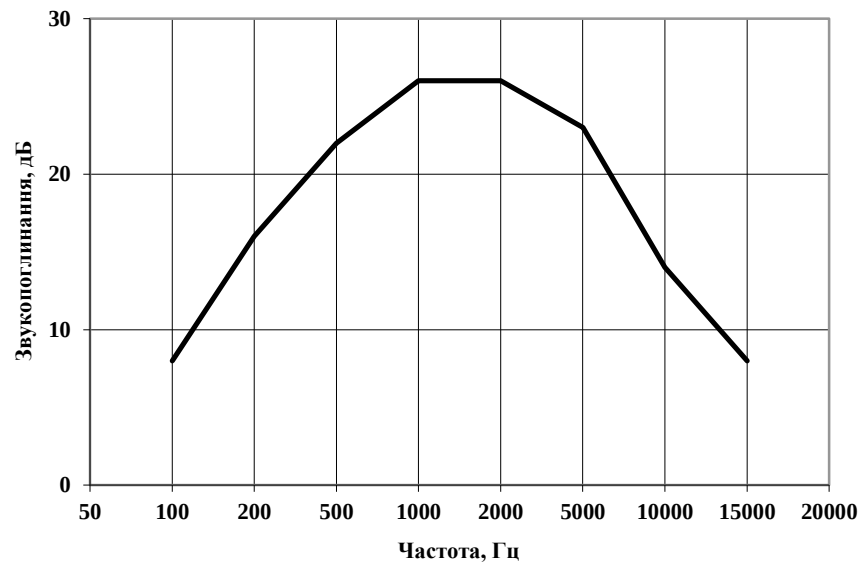


Рис. 2. Розрахункова ефективність глушника шуму

Отже сумарне зниження шумового навантаження від встановлення колектора та глушника становитиме не менше 38-44 дБ, що дозволить досягти рівня виробничого шуму на території компресорної станції нижче 80 дБ.

Для провітрювання приміщень компресорних станцій шахт переважно використовуються відцентрові вентилятори Ц 4-70, рівень шумового навантаження яких перевищує нормовані значення не більше, ніж на 5 дБ. Для зниження рівня виробничого шуму, що генерується при роботі вентиляторів та їх двигунів, доцільно встановлювати вентилятори у звукоізованих камерах на віброізоляційних основах та обладнати вставки з еластичних матеріалів між вентиляторами та повітропроводами.

Для зниження шумового навантаження від компресорів та редукторів застосовують звукопоглинальні укриття з жорстких матеріалів або комбіновані з використанням жорстких та м'яких матеріалів.

До переваг звукопоглинальних укриттів з жорстких матеріалів відносять простоту виготовлення, довговічність, надійність в експлуатації, простоту монтажу та демонтажу, можливість забезпечення ефективної вентиляції компресорної установки. Недоліком таких укриттів є підвищення рівня шуму в середині укриття, яке може сягати 15 дБ у широкому діапазоні частот, а також вплив структурних вібрацій перекриттів і фундаментів.

Широке використання знайшли комбіновані укриття, у яких жорсткі елементи сприяють підвищенню звукоізоляції, а м'які – можуть виконувати декілька функцій:

- дозволяють знизити рівень виробничого шуму всередині укриття на 6 дБ;
- забезпечують віброізоляцію укриття;
- дозволяють підвищити звукоізоляцію окремих елементів укриття;
- дозволяють підвищити герметичність укриття.

Звукопоглинальне укриття виготовляється з листової сталі товщиною до 3 мм і повинне перекривати зону від підшипника двигуна до підшипника турбіни. Укриття виконується з окремих секцій, які монтуються між собою при підготовці укриття до установки. По периметру обпирання на фундаменти компресорної установки та редуктора укриття обладнується віброізолюючими елементами. У зоні стикування з низько оборотною муфтою на укритті встановлюються знімні елементи з м'якої гуми, які встановлюються і припасовуються на місці. Бічні стінки елементів укриття покриваються звукопоглинальними матеріалами, які розміщують чохлах з нетканої тканини або склотканини і закріплюють за допомогою сітки.

Звукопоглинальне укріття обладнується трьома дверима, які дозволяють виконувати візуальний огляд стану підшипників і здійснювати контроль за можливими витіканнями мастила, а також забезпечують можливість видалення ємностей з мастилом. Двері обов'язково обладнуються ущільненнями по периметру та двома клиновими запорами.

Розміри звукопоглинального укріття підібрані таким чином, щоб унеможливити потрапляння обслуговуючого персоналу у його середину.

Забезпечення нормального режиму експлуатації компресорної установки зі звукопоглинальним укріттям досягається шляхом використання систем дистанційного контролю температури, тиску, вібрації підшипників компресора і редуктора та обладнання ефективної системи вентиляції, яка дозволяє підтримувати температуру редуктора не вище 45 °С.

Вентиляційні канали для підводу та відведення повітря з-під укріття повинні проходити у нижній частині компресорної установки і виходити у зону максимальної температури компресора, яка знаходиться між першим та другим ступенем стиснення повітря.

Експериментальні дослідження показали, що для дотримання допустимої температури всередині звукопоглинального укріття необхідно підтримувати витрату повітря на рівні 2000-3000 м<sup>3</sup>/год. при температурі навколишнього середовища до 15 °С і до 8000 м<sup>3</sup>/год. при температурі вище 20 °С.

Конструкція звукопоглинального укріття повинна передбачати можливість установки додаткового вентилятора над редуктором для підвищення ефективності вентиляції укріття. В укрітті передбачається освітлення і пульт для підключення допоміжного вентилятора, змонтовані на окремих стійках, не пов'язаних з укріттям. Корпус укріття обов'язково заземлюється.

Елементи звукоізоляції звукопоглинального укріття повітроохолоджувачів виконують з листової сталі товщиною до 3 мм. Для ізоляції укріття і попередження впливу виробничих вібрацій, які можуть передаватись від фундаменту компресорної установки, його стаціонарні частини обладнуються віброізолюючими та ущільнюючими елементами. Знімні частини укріття повітроохолоджувачів або двері, які встановлюють напроти пучків повітроохолоджувачів обладнуються ущільнювачами з м'якої гуми по периметру їх примикання до рам і віброізолюючими елементами підвісок.

За можливості передбачається можливість підведення повітря у зону повітроохолоджувача з підвального приміщення.

Для зниження шумового навантаження від проміжних патрубків, повітроохолоджувачів і повітропроводів, їх поверхні покриваються багат шаровими звукоізолюючими покриттями, які можуть складатись з:

- шару мінеральної або скловати товщиною до 60 мм, який закріплюється за допомогою сітки;
- шару мінерально-цементного покриття товщиною до 15 мм, в якому закріплюються віброізолюючі прокладки з пароізолу або м'якої гуми діаметром 20 мм;
- зовнішнього покриття з листової сталі товщиною до 1,2 мм, яке спирається на віброізолюючі прокладки.

Зниження шумового навантаження, яке генерується корпусом зворотного клапана, він розташовується в середині екрануючої оболонки, яка виготовляється з листової сталі товщиною до 3 мм та покривається звукоізолюючим матеріалом усередині. Оболонка складається з кришки, яка встановлюється за допомогою звукоізолюючих прокладок на повітропроводи, стаціонарних торцевих стінок та знімних бокових стінок. Конструкція екрануючої оболонки дозволяє виконання ремонтних робіт із заміни прокладок клапана.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Для забезпечення допустимого рівня шумового навантаження на обслуговуючий персонал у приміщеннях компресорних станцій шахт і на територіях поблизу них необхідно дотримуватись певних вимог:

враховувати розташування житлових районів поблизу місця будівництва компресорної станції на стадії її проектування. При цьому передбачається розташування системи скидання повітря в атмосферу у протилежну від житлових районів сторону. Зниження рівня виробничого шуму при скиданні повітря можливо досягти за рахунок використання спеціального колектора,

який повинен бути у 1,5-1,6 рази більше відвідного повітропроводу, що дозволить зменшити швидкість витікання повітря до 40 м/с і використати глушник шуму активного типу. Сумарне зниження шумового навантаження від встановлення колектора та глушника становитиме не менше 38-44 дБ;

враховувати проникання виробничого шуму із приміщення у приміщення при відкритих вікнах та дверях компресорної станції. Тому приміщення компресорної станції повинні обладнуватись ефективною вентиляцією, яка дозволить виключити необхідність відкривання вікон та дверей у теплий період року, особливо зі сторони системи скидання повітря;

враховувати рівні шумового та вібраційного навантаження, які генеруються вентиляторами систем вентиляції. Тому їх необхідно розмішувати у звукоізованих камерах на віброізованих основах;

застосовувати замість окремих електромеханічних збудників вбудовані у привід збуджувальні системи або тиристорні перетворювачі;

застосовувати дистанційний контроль температури, тиску, вібрації підшипників компресора і редуктора;

застосовувати звукопоглинаючі укриття компресорної установки, повітроохолоджувачів, а також звукоізовуючі та екрануючі покриття на повітропроводах, проміжних патрубках та ін.

### Список літератури

1. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку : ДСН 3.3.6.037-99. – Чинний від 1999-12-01. – К.: МОЗ України, 1999. – 34 с. – (Державні санітарні норми).
2. Sokas RK., Moussa MA., Gomes J. and others. Noise-induced hearing loss and blood pressure // Am-J-Ind-Med. – 1995. – № 28 (2). – С. 175.
3. Melamed S., Froom P., Kristal-Boneh E., Gofer D., Ribak J. Industrial noise exposure, noise annoyance, and serum lipid levels in blue-collar-workers the CORDIS Study // Arch Environ Health. – 1997. – № 52(4). – С. 23-24.
4. Захист територій, будинків і споруд від шуму : ДБН В.1.1-31:2013. – Чинний від 2014-06-01. – К.: Мінрегіон України, 2014. – 75 с. – (Державні будівельні норми).
5. Животовский А.А., Афанасьев В.Д. Защита от вибраций и шума на предприятиях горнорудной промышленности. – М.: Недра. – 1982. – 183 с.
6. Борьба с шумом на производстве: справочник / под общ. ред. Е.Я. Юдина. - М.: Машиностроение, 1985. - 400 с.
7. Швидкий М.І. Засоби зниження шуму на територіях вентиляційних установок головного провітрювання шахт / М.І. Швидкий, В.Д. Афанасьєв, Н.О. Раченко, А.М. Страсбургер // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. пр. – Кривий Ріг: КНУ. – 2016. – Вип. 43. – С. 119-122.
8. Кузнецов Ю.Л. Компрессорная техника на уровне мировых стандартов / Ю.Л. Кузнецов, А.Л. Аникин // Компрессорная техника и пневматика. – Москва, 2016. – № 4 – С. 5-11.
9. Сніцарук Г.В., Мартиненко А.П. Борьба с шумом систем вентиляции і кондиціонування повітря. / Наукові записки. – Вип. 13. – Кіровоград: КНТУ, 2013. – С. 249-253.
10. Білим П.А. Зниження шуму у компресорних станціях за рахунок застосування шумоізовуючих армованих матеріалів. / П.А. Білим, Е.Е. Еприкян, В.В. Живодьоров, А.М. Картавцева // Проблеми та перспективи розвитку охорони праці: Матеріали IX Всеукраїнської науково-практичної конференції курсантів, студентів, аспірантів та ад'юнктів – Л.: ЛДУ БЖД, 2019. – С. 57-58.
11. Патент на винахід № 118310 Україна, МПК (2018.01) B82Y 35/00, C08L 63/00, C08K 5/18 (2006.01), C08K 5/372 (2006.01), C08G 59/42 (2006.01), C08G 59/72 (2006.01). Наномодифіковане епоксидне зв'язуюче для композиційних матеріалів / П.А. Білим, К.П. Білим, А.В. Домбровська, І.І. Килимник, М.В. Хворост; заявник і власник Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова – № а201706132; заявл. 19.06.2017; опубл. 26.12.2018, Бюл. № 24.
12. Байнз Р.Д., Брамер Т.П., Бренчли Ф.Д. и др. Контроль шума в промышленности. Предупреждение, снижение и контроль промышленного шума в Англии. / Под ред. Дж. Д. Вебба; пер. с англ. под ред. И.И. Боголепова. – Ленинград: Судостроение, 1981. – 312 с.

УДК 621.311.1

І.А. КОЗАКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., М.Г. КОТЯКОВА, асп.  
Криворізький національний університет

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Мета** роботи полягає у розробці системи керування інверторами джерел розосередженої генерації з мінімізацією гармонічних викривлень вихідної напруги. Даний напрямок є актуальним у зв'язку з бурхливим розвитком джерел відновлювальної енергії, а також потенційним їх впливом на зниження якості електричної енергії.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи теорії автоматичного керування при аналізі динамічної системи відновлювального джерела енергії – інвертор – фільтр – мережа та розробки регуляторів системи керування, методи математичного моделювання для аналізу процесів у електроенергетичній системі з відновлювальними джерелами енергії, методи теоретичних основ електротехніки для аналізу складових активної та реактивної потужності, що циркулює між джерелом енергії та мережею централізованого електропостачання.

**Наукова новизна.** Розроблено принцип функціонування систем інтеграції відновлювальних джерел енергії до мереж електропостачання з мінімізацією впливу на показники якості електричної енергії. В основі розробленого принципу – двоконтурна система керування, яка містить зовнішній контур керування величинами вихідної напруги та частоти інвертора, а внутрішній контур – керування складовими вектору мережевого струму.

**Практична значимість.** Розроблена система керування може знаходити практичне втілення у системах інтеграції відновлювальних джерел енергії, а також в системах поліпшення якості електричної енергії.

**Результати.** Розглянуто принципи формування систем керування мережевими інверторами задля мінімізації їх впливу на якість електричної енергії в мережі. Розглянуто аналітичні залежності, що описують динамічну систему відновлювального джерела енергії – інвертор – фільтр – мережа змінного струму та складено модель у просторі станів, що може бути основою для синтезу системи керування. Запропоновано внутрішню систему керування струмом реалізовувати з використанням Н $\infty$ -регуляторів, а зовнішню систему керування величинами амплітуди та частоти вихідної напруги – з використанням методу статизму.

**Ключові слова:** відновлювальні джерела енергії, якість електричної енергії, гармонічні складові, закон статизму, коефіцієнт загального гармонічного спотворення.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-175-179

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.** Під терміном «якість електричної енергії» розуміють низку електричних показників електропостачання, які можуть впливати на коректну роботу електротехнічного та електромеханічного устаткування. Цей термін описує електричну енергію, що живить навантаження, при цьому недотримання необхідних показників якості може призвести до некоректної роботи навантаження, його відключення або навіть виходу з ладу. Незважаючи на те, що термін «якість електричної енергії» відноситься до цілого ряду показників, проте найчастіше його відносять до якості живлячої напруги, оскільки в традиційних електроенергетичних системах у якості джерел живлення виступають джерела напруги, а форми струмів визначаються характеристиками навантаження. Низька якість електричної енергії може бути відображена у вигляді різних показників, таких як коливання амплітуди та частоти, перехідні процеси, вміст гармонік у формі сигналів, коефіцієнт потужності, несиметрія фаз, неперервність потужності і т.д. Низька якість електричної енергії може виникати за різних причин, наприклад, через вплив нелінійних навантажень. Оскільки електроенергетична система є взаємопов'язаною, то зниження показників якості в одній точці мережі може призводити до зниження показників якості в інших частинах мережі. Важливим етапом розвитку систем електропостачання в даний час є перехід від централізованих моделей до систем з розподіленою генерацією з інтеграцією до мережі відновлювальних джерел енергії, що базуються на використанні енергії сонця, вітру, води і т.д. При цьому такі мікромережі можуть або працювати ізольовано від централізованого електропостачання, або підключатися до нього. При цьому основним елементом, що забезпечує взаємодію джерел розподіленої генерації та мережі є інвертори, робота яких через ключовий режим роботи напівпровідникових елементів пов'язана з виникнення гармонічних складових напруги, що і призводить до необхідності аналізу питання якості електричної енергії в мережах з розподіленою генерацією. При цьому важливо врахувати аспект того, що джерелами гармонік в таких мережах є не лише інвертори джерел розподіленої генерації, а й інші навантаження. Значна кількість споживачів електричної

енергії можуть розглядатися як нелінійні навантаження, оскільки містять в своєму складі напі-  
впровідникові перетворювачі, що призводять до створення гармонічних струмів навіть при  
живленні від чисто синусоїдальної напруги. Ці гармонічні струми протікають через опори роз-  
подільчої мережі, включаючи внутрішні опори джерела енергії, і викликають виникнення гар-  
монічних складових напруги. В подальшому гармоніки напруги призводять до виникнення гар-  
монік струму навіть в лінійних навантаженнях. Таким чином, діючі вітчизняні та міжнародні  
стандарти якості електричної енергії накладають обмеження як на рівень індивідуальних гар-  
монічних складових, так і на загальні показники гармонічного забруднення, такі як коефіцієнт  
загального гармонічного спотворення (THD). Отже, системи керування інверторами джерел  
розподіленої генерації повинні мати можливості усунення або мінімізації гармонічних складо-  
вих для виконання вимог стандартів та зменшення втрат енергії.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У літературі розглядається цілий ряд замкнених систем  
керування, що дозволяють знизити гармонічне спотворення сигналів інверторами джерел роз-  
поділеної генерації [1-10]. Завданням таких систем є наближення вихідної напруги інвертора до  
синусоїдального сигналу завдання з усуненням інших гармонічних складових. У [6] розгляда-  
ються аперіодичні цифрові (deadbeat) регулятори для керування інверторами. У [7] виконано  
аналіз системи керування з використанням гістерезисного керування. Значна увага дослідників  
присвячена системам повторюваного (repetitive) керування мережевими інверторами [8], що  
використовують прості навчальні методи, які дозволяють усунути періодичні похибки у дина-  
мічних системах з використанням внутрішньої моделі. Перевагою такого підходу є те, що при  
цьому може враховуватися велика кількість гармонічних складових, забезпечуючи низькі пока-  
зники коефіцієнту загального гармонічного спотворення. Недоліком такого підходу є необхід-  
ність проведення значного обсягу експериментальних досліджень для визначення задаючих  
сигналів гармонік.

Окрім того, важливою складовою аналізу способів поліпшення якості електричної енергії є  
з'ясування причин їх погіршення. Як відомо, величина вихідного опору інвертора відіграє ви-  
рішальну роль у зменшенні коефіцієнту загального гармонічного спотворення напруги. Тому  
доцільним є розглянути підходи до зниження цього коефіцієнту шляхом зниження величини  
вихідного опору. Якщо розглядати питання якості електричної енергії у контексті коефіцієнту  
загального гармонічного спотворення струму, то актуальним напрямком розвитку даного пи-  
тання є розвиток структур силових активних фільтрів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є аналіз підходів до розробки систем керування ме-  
режевими інверторами джерел розосередженої генерації та вивчення принципів функціонуван-  
ня систем керування, що дозволяють покращити показники якості електричної енергії. Для до-  
сягнення поставленої мети сформульовано та вирішено наступні завдання: аналіз схемних рі-  
шень систем інтеграції джерел відновлювальної енергетики; дослідження аналітичних залежно-  
стей, що описують процеси у системі інвертор – фільтр – мережа, отримання рівнянь динаміч-  
ної системи у просторі станів; структурний та параметричний синтез системи керування; дослі-  
дження поведінки розробленої системи за допомогою математичної моделі.

**Викладення матеріалу та результати.** Метою синтезу регуляторів струму системи керу-  
вання мережевим інвертором є забезпечення вихідного струму інвертора з мінімальним вмістом  
гармонік за умови простої реалізації синхронізації з мережею. При використанні трифазної  
системи відліку  $abc$  окремі регулятори струму застосовуються для кожної фази. При цьому  
сигнал завдання мережевого струму  $i^*$  отримується з сигналів завдання струму по осям  $d$  та  $q$   
( $I_d^*$  та  $I_q^*$ ) шляхом координатних перетворень. Для отримання фазової інформації щодо вектору  
струму мережевої напруги є можливим застосувати блок фазового автопідлаштування частоти.  
Таким чином, за належної синхронізації вектору напруги мережі та системи координат  $dq$ , що  
обертається, складові вектору струму завдання  $I_d^*$  та  $I_q^*$  будуть впливати на обмін активною та  
реактивною потужністю між мережею та інвертором. За умови, що поточний режим роботи  
системи не передбачає передачу енергії від інвертора до мережі або в зворотній бік, то сигнали  
завдання складових струмів  $I_d^*$  та  $I_q^*$  мають бути встановлені рівними нулю, а для відсутності  
енергообміну вихідна напруга інвертора повинна дорівнювати напрузі в мережі. Для досягнен-  
ня цього необхідно до вихідних сигналів регуляторів струму додати виміряні значення напруги  
в мережі, що можуть бути додатково відфільтровані.

Для подальшого синтезу систем керування розглянемо однофазну заступну схему об'єкту керування «інвертор – фільтр – мережа змінного струму» (рис. 1). Об'єкт керування містить інвертор, LC-фільтр, сформований індуктивністю  $L_f$  та  $C_f$ , а також активний опір  $R_g$  та індуктивність мережі  $L_g$ .

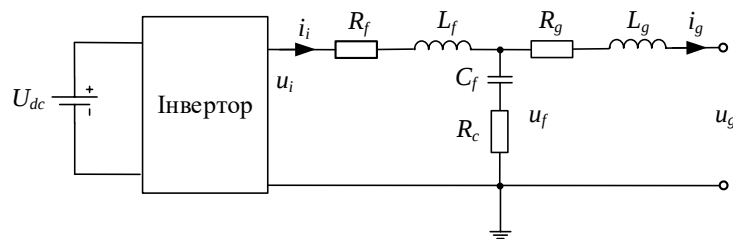


Рис. 1. Однофазна заступна схема об'єкту керування «інвертор – фільтр – мережа змінного струму»

Струми у двох індуктивних гілках, а також напруга на конденсаторі можуть розглядатися у якості змінних стану, напруга мережі та струм завдання у якості вхідних сигналів, а сигнал завдання напруги інвертора – у якості керуючої змінної

$$x = [i_i \ i_g \ u_f]^T; \quad (1)$$

$$w = [u_g \ i^*]^T. \quad (2)$$

У якості вихідного сигналу об'єкту керування можна розглядати похибку керування величини струму, тобто різницю між заданим значенням струму  $i^*$  та реальним значенням струму, що протікає від інвертора до мережі

$$e = i^* - i_g. \quad (3)$$

Тоді об'єкт керування у просторі станів можна описати наступними рівняннями

$$\frac{dx}{dt} = Ax + B_1 w + B_2 u; \quad (4)$$

$$y = C_1 x + D_1 w + D_2 u; \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_f+R_c}{L_f} & \frac{R_c}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{R_c}{L_g} & -\frac{R_g+R_c}{L_g} & \frac{1}{L_g} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ -\frac{1}{L_g} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$C_1 = [0 \ -1 \ 0]; \quad (8)$$

$$D_1 = [0 \ 1]; \quad D_2 = 0. \quad (9)$$

Оскільки система керування мережевим інвертором повинна забезпечити стійкість в умовах невизначеності параметрів опору мережі, то доцільно в контурі керування струмом застосувати  $H_\infty$ -регулятор. Задачею його функціонування буде мінімізації похибки керування та отримання низьких показників коефіцієнту загального гармонічного викривлення струму мережі за умови зміни величини опору мережі у широких змінах. Відповідні параметри такого регулятора були отримані за допомогою функції середовища Matlab hinfscn.

На вищому рівні системи керування застосовувався метод статизму, що дозволяє керувати потужністю, яка передається кожним з інверторів мережі, за допомогою впливу на величини частоти та амплітуди вихідної напруги. Така концепція наслідуює властивості аналогічних систем, що використовуються в мережах з потужними синхронними генераторами, що мають значні моменти інерції, та дозволяють їм працювати паралельно, розподіляючи навантаження шляхом зменшення частоти при збільшенні активної потужності в мережі. Проте, на відміну від систем з синхронними генераторами, інвертори джерел розосередженої генерації не мають таких значних інерційних властивостей, що забезпечують стійкість системи під час виконання синхронізації. В той же час, система керування забезпечує гнучке керування динамічними процесами, демонструючи високу швидкодію. Тому для підвищення стійкості

мережі та узгодження джерел живлення, які працюють паралельно, інерційні властивості синхронного генератора відтворюються за допомогою законів статизму, регулюючи амплітуду та частоту напруги пропорційно до складових активної та реактивної потужності.

Основні залежності, що описують керування інверторами при використанні закону статизма, мають вигляд

$$\omega_k = \omega_{nom} - m_k P_k; \quad (10)$$

$$U_k = U_{nom} - n_k Q_k, \quad (11)$$

де  $\omega_k$  – кутова частота  $k$ -го інвертора, що змінюється в залежності від виміряного значення його активної потужності  $P_k$ ;  $\omega_{nom}$  – номінальне значення кутової частоти в мережі;  $m_k$  – коефіцієнт, що формує закон статизму для активної потужності;  $U_k$  – амплітуда вихідної напруги  $k$ -го інвертора, що змінюється в залежності від виміряного значення його реактивної потужності  $Q_k$ ;  $n_k$  – коефіцієнт, що формує закон статизму для реактивної потужності.

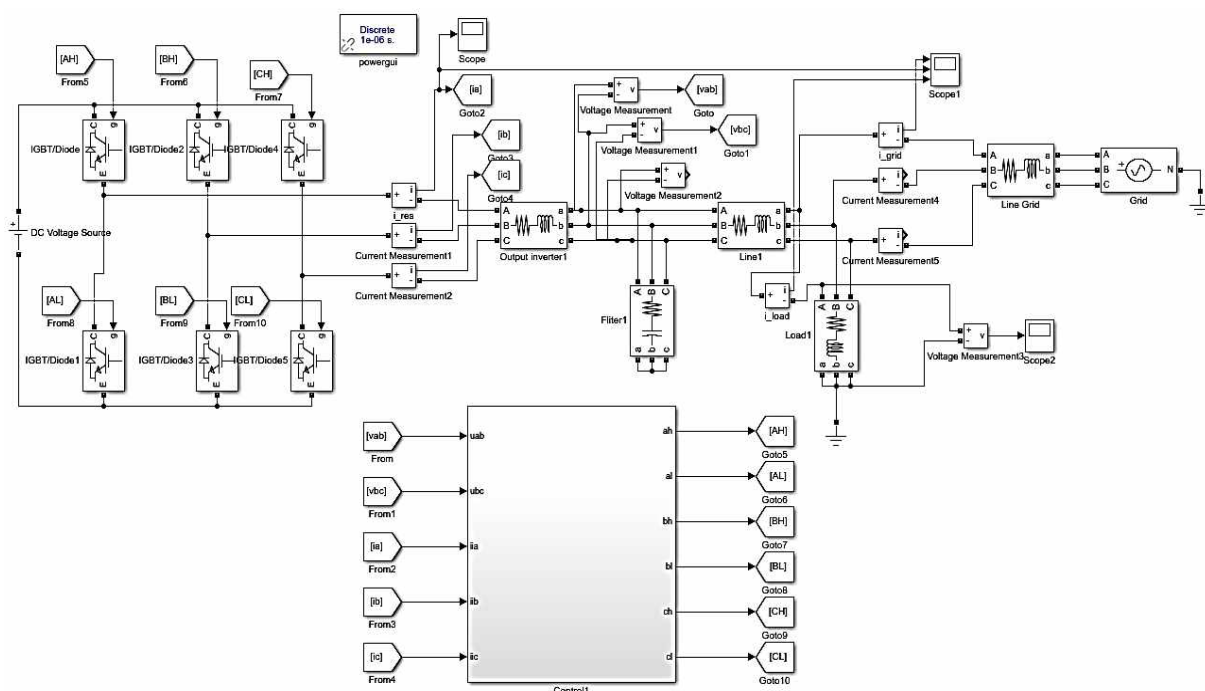
Величина частоти напруги є спільною змінною стану усієї мережі, що означає однаковість її значення для усіх мережевих перетворювачів у статичному режимі роботи, що призводить до рівномірного розподілу між ними активної потужності, коли коефіцієнти статизму  $m_k$  є постійними та однаковими для усіх інверторів. Таким чином

$$m_1 P_1 = m_2 P_1. \quad (12)$$

Величина амплітуди напруги не є спільною змінною стану усієї мережі, оскільки її значення у різних вузлах схеми може відрізнятися, а тому навіть за однакових величин коефіцієнтів  $n_k$  ідеального розподілу реактивної потужності неможливо досягти. Це підтверджується наступною залежністю

$$n_1 Q_1 + U_1 = m_2 Q_1 + U_2. \quad (13)$$

З метою дослідження процесів впливу джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії було розроблено математичну модель у середовищі Matlab/Simulink, що наведена на рис. 2. Параметри інвертора, що використовувалися під час дослідження, наведені у табл. 1.

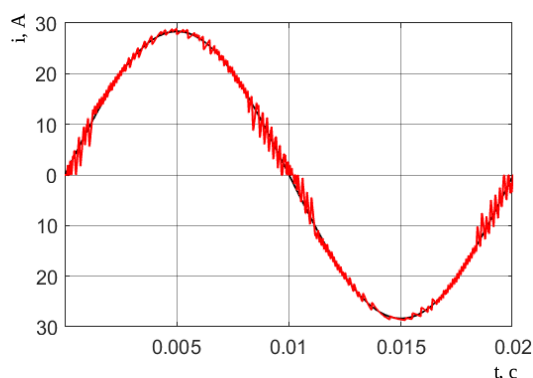


**Рис. 2.** Структура математичної моделі для дослідження впливу джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії

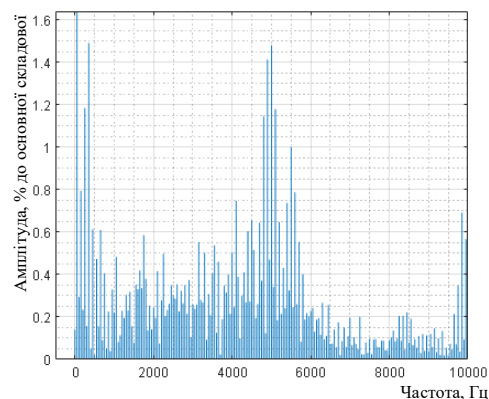
З отриманих результатів (рис. 3) видно, що форма мережевого струму є досить близькою до синусоїдальної, помітні гармонічні викривлення, що викликані роботою інвертора. Порівняння даної системи з традиційною з використанням релейних регуляторів струму показало, що рівень гармонічних викривлень вихідного струму є помітно нижчим, що виправдовує використання запропонованих рішень.

Параметри мережевого інвертора джерела розосередженої генерації

| Найменування параметру             | Значення параметру |
|------------------------------------|--------------------|
| Частота комутації ключів інвертора | 10 кГц             |
| Індуктивність фільтру $L_f$        | 0.2 мГн            |
| Активний опір фільтру $R_f$        | 0.06 Ом            |
| Ємність фільтру $C_f$              | 15 мкФ             |
| Активний опір мережі $R_g$         | 0.15 Ом            |
| Індуктивність мережі $L_g$         | 0.5 мГн            |
| Активний опір $R_c$                | 1.5 Ом             |



а)



б)

Рис. 3. Результати моделювання роботи системи: а – графік струму завдання та отриманого мережевого струму; б – спектр мережевого струму

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** У роботі розглянуто принципи формування систем керування мережевими інверторами задля мінімізації їх впливу на якість електричної енергії в мережі. Запропоновано внутрішню систему керування струмом реалізовувати з використанням Н $\infty$ -регуляторів, а зовнішню систему керування величинами амплітуди та частоти вихідної напруги – з використанням методу статизму.

#### Список літератури

1. Козакевич І.А. Система енергоефективного керування динамічним компенсатором викривлень напруги / І.А. Козакевич, А.А. Кондратенко // Гірничий вісник. – 2019. – Випуск 105. С. 154-159.
2. Козакевич І.А. Керування потоками потужності гібридних транспортних засобів / І.А. Козакевич, Ю.Г. Осадчук, Р.А. Ільченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 124-129.
3. Козакевич І.А. Дослідження роботи синхронного двигуна з постійними магнітами в гібридних тягових електроприводах / І.А. Козакевич, І.В. Касаткіна, Л.В. Єрьоменко // Гірничий вісник. – 2018. – Випуск 104. С. 106-110.
4. Козакевич І.А. Система керування вентилями реактивними двигунами / І.А. Козакевич, І.І. Шевченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 135-138.
5. Сінчук І.О. Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізничних підприємств / І.О. Сінчук, І.А. Козакевич, М.Л. Барановська, Т.М. Берідзе, І.І. Пересунько // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2020. – Вип. 50. С. 142-147.
6. Jahanbakhshi M. A novel deadbeat controller for single phase PV grid connected inverters / M. Jahanbakhshi, B. Asaei, B. Farhangi // 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering. – Tehran, 2015. – Pp. 1613-1617.
7. Kanai N. A Study of Quasi Multi-rate Deadbeat Control for Modular Multi-level Converter using FPGA based Hardware controller / N. Kanai, S. Kurita, T. Ando and T. Yokoyama // IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). – Singapore, Singapore, 2019. – Pp. 1-5.
8. Tao Y. Deadbeat Repetitive Control for a grid-connected inverter with LCL Filter / Y. Tao, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou, L. Liu // IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). – Edinburgh, United Kingdom. – 2019. – Pp. 573-577.
9. Ueta H. 1MHz multisampling deadbeat control with disturbance compensation method for three phase PWM inverter / H. Ueta, T. Yokoyama // International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). – Niigata, 2018. – Pp. 1883-1889.
10. Xing Y. An improved deadbeat plus plug-in repetitive controller for three-phase four-leg inverters / Y. Xing, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Beijing, 2017. – Pp. 6325-6329.

## АНОТАЦІЇ

УДК 622.274.3: 622.831

**Ступнік М.І., Хівренко О.Я., Калініченко В.О., Калініченко О.В., Почтарьов О.В.** Підвищення якості відбійки руди в умовах шахт ПрАТ «ЗЗРК»

Досліджені питання кореляції параметрів буровибухових робіт (БВР) при підземній розробці унікального родовища залізних руд Запорізького залізорудного комбінату, руда якого має включення міцних магнетитових кварцитів. Існуюча на підприємстві методика розрахунку параметрів БВР має бути удосконалена для урахування гетерогенності рудного масиву.

**Мета.** Удосконалення технології буровибухових робіт за рахунок уточнення закономірностей розподілу енергетичних витрат вибухових речовин при відбійці корисних копалин з диференційованими фізико-механічними властивостями.

**Методи дослідження.** У якості основних методів досліджень використані аналітичні методи розрахунків параметрів буровибухових робіт, експериментальні методи дослідження промислових характеристик багатих залізних руд та магнетитових кварцитів родовища шахти «Експлуатаційна» ПрАТ «ЗЗРК», порівняльні дослідження існуючих вибухових речовин різної енергетичної потужності.

**Наукова новизна.** Визначені нові закономірності фрагментації корисних копалин при відбійці складноструктурних покладів багатих залізних руд з включеннями міцних магнетитових кварцитів. Встановлені нові залежності енергетичної насиченості масиву різної міцності руд при використанні різнотипних вибухових речовин.

**Практична значимість.** Визначені закономірності дали змогу удосконалити параметри буровибухових робіт в умовах родовища багатих залізних руд шахти «Експлуатаційна» ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат».

**Результати.** На основі виконаних досліджень удосконалена методика визначення параметрів буровибухових робіт, які дозволяє враховувати фізико-механічні характеристики багатих залізних руд і магнетитових кварцитів та рекомендувати вибухові речовини з оптимальними енергетичними показниками. Виконано розрахунки для очисного блоку шахти «Експлуатаційна» ПрАТ «Запорізький залізорудний комбінат», які дозволяють поліпшити техніко-економічні показники видобутку руди в цілому по блоку.

**Ключові слова.** підземна розробка, залізні руди різної міцності, параметри буровибухових робіт

**Stupnik M.I., Khivrenko O.Ya., Kalinichenko V.O., Kalinichenko O.V., Pochtarev O.V.** Improving the quality of ore cutting in the mine PJSC "ZZRK"

The issue on correlation of parameters of drilling and blasting works (DBW) at underground development of a unique iron ore deposit of the Zaporizhzhia iron ore plant which ore contains strong magnetite quartzites is investigated. The existing method of calculating the DBW parameters at the enterprise should be improved considering the heterogeneity of the ore massif.

**Purpose.** Improving the technology of blasting operations by clarifying energy cost distribution of explosives in the beating of minerals with differentiated physical and mechanical properties.

**Research methods.** Analytical methods of calculating the DBW parameters, experimental research methods of industrial characteristics of rich iron ores and magnetite quartzites of the mine "Operational" PJSC "ZZRK", comparative studies of existing explosives of different power capacity.

**Scientific novelty.** New regularities of mineral fragmentation in the reflection of complex structural deposits of rich iron ores containing strong magnetite quartzites have been determined. New dependences of energy saturation of the massif of different strength ores at use of various explosives are established.

**Practical significance.** The determined regularities enabled to improve the blasting operations parameters at underground mining of the rich iron ores in the mine "Operational" PJSC "Zaporizhzhia Iron Ore Plant".

**Results.** The upgraded method of determining the DBW parameters considers the physical and mechanical characteristics of rich iron ores and magnetite quartzites and to recommend explosives with optimal energy performance. The calculations for the treatment unit of the mine "Operational" PJSC "Zaporizhzhia Iron Ore Plant" allow to improve the technical and economic performance of ore production in the block.

**Key words.** Underground mining, iron ores of different strength, parameters of drilling and blasting operations

УДК 622.7: 534

**Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Сердюк О. Ю., Гапоненко І. А., Гапоненко А. А.** Вимірювання параметрів процесу магнітної сепарації на основі методів ультразвукового контролю

**Мета.** Розроблення методу комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи (продуктивності, концентрації твердої фази, вмісту контрольного класу крупності часток твердої фази), який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора.

**Методи дослідження.** У роботі використані наступні методи: аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду; методи аналітичного конструювання та комп'ютерного моделювання; методи чисельного моделювання для синтезу та аналізу математичної моделі; методи математичної статистики і теорії ймовірності для обробки результатів експериментів.

**Наукова новизна** полягає в удосконаленні методу комплексного ультразвукового вимірювання характеристик потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора. Запропонований метод дозволяє оцінити продуктивність, концентрацію часток твердої фази і вміст контрольного класу крупності часток твердої фази.

**Практичне значення** полягає в тому, що використання запропонованого підходу дозволяє отримати додаткову інформацію про параметри потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора.

**Результати.** Розрахунок характеристичної функції дисперсії ультразвукового сигналу, що пройшов через контрольований об'єм пульпи, на основі вимірювання початкової інтенсивності та інтенсивності прийнятого сигналу дозволяє визначити вміст контрольного класу крупності часток твердої фази залізорудної пульпи. Для реалізації мето-

ду комплексного ультразвукового вимірювання параметрів потоку залізорудної пульпи, який проходить через робочу камеру магнітного сепаратора доцільно застосовувати джерело хвиль Лемба, що працює у режимі широкої діаграми спрямованості і підключене за V-подібною схемою. Зазначене дозволяє створити пучок когерентних хвиль, які поширюються як у стінці ємності (робочої камери сепаратора), так і у вимірюваному середовищі (залізорудній пульпі). Отримані з використанням запропонованого методу ультразвукових вимірювань дані дозволяють створити математичну модель процесу магнітної сепарації на основі рівняння Розіна-Раммлера.

**Ключові слова:** магнітна сепарація, ультразвукові вимірювання, залізорудна пульпа, математична модель

**Morkun V.S., Morkun N. V., Tron V. V., Serdyuk O. Yu., Gaponenko I. A., Gaponenko A. A.** Measurement of magnetic separation process parameters on the basis of ultrasonic control methods

**Purpose.** To develop a method of complex ultrasonic measurement of iron ore pulp flow parameters (productivity, solid phase concentration, content of the control class of solid phase particle size), which passes through the working chamber of the magnetic separator.

**Research methods.** The following methods were used in the work: analysis of domestic and foreign experience; methods of analytical design and computer modeling; methods of numerical modeling for synthesis and analysis of mathematical model; methods of mathematical statistics and probability theory for processing the results of experiments.

**Scientific novelty.** To improve the method of complex ultrasonic measurement of the characteristics of the flow of iron ore pulp, which passes through the working chamber of the magnetic separator. The proposed method allows to evaluate the productivity, solid phase concentration and the content of the control class of the particle size of the solid phase.

**Practical significance.** The proposed approach allows to obtain additional information about the parameters of the flow of iron ore pulp, which passes through the working chamber of the magnetic separator.

**Results.** The calculation of the characteristic function of the dispersion of the ultrasonic signal that passed through the controlled volume of the pulp, based on the measurement of the initial intensity and intensity of the received signal allows to determine the content of the control class of the solid phase size of the iron ore pulp. To implement the method of complex ultrasonic measurement of the flow parameters of iron ore pulp, which passes through the working chamber of the magnetic separator, it is advisable to use a Lamb wave source operating in a wide pattern and connected in a V-shaped circuit. This allows you to create a beam of coherent waves that propagate both in the wall of the tank (working chamber of the separator) and in the measured medium (iron ore pulp). The data obtained using the proposed method of ultrasonic measurements allow to create a mathematical model of the process of magnetic separation based on the Rosin-Rammler equation.

**Key words:** magnetic separation, ultrasonic measurements, iron ore pulp, mathematical model

УДК 658.652.64.622.3

**Азарян А.А., Моргун В.С., Швець Д.В., Черкасов О.В., Гриценко А.М., Швидкий О.В.** Пошук шляхів зниження втрат і розубоження залізорудної сировини

**Мета.** Аналіз існуючих та виявлення оптимальних шляхів зниження втрат і розубоження залізорудної сировини.

**Методи дослідження.** Пропонується для зниження втрат та розубоження залізорудної сировини застосовувати комплекс організаційно-технічних заходів, що складається з вибору системи відпрацювання родовища, буропідричних робіт, випуску руди з дучок, каротажу вибухових свердловин та інклінометрії.

**Наукова новизна.** Основним елементом зазначеного комплексу організаційно-технічних заходів є застосування електронного інклінометра з модулем, який являє собою сукупність акселерометра, гіроскопа і магнітометра. Додатково в ньому розміщений мікроконтролер управління модулем, який відповідає за виконання математичних розрахунків для передачі готових даних з датчика. Акселерометр відповідає за вимірювання проекції прискорення та кута нахилу пристрою, гіроскоп застосовується для стабілізації вихідного сигналу нахилу, магнітометр реалізує вимірювання вмісту магнітного заліза в залізорудній сировині. Додатково використовується окремий, незалежний пристрій зі спеціально розробленим програмним забезпеченням, що дозволяє по протоколу обміну і з використанням механізму переривань здійснювати взаємозв'язок з модулем, що містить акселерометр, гіроскоп та магнітометр. Взаємозв'язок цих пристроїв дозволяє проводити налаштування як в цілому модуля, так і окремо акселерометра, гіроскопа та магнітометра, проводити калібрування модуля, а також отримувати результати проведених вимірювань і розрахунків.

**Практичне значення.** Для оптимізації технологічних параметрів залізорудної сировини в умовах підземного видобутку при використанні похилих свердловин для буровибухових робіт необхідне застосування інклінометрії. Запропонований інклінометр із застосуванням акселерометра, гіроскопа та магнітометра дозволяє збільшити точність вимірювань та підвищити інформативність процесу інклінометрії.

**Результати.** Розроблено функціональну схему інклінометра із застосуванням акселерометра, гіроскопу та магнітометра. Попередні розрахунки дозволяють прийти до висновків, що застосування інклінометрії при підземному видобутку руд дозволить знизити планові показники засмічення на 3,0%, втрати руд на 5,0%, і забезпечити підвищення вмісту заліза на 2,0%.

**Ключові слова:** залізорудна сировина, інклінометрія, розубоження, акселерометр, гіроскоп, магнітометр.

**Azaryan A.A., Morkun V.S., Shvets D.V., Cherkasov O.V., Gritsenko A.M., Shvydkyi O.V.** Search for ways for reduction of losses and impoverishment of iron raw materials

**Purpose.** Analysis of existing and identification of optimal ways to reduce losses and impoverishment of iron ore.

**Research methods.** It is proposed to apply a set of organizational and technical measures to reduce losses and impoverishment of iron ore, consisting of the selection of the field development system, blasting, ore production from wells, logging of blast holes and inclinometry.

**Scientific novelty.** The main element of this set of organizational and technical measures is the use of an electronic inclinometer with a module, which is a set of accelerometer, gyroscope and magnetometer. Additionally, it houses a microcontroller, which is responsible for performing mathematical calculations for the transmission of finished data from the sensor. The accelerometer is responsible for measuring the projection of the acceleration and the angle of the device. The gyroscope is used to stabilize the output signal of the inclination. The magnetometer implements the measurement of the content of

magnetic iron in iron ore. Additionally, a separate independent device with specially designed software is used, which allows the exchange protocol and using the interrupt mechanism to communicate with the module containing the accelerometer, gyroscope and magnetometer. The interconnection of these devices allows configuring the module as a whole and separately the accelerometer, gyroscope and magnetometer, to calibrate the module, as well as to obtain the results of measurements and calculations.

**Practical significance.** To optimize the technological parameters of iron ore in the conditions of underground mining when using inclined wells for drilling and blasting operations, the use of inclinometry is required. The proposed inclinometer using an accelerometer, gyroscope and magnetometer allows increasing the accuracy of measurements and increasing the informativeness of the inclinometry process.

**Results.** The functional scheme of the inclinometer with the use of accelerometer, gyroscope and magnetometer is developed. Preliminary calculations allow us to conclude that the use of inclinometry in underground ore mining will reduce the planned clogging by 3.0%, ore loss by 5.0%, and provide an increase in iron content by 2.0%.

**Key words:** iron ore raw materials, inclinometry, impoverishment, accelerometer, gyroscope, magnetometer.

УДК 669.184:628.5-049.5

**Тарасов В.К., Воденнікова О.С., Воденнікова Л.В.** Вибір раціональних засобів техногенної безпеки киснево-конвертерного процесу

**Мета.** Метою роботи є пошук шляхів підвищення техногенної безпеки технологічного процесу киснево-конвертерного виробництва сталі.

Поставлена мета в роботі вирішується наступними завданнями: проаналізувати шкідливі виробничі фактори киснево-конвертерного процесу та засоби підвищення техногенної безпеки конверторного виробництва; визначення рівня безпеки основного обладнання киснево-конвертерного цеху від тривалості його безаварійної роботи; встановлення раціональної зони роботи обладнання киснево-конвертерного цеху; привести оцінку причин та характеру негативного впливу теплових виділень, зокрема, через нагрітий корпус конвертера, на умови праці робітників киснево-конвертерного цеху; визначити шляхи захисту робітників киснево-конвертерного цеху від негативного впливу джерела зовнішнього іонізуючого випромінювання; проаналізувати допустиму тривалість перебування людини в зоні дії інфрачервоного випромінювання в умовах киснево-конвертерного цеху.

**Методи досліджень.** При узагальненні та аналізі науково-технічної літератури з напрямку аналізу допустимих та раціональних засобів техногенної безпеки киснево-конвертерного процесу виробництва сталі використовувався комплексний підхід. Виконано обробку та аналіз аналітичних даних залежності рівня безпеки основного обладнання киснево-конвертерного цеху від тривалості його безаварійної роботи. Аналіз аналітичних даних допустимої тривалості перебування людини в зоні дії інфрачервоного випромінювання в умовах киснево-конвертерного цеху.

**Наукова новизна.** Запропоновано удосконалення методики аналізу рівня безпеки технологічного процесу та обладнання киснево-конвертерного цеху; для зменшення дії випромінювання від кисневого конвертера запропоновано схему теплозахисного екрану.

**Практичне значення.** Приведений розрахунок теплових втрат і виділень бічною поверхнею кисневого конвертера дозволяє за рахунок встановлення теплозахисних екранів та укриття знизити радіус небезпечної зони до 1,0 м та підвищити техногенну безпеку в киснево-конвертерному цеху.

**Результати.** Визначено рівень безпеки кисневого конвертера в залежності від тривалості його безаварійної роботи. Встановлено, що максимальний рівень безпеки роботи кисневого конвертера (в межах 80–98%) досягається при тривалості його безаварійної роботи на протязі 720–2160 год. Запропоновано заходи з охорони праці в умовах киснево-конвертерного цеху, які дозволяють забезпечити дану безаварійну тривалість роботи кисневого конвертера.

**Ключові слова:** техногенна безпека, рівень безпеки, кисневий конвертер, теплові виділення, забруднення виробничого середовища, безаварійна робота конвертера.

**Tarasov V.K., Vodennikova O.S., Vodennikova L.V.** Selection of rational means of safety of the oxygen-convertering process

**Purpose.** To find ways to improve the technogenic safety of the technological process of oxygen-converter steel production.

The set goal in the work is solved by the following tasks: to analyze the harmful production factors of the oxygen-converter process and the means of increasing the technogenic safety of the converter production; determination of the safety level of the main equipment of the oxygen-converter shop from the duration of its trouble-free operation; establishment of a rational operating zone for the equipment of the oxygen-converter shop; to assess the causes and nature of the negative impact of heat emissions, in particular, through the heated converter housing, on the working conditions of the workers of the oxygen-converter shop; to determine the ways of protecting the workers of the oxygen-converter shop from the negative impact of the source of external ionizing radiation; to analyse the permissible duration of people's stay in the area of infrared radiation in the conditions of an oxygen-converter shop.

**Research methods.** When generalizing and analysing scientific and technical literature in the direction of analysing the permissible and optimal means of technogenic safety of the oxygen-converter steel production process, an integrated approach was used. The processing and analysis of analytical data of the dependence of the safety level of the main equipment of the oxygen-converter shop on the duration of its trouble-free operation has been carried out. Analysis of analytical data on the permissible duration of a people's stay in the area of infrared radiation in the conditions of an oxygen-converter shop.

**Scientific novelty.** Improvement of the methodology for analyzing the safety level of the technological process and equipment of the oxygen-converter shop is proposed; to reduce the effect of radiation from the oxygen converter, a heat shield scheme is proposed.

**Practical significance.** The above calculation of heat losses and emissions from the side surface of the oxygen converter allows, due to the installation of heat shields and a shelter, to reduce the radius of the hazardous zone to 1.0 m and increase technological safety in the oxygen-converter shop.

**Results.** The safety level of the oxygen converter was determined depending on the duration of its trouble-free operation. It has been established that the maximum level of safety of the oxygen converter operation (within 80–98%) is achieved with the duration of its trouble-free operation for 720–2160 hours. The measures for labor protection in the conditions of the oxygen-converter shop are proposed, which make it possible to ensure the given trouble-free operating time of the oxygen converter.

**Key words:** technogenic safety, safety level, oxygen converter, heat emissions, pollution of the production environment, trouble-free operation of the converter.

УДК 528.4

**Рибіна О. І.** До питання організації та управління виробництвом прогнозних, проєктних та вишукувальних робіт із землеустрою

**Мета.** Сучасний період розвитку суспільства визначається як період перетворення економічних відносин, зміни суспільно-економічної формації. Основною ознакою цього процесу є виникнення різних форм власності на землю та інші засоби виробництва, а також становлення та розвиток раціональних форм господарювання в усіх сферах економіки, в тому числі й землевпорядкування. У зв'язку з різноманітністю організаційно-виробничих землевпорядних структур особливої актуальності набувають проблеми організації та планування проєктно-вишукувальних робіт. Мета цієї статті полягає у розвитку теоретичних засад та науково-методичних підходів до організації та планування проєктно-вишукувальних робіт на основі узагальнення наукових напрацювань із цього питання у вітчизняній і закордонній науковій літературі.

**Методи дослідження.** У статті використано такі загальнонаукові методи пізнання, як: індукція та дедукція, синтез та аналіз, абстрагування та конкретизація, логічне узагальнення.

**Наукова новизна.** Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає в тому, що набули подальшого розвитку теоретичні засади організації та управління виробництвом прогнозних, проєктних та вишукувальних робіт із землеустрою.

**Практична значимість.** Результати цієї роботи мають практичне значення та можуть використовуватись не лише проєктними організаціями, а й при розробці навчально-методичного забезпечення дисциплін «Організація геодезичних та землевпорядних робіт», «Економіка землекористування і землевпорядкування» і т.п.

**Результати.** За результатами виконаних досліджень обґрунтовано, що землевпорядкування – система заходів щодо раціонального використання, обліку, оцінки та поліпшення земель. Ці заходи здійснюються відповідно до землевпорядних проєктів. Систематизовано процеси організації прогнозних та проєктних робіт із землеустрою, виявлено особливості управління зазначеними видами робіт. Розглянуто можливості організації та управління виробництвом вишукувальних робіт із землеустрою на прикладі коригування топографічного матеріалу.

**Ключові слова:** вишукувальні роботи, прогнозні та проєктні роботи із землеустрою, геодезія, стадії землевпорядного процесу.

**Rybina O.I.** On the organization and management of production of forecasting, design and survey works on land management

**Purpose.** The modern period of development of society is defined as a period of transformation of economic relations, changes in socio-economic formation. The main feature of this process is the emergence of various forms of ownership of land and other means of production, as well as the formation and development of rational forms of management in all sectors of the economy, including land management. Due to the diversity of organizational and production land management structures, the problems of organization and planning of design and survey works become especially relevant. The purpose of this article is to develop theoretical foundations and scientific and methodological approaches to the organization and planning of design and survey work based on the generalization of scientific developments on this issue in domestic and foreign scientific literature.

**Research methods.** The article uses such general scientific methods of cognition: induction, deduction, synthesis, analysis, and abstraction, and concretization, logical generalization.

**Scientific novelty.** The scientific novelty of the obtained research results is that the theoretical principles of organization and management of production of forecasting, design and survey works on land management have been further developed.

**Practical significance.** The results of this work are of practical importance and can be used not only by design organizations, but also in the development of educational and methodological support disciplines "Organization of geodetic and land management", "Economics of land use and land management", etc.

**Results.** According to the results of the research, it is substantiated that land management is a system of measures for the rational use, accounting, evaluation and improvement of land. These measures are carried out in accordance with land management projects. The processes of organization of forecasting and design works on land management are systematized, the peculiarities of management of the specified types of works are revealed. Possibilities of organization and management of production of survey works on land management on the example of adjustment of topographic material are considered.

**Key words:** survey works, forecast and design works on land management, geodesy, stages of land management process.

УДК 621.929.6:622.781

**Засельський В. Й., Пополов Д. В., Засельський І. В., Шепеленко М. І.** Лабораторні дослідження технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» горизонтально-направленої дії

**Мета.** Основним процесом в технологічних схемах підготовки шихтових матеріалів сучасного металургійного виробництва є процес змішування. Для реалізації процесу змішування може бути застосований роторний змішувач безперервної горизонтально-направленої дії. Метою лабораторних досліджень було отримання лінійної математичної моделі процесу змішування в технічній системі безперервної дії «роторний змішувач-конвеєр», а також визначення її раціональних конструктивних параметрів, що впливають на якість змішування матеріалу.

**Методи дослідження.** В даній науковій праці представлена методика досліджень, яка включає аналітичний аналіз який виконувався на основі представлення динаміки руху матеріальної точки та твердих тіл, що рухаються в вібраційній

горизонтальній площині при їх безпосередній взаємодії. Також застосовано метод планування повного факторного експерименту, виконана перевірка адекватності моделі по критерію Стюдента та використані математичні методи обробки даних.

**Наукова новизна.** Вперше для лабораторного зразка технічної системи «роторний змішувач-конвеєр» отримані лінійні залежності, які характеризують гомогенність готової суміші при раціональній взаємодії кінематичних та конструктивних параметрів роторного змішувача при вібраційному прискоренні та навантаженні конвеєрної стрічки. З дослідження встановлено, що для дослідної системи «роторний змішувач-конвеєр», при постійних конструктивних та кінематичних параметрах стрічки конвеєра якість змішування прямопропорційно залежить від висоти шару матеріалу.

**Практична значимість.** В статті наведено схему та принцип роботи лабораторного стенду системи роторний змішувач безперервної горизонтально-направленої дії та стрічковий конвеєр, також описаний хід проведення попереднього та повного факторного експериментів. Встановлений зв'язок між кінематичними та конструктивними елементами робочого органу змішувача, висотою шару транспортуючого матеріалу та вібраційного прискорення конвеєрної стрічки, що впливають на якість змішування матеріалу. Визначені раціональні параметри системи «роторний змішувач-конвеєр».

**Результати.** Визначено основні фактори, які безпосередньо впливають на якість змішування; наведений хід проведення експерименту; отримана математична модель, яка описує процес змішування в технічній системі безперервної, горизонтально-направленої дії.

**Ключові слова:** змішувач, матеріал, шар, експеримент, робочий орган, ротор, фактор, змішувач, технічна система, конвеєр.

**Zaselskiy V. I., Popolov D. V., Zaselskiy I. V., Shepelenko M. I.** Laboratory studies of the technical system "rotary mixer-conveyor" of horizontal directional action

**Purpose.** Modern metallurgical production uses in the main technological schemes the preparation of charge materials for sintering and firing. The main process of such schemes is mixing, for which a rotary mixer of continuous horizontal direction can be used. The purpose of laboratory research was to obtain a linear mathematical model of the mixing process in a rotary mixer of continuous action, as well as to determine its rational design parameters that affect the quality of mixing the material.

**Research methods.** The research methodology in this scientific work includes an analytical study which was performed on the basis of the representation of the dynamics of motion of a material point and solids moving in a vibrating horizontal plane during their direct interaction. The method of planning a complete factorial experiment was also applied, the adequacy of the model was checked according to Student's criterion and mathematical methods of data processing were used.

**Scientific novelty.** For the first time, for the laboratory sample of the technical system "rotary mixer-conveyor" linear dependences are obtained, which connect the kinematic, design parameters of the rotary mixer and the vibrational acceleration of the conveyor belt. A preliminary experiment was also conducted, in which rational design parameters were determined. The study found that for the experimental system conveyor-rotor mixer, with constant design and kinematic parameters of the conveyor belt, the quality of mixing is directly proportional to the height of the material layer.

**Practical significance.** The article presents the scheme and principle of operation of the laboratory stand of the system of a rotary mixer of continuous horizontal directional action and a belt conveyor, also describes the course of preliminary and complete factorial experiments. The connection between the kinematic and structural elements of the working body of the mixer, the height of the layer of conveying material and the vibrational acceleration of the conveyor belt. Rational parameters of the system "rotary mixer-conveyor" are determined.

**Results.** The main factors that directly affect the quality of mixing are identified; the course of the experiment is given.

**Key words:** mixer, material, blade, experiment, working body, rotor, factor, mixer, technical system, conveyor.

УДК 658.567.1:621.794.42]:621.774

**Манідіна С.А., Бєлоконь К.В., Воденнікова О.С., Рижков В.Г., Троїцька О.О.** Утилізація солянокислих відпрацьованих травильних розчинів прокатного виробництва

**Мета.** Визначити параметри переробки солянокислих відпрацьованих травильних розчинів прокатного виробництва з отриманням залізного коагулянту.

**Методи дослідження.** При виконанні роботи використовувались санітарно-гігієнічні, аналітичні, математичні, статистичні методи дослідження. Статистична обробка результатів проводилась з використанням комп'ютеризованої програми Microsoft Excel.

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає в тому, що за результатами проведених експериментальних досліджень у роботі:

встановлено вплив параметрів обробки відпрацьованих травильних розчинів на якість отриманого коагулянту; розроблена апаратурно-технологічна схема переробки відпрацьованих травильних розчинів з отриманням залізного коагулянту.

**Практична значимість.** Запропонована технологія утилізації солянокислих відпрацьованих травильних розчинів, яка може бути рекомендована для використання на металургійних підприємствах України. Матеріали роботи впроваджені у навчальний процес кафедри прикладної екології та охорони праці Запорізького національного університету.

**Результати.** Встановлено, що найбільш перспективними методами обробки солянокислих відпрацьованих травильних розчинів є методи з отриманням товарного продукту. Визначено, що переробку солянокислих відпрацьованих травильних розчинів найбільш доцільно проводити з одержанням коагулянту. Встановлено, що при витраті повітряної суміші, що містить озон, 0,5 л/хв повне окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду відбувається через 36 хв від початку обробки. При витраті повітряної суміші, що містить озон, 1,5 л/хв повне окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду відбувається через 18 хв від початку обробки. Встановлено, що повне окиснення ферум(II) хлориду до ферум(III) хлориду за допомогою озону відбувається в 1,5 рази швидше ніж киснем. Експериментально встановлено, що ефективна доза коагулянту ферум(III) хлориду для осадження коричневого залізного пігмента

ту в розчині становить 62 мг/л. Розроблена принципова апаратурно-технологічна схема переробки солянокислих відпрацьованих розчинів з отриманням коагулянту – ферум(III) хлориду.

**Ключові слова:** прокатне виробництво, солянокислий відпрацьований травильний розчини, ферум(II) хлорид, озон, утилізація, ефективна доза коагулянту

**Manidina Ye.A., Belokon K.V., Vodennikova O.S., Ryzhkov V.G., Troitska O.O.** Utilization of hydrochloric acid spent pickling solutions of rolled production

**Purpose.** Determine the processing parameters of hydrochloric acid spent pickling solutions of rolled production to obtain iron coagulant.

**Research methods.** Sanitary and hygienic, analytical, mathematical, statistical research methods were used in the work. Statistical processing of the results was performed using a computerized program Microsoft Excel.

**The scientific novelty** of the obtained results is that according to the results of experimental research in the work: – the processing parameters' influence on the spent pickling solutions on quality of the received coagulant is established; – the hardware-technological scheme of processing of the spent pickling solutions with reception of iron coagulant is developed.

**Practical significance.** The technology of utilization of hydrochloric acid spent solutions which can be recommended for use at the metallurgical enterprises of Ukraine is offered. The materials of the work are introduced into the educational process of the Department of Applied Ecology and Labor Protection of Zaporizhzhia National University.

**Results.** It is established that the most promising methods of processing hydrochloric acid spent pickling solutions are methods of obtaining a marketable product. It is determined that the processing of hydrochloric acid spent pickling solutions is most appropriate to obtain a coagulant. It was found that at the consumption of an air mixture containing ozone, 0.5 l/min, complete oxidation of iron(II) chloride to iron(III) chloride occurs after 36 minutes from the start of treatment. At the consumption of an air mixture containing ozone, 1.5 l/min complete oxidation of iron(II) chloride to iron(III) chloride occurs after 18 minutes from the start of treatment. It was found that the complete oxidation of iron(II) chloride to iron(III) chloride with ozone occurs 1.5 times faster than oxygen. It has been experimentally established that the effective dose of iron(III) chloride coagulant for the deposition of brown iron pigment in solution is 62 mg/l. The basic hardware-technological scheme of processing of hydrochloric acid spent solutions with receiving coagulant - iron(III) chloride is developed.

**Key words:** rolling production, hydrochloric waste pickling solutions, iron(II) chloride, ozone, utilization, effective dose of coagulant.

УДК 621.9.044

**Нечасів В.П., Рязанцев А.О., Реброва С.В., Лавриненко Д.О.** Дослідження впливу технологічних факторів на стійкість ріжучого інструменту при плазово-механічній обробці

**Мета.** Метою даної роботи є вдосконалення технології обробки деталей з важкооброблюваних матеріалів, а саме – дослідження й наукове обґрунтування параметрів процесу плазово-механічної обробки поверхонь деталей з легованих сталей для підвищення продуктивності обробки, забезпечення необхідного періоду стійкості різального інструменту.

**Методи дослідження.** Результати роботи з плазово-механічної обробки отримані шляхом теоретичних і експериментальних досліджень. Теоретичні дослідження полягають у визначенні факторів, які впливають на інтенсивність зношування різального інструменту в умовах плазово-механічного точіння й стругання. Експериментальні дослідження засновані на комплексному вивченні взаємозв'язку основних показників механічної обробки з факторами попереднього плазового нагрівання припуску.

**Наукова новизна.** У результаті проведених досліджень були отримані дані про особливості протікання процесу спрацьовування інструментального матеріалу, динаміку параметрів зношування інструменту при нагріванні заготовки плазовою дугою. Виявлена залежність зростання фаски зношування від параметрів нагрівання поверхневого шару заготовки, установлений розподіл нормальних та дотичних напруг на контактних поверхнях ріжучого клину.

**Практичне значення.** Розроблений процес плазово-механічної обробки та рекомендації з вибору параметрів нагрівання та різання дозволяють збільшити продуктивність обробки заготовок із середньо легованих сталей при забезпеченні заданих параметрів стійкості ріжучої частини інструменту.

**Результати.** Встановлено, що попереднє плазове нагрівання при механічній обробці забезпечує протікання специфічного термічного циклу в матеріалі припуску, у результаті чого змінюються твердість і пластичність оброблюваного матеріалу. Зміна механічних властивостей припуску приводить до зниження питомих навантажень на ріжучий клин, до зниження інтенсивності його адгезійного зношування й тендітного руйнування, до стабілізації його округлення, що позитивно позначається в цілому на ефективності процесу плазово-механічної обробки важкооброблюваних матеріалів. Можливо здійснювати плазово-механічну обробку в режимі інтенсивного зношування леза, доводячи розмір фаски по задній поверхні до половини товщини ріжучої пластини.

**Ключові слова:** плазова дуга, різальний інструмент, стійкість, нормальні та дотичні напруги, зношування.

**Nechaev V.P., Ryazancev A.O., Rebrova S.V., Lavrinenko D.O.** Research of the influence of technological factors on the life of the cutting tool during plasma-mechanical processing

**Purpose.** To improve the technology of processing parts made of difficult-to-machine materials, namely, to study and scientifically substantiate the parameters of the plasma-mechanical treatment (PMT) process of the surfaces of parts made of alloy steels to increase processing productivity, to ensure the required service life of the cutting tool.

**Research methods.** The results of the work on the PMT obtained through theoretical and experimental research. Theoretical research consists in determining the factors that affect the wear rate of the cutting tool in conditions of plasma-mechanical turning and planing. Experimental studies based on a comprehensive study of the relationship of the main parameters of machining with the factors of the previous plasma heating of the allowance.

**Scientific novelty.** There were obtained tributes about the features of the process of operation of the tool material, the dynamics of the wear parameters of the tool when heating the workpiece with a plasma arc. The revealed dependence of the

growth of the wear chamfer on the heating parameters of the surface layer of the workpiece, the established distribution of normal and tangential stresses on the contact surfaces of the cutting wedge.

**Practical significance.** The developed process of plasma-mechanical treatment and recommendations for the choice of heating and cutting parameters allow to increase the productivity of processing workpieces from medium-alloyed steels while ensuring the specified parameters of the tool cutting life.

**Results.** Preliminary plasma heating during machining ensures the occurrence of a specific thermal cycle in the material of the allowance, as a result of which the hardness and plasticity of the processed material change. A change in the mechanical properties of the allowance leads to a decrease in the specific loads on the cutting wedge, to a decrease in the intensity of its adhesive wear and brittle fracture, to the stabilization of its rounding, which has a positive effect on the overall efficiency of the MIP process of difficult-to-machine materials. Possibility to carry out plasma-mechanical processing in the mode of intensive wear of the blade, bringing the dimensions of the chamfer along the flank surface to half the thickness of the cutting insert.

**Key words:** plasma arc, cutting tool, durability, normal and tangential stresses, wear.

УДК 622.8

**Лапшин О.Є., Гацький А.К., Гацький І.А.** Розроблення заходів безпеки при виникненні аварій у гірничих виробках шахт на основі використання мобільної камери повітропостачання

Стаття присвячена розробці та обґрунтуванню заходів безпеки при виникненні аварій, шляхом використання мобільної камери аварійного повітропостачання в підземних гірничих виробках залізрудних шахт та інших галузях гірничодобувної промисловості, що надасть можливість підвищити рівень безпеки працюючих, скоротити час проведення ліквідації аварій гірничорятувальниками та знизити показники коефіцієнта частоти травмування та смертності робітників.

**Метою** цього дослідження є створення безпечних умов перебування робітників в підземних гірничих виробках під час аварій, до приїзду гірничих рятувальників та виконання оперативних дій з рятування працюючих та ліквідації аварій, за рахунок розробки та використання мобільної камери повітропостачання.

**Метод дослідження.** Використано комплексний підхід, який включає аналіз і узагальнення науково-технічної інформації, щодо використання мобільної камери повітропостачання та забезпечення безпеки працюючих гірників.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає у тому, що запропонована конструкція мобільної камери аварійного повітропостачання, має можливість автономно пересуватися по гірничим виробкам, мобільна камера обладнана засобами високочастотного зв'язку і приладами контролю параметрів мікроклімату, а також не потребує значного часу з її монтажу, в результаті чого заощаджується дорогий час на порятунок робітників.

**Практична цінність** від використання запропонованої конструкції мобільної камери аварійного повітропостачання, полягає в тому що, проведення робіт по порятунку людей та ліквідації аварій в підземних гірничих виробках шахт проводиться з мінімізацією ризиків травмування людей.

**Результат** від розробки та використання мобільної камери аварійного повітропостачання полягає у підвищенні безпеки працюючих під час аварій шляхом укриття їх в пересувній камері, утворення в ній нормального атмосферного тиску повітря, оптимальних параметрів мікроклімату, що унеможливує потрапляння отруйних газів із зовні всередину, застосування стійкого зв'язку з рятувальними бригадами та вивезення потерпілих пересувною камерою з осередків аварій.

**Ключові слова:** камера аварійного повітропостачання, гірничі виробки, безпека, травмування людей, аварія, мікроклімат, рятування працюючих

**Lapshyn O.Ye., Hatskyi A.K., Hatskyi I.A.** Safety measures in case of accidents in mine workings based on the use of mobile refuge chamber

The article is dedicated to development and justification for safety measures in case of accidents, using mobile refuge chamber in underground workings of iron ore mines and other sectors of mining industry, which will improve employees' safety level, reduce the time for accident elimination by mine-rescuers and reduce in employees' injury and fatality frequency rates.

**Purpose.** To create safety conditions for employees staying in the underground mine workings during an accident till mine-rescuers arrive, and prompt actions to rescue workers and eliminate the accident by means of development and use of mobile refuge chamber.

**Research method.** Comprehensive approach was used which included analysis and consolidation of scientific and technical information regarding use of refuge chamber and ensuring working miners safety.

**Scientific novelty** is that proposed design of mobile refuge chamber has an option to autonomously move through mine workings, the mobile chamber is equipped by high-frequency communications means and instruments to control microclimate parameters as well as it does not require significant mounting time, resulting in saving valuable time to rescue the employees.

**Practical significance** of the proposed design of mobile refuge chamber is that the works to rescue people and eliminate an accident in underground mine workings are performed with minimization of risks to injury people.

**Results.** Development and use of mobile refuge chamber is to improve employees' safety during an accident by their refuge into movable chamber, creation of normal atmospheric pressure, optimal microclimate parameters into it, which prevents the ingress of toxic gases from the outside to the inside, use of stable communication with rescue teams and removal of affected persons from accident locations using movable chamber.

**Key words:** refuge chamber, mine working, safety, injuring people, accident, microclimate, rescuing workers

УДК 330.021.46

**Турило А.М., Турило А.А., Горська С.М.** Проблеми економічного балансового розвитку в координатах «цінність людини (людиноцентризм) – справедливість – ефективність»

**Мета.** Розвиток будь-якого суб'єкта господарювання є складним процесом. Він потребує всебічного дослідження й аналізу. Тільки таким чином можна визначити і забезпечити бажаний вектор розвитку суб'єкта господарювання.

Мета даної роботи полягає в тому, щоб дослідити і розкрити проблему економічного балансового розвитку суб'єкта господарювання в аспекті його зв'язку з сутністю таких категорій як цінність людини, соціальна справедливість і ефективність.

**Методи дослідження.** Авторами роботи використано метод узагальнюючого аналізу і науково-логічний підхід до розкриття сутності економічного балансу і його зв'язку з такими категоріями як цінність людини, соціальна справедливість і ефективність.

**Наукова новизна.** У роботі запропоновано ввести в науково-практичний обіг, для більш глибокого аналізу та системного управління економічним розвитком підприємства, таке поняття як «економічний баланс»; розбито підходи до трансформації якості економічного балансу підприємства з характеристикою відповідних станів економіки в процесі його розвитку з врахуванням зміни рівнів людського капіталу та ефективності діяльності підприємства.

**Практична значимість.** Використання розглянутих у роботі питань дозволить, по-перше, більш глибоко і системно здійснювати економічний аналіз діяльності підприємства в його статичі і динаміці, по-друге, є основою для розробки відповідних методик з метою більш детальних оцінок процесу формування і підтримання необхідного рівня економічного балансу на підприємстві.

**Результати.** Представлений авторами роботи теоретико-методичний матеріал розширює теоретичну і практичну бази стосовно дослідження, аналізу й управління економічною діяльністю підприємства. Розкрито зміст економічного балансу підприємства і процес його трансформації у часі відповідно рівня його якості. Показано зв'язок економічного балансу з такими важливими показниками комплексної оцінки діяльності підприємства, як рівень інноваційності і рівень економічної ефективності в аспекті динамічного його розвитку. Відображено ключовий вплив обсягу і рівня людського капіталу на загальний рівень потенціалу підприємства, ефективність системи управління та рівень якості його економічного балансу, а також рівня людиноцентризму в цивілізаційному аспекті на прогресивний розвиток суспільства.

**Ключові слова:** економічний баланс, балансування, підприємство, людський капітал, ефективність, цінність людини.

**Turilo A.M., Turilo A.A., Horska S.M.** Problems of economic balanced development in coordinates «human value (anthropocentrism) – justice - efficiency»

**Purpose.** Development of any business entity is a complex process. It requires comprehensive research and analysis. Only in this way it is possible to identify and ensure the desired vector of development of the subject of business entity.

The purpose of this work is to investigate and solve the problem of economic balanced development business entity in terms of its relationship to the essence of such categories as human value, social justice and efficiency.

**Research methods.** The method of generalized analysis and scientific-logical approach to the disclosure of the essence of economic equilibrium and its relationship with such categories as human value, social justice and efficiency.

**Scientific novelty.** In-depth analysis and systematic management of economic development of the enterprise, such a concept as "economic balance"; the approaches to transformation of quality of economic balance of the enterprise with the characteristic of the corresponding states of economy in the course of its development taking into account change of levels of human capital and efficiency of activity of the enterprise are broken.

**Practical significance.** A deeper and more systematic economic analysis of the enterprise in its statics and dynamics, and secondly, is the basis for developing appropriate methods to assess in more detail the process of forming and maintaining the required level of economic balance enterprise.

**Results.** The theoretical and practical basis of research, analysis and management of economic activity of the enterprise. The content of the economic balance of the enterprise and the process of its transformation in time according to its quality are revealed. The connection of economic balance with assessment indicators of enterprise activity like innovation and economic efficiency in view of its dynamic development is shown. The key impact of the volume and level of human capital on the overall enterprise potential, the efficiency of the management system and quality of its economic balance, as well as the level of anthropocentrism in the civilizational aspect on the progressive development of society.

**Key words:** economic balance, balancing, enterprise, human capital, efficiency, human value.

УДК 621.9.01

**Кіjanовський М.В., Цивінда Н.І., Лаухіна Л.І., Чернявська О.В., Зуєв І.О.** Аналіз призначення рівня режимів різання за виробничими критеріями

**Мета.** Визначення можливості підвищення продуктивності механічної обробки деталей із високомарганцевих сталей за рахунок розробки оптимальних параметрів технологічної системи ВПІД (верстат – пристосування – інструмент–деталь): жорсткості та власної частоти коливальних елементів системи ВПІД.

**Методи дослідження.** Використані теорія різання металів, статистичного аналізу, статистичних рішень, теорії ймовірності, математичного аналізу, теорії коливальних, віброакустичної діагностики, теорії розпізнавання технічних станів.

Проведені дослідження обробки бронею дробарок при обробці токарно-карусельних верстатах показали, що на жорсткість та вібростійкість системи ВПІД впливають режими різання. Установлено, що критерієм оцінки режимів різання, що застосовуються на заводах, є коефіцієнт нормативної зміни швидкості різання. Визначені основні параметри технологічної системи ВПІД, від яких залежить стійкість різального інструменту. При обробці на заводах бронею, різноманітних за розмірами, коефіцієнт  $K_n$  нормативної зміни швидкості різання може знижуватись до 0,25, тобто допустима швидкість різання може бути в 4 рази менше нормативної. Це пояснюється не тільки специфічними властивостями високомарганцевої сталі, але й недостатньою жорсткістю і вібростійкістю технологічної системи ВПІД. Це затруднює застосування різального інструменту з пластинами з Кубічного нітриду бору.

**Наукова новизна.** За встановленою сталою діагностичною ознакою початку інтенсивного руйнування ріжучої частини інструменту з ПНТМ на основі КНВ в діапазонах технологічних параметрів обробки деталей, можливо визначити оптимальні режими різання.

**Практичне значення.** При впровадженні методу і технологій діагностичного контролю працездатності системи верстат-приспособлення-інструмент-деталь при обробці деталей із високомарганцевих сталей вирішується задача запобігання процесам прискореного пошкодження інструментальних пластин і збільшення їх ресурсу.

**Результат.** Подальші дослідження віброакустичних реакцій змін технічних станів елементів системи ВПД у процесах обробки броней з високомарганцевих сталей нададуть можливість розробити критерії стійкості різців та впровадити їх у виробництво.

**Ключові слова:** технологічна система ВПД, продуктивність процесу токарної обробки, броні, високомарганцева сталь, різальний інструмент, КНБ, режими різання, швидкість різання.

**Kiiianovskiy M.V., Tsyvinda N.I., Chernyavskaya O.V., Laukhina L.I. Zuiev I.O.** Analysis of cutting mode levels selection by production criteria

**Purpose.** To determine possibilities of increasing efficiency of mechanical processing of high-manganese steels through development of optimal parameters of the MFTW (machine-fixture-tool-workpiece) system: rigidity and frequency of MFTW element oscillations.

**Research methods.** The theory of metal cutting, statistic analysis, statistic solutions, the probability theory, mathematical statistics, mathematical analysis, the theory of oscillations, vibroacoustic diagnostics, identification of technical conditions.

The conducted studies of processing crusher wear plates on the turning-and-boring lathes demonstrate that rigidity and vibration strength of the MFTW system are impacted by cutting modes. The coefficient of the standard cutting speed is determined to be a cutting mode variation criterion used at enterprises. There are determined main parameters of the MFTW system that impact a cutting tool life. When processing wear plates of various sizes, the coefficient of the standard cutting speed variation can decrease up to 0.25, i.e. the allowable speed of cutting can be 4 times smaller than the standard one. This can be explained not only specific properties of high-manganese steel but also insufficient rigidity and vibration strength of the MFTW system, this complicating application of the cutting tool with CBN plates.

**Scientific novelty** of the obtained results consists in the fact that the determined sustainable diagnostic indication of the beginning of active failure of the CBN-based PSHM cutting part of the tool within the technological processing parameters enable determining the optimal cutting mode.

**Practical significance** of the obtained results consists in the fact that when processing high-manganese steel parts, introduction of the method and technologies of diagnostic control of the MFTW system performance enable solution of the task of preventing accelerated damage to the tool plates and increasing their resource.

**Results.** Vibroacoustic responses of variation of technical conditions of the MFTW system elements when processing high-manganese steel wear plates enable development of criteria of the cutting tool life and their introduction in production.

**Key words:** MFTW system, turning process efficiency, wear plates, high-manganese steel, cutting tool, CBN, cutting modes, cutting speed.

УДК 629.083:656.13

**Пахомов В.І., Гірін І.В., Тищенко В.Ю., Жалдаченко О.А.** Обґрунтування раціональної організації експлуатації кар'єрних автосамоскидів

**Мета.** Основною метою роботи є встановлення закономірностей, що пов'язують гірничотехнічні умови експлуатації кар'єрних автосамоскидів з організаційними заходами їх використання для обґрунтування методів управління їх ресурсом в екстремальних умовах ведення гірських робіт, що дозволить підвищити ефективність транспортних систем в процесі розвитку кар'єра.

**Методи дослідження.** У роботі використовувався комплексний метод досліджень, що включає аналіз і наукове узагальнення науково-технічної інформації. Застосовані програмно-цільовий метод, логічний і математичні методи, на яких базувалася методологія теоретичних досліджень роботи. На підставі аналізу досліджень розглянута ефективність використання нових технічних рішень, спрямованих на підвищення продуктивності кар'єрного автомобільного транспорту. Також застосовується ряд приватних методів: структурно-статистичний і програмно-цільовий аналіз, гіпотетичний і аксіоматичний методи, а також метод інтерпретації

**Наукова новизна.** Наукову цінність представляють: - запропонована класифікація умов експлуатації систем кар'єрного автотранспорту по комплексному критерію, заснована на структурному взаємозв'язку науково-технічних рішень щодо забезпечення ефективності системи кар'єрного автотранспорту глибоких кар'єрів; - методичні засади оцінки і формування якості кар'єрних самоскидів, а також вибору оптимальної моделі для конкретних гірничотехнічних умов експлуатації; - встановлені кількісні значення і закони розподілу показників надійності автосамоскидів, використання яких в методиці розрахунку продуктивності вантажно-транспортних комплексів дозволяє обґрунтовано визначати необхідну кількість обладнання і ймовірність виконання виробничої програми кар'єра при оперативному плануванні.

**Практична значимість** роботи полягає в тому, що розроблена методика збору та обробки інформації, що дозволяє враховувати працездатність кар'єрного автотранспорту в заданих гірничотехнічних умовах з урахуванням схеми розстановки і типу автомобілів-самоскидів. На підставі методики структурно-статистичного аналізу виявлено деталі і вузли, що лімітують надійність кар'єрних автосамоскидів.

**Результати:** розроблені алгоритмічне забезпечення та методика оптимізації ефективності експлуатації великовантажних автосамоскидів і якості організації транспортного процесу, впровадження яких в умовах ПрАТ «Північний ГЗК» дозволяє скоротити до мінімуму втрати робочого часу на виконання допоміжних операцій і зменшити в 1,2 рази загальне число постів ТО і ТР, а також збільшити коефіцієнт використання календарного фонду часу на 14-17%.

**Ключові слова:** великовантажні автосамоскиди, організація допоміжних робіт, внутрішньокар'єрний пункт

**Pakhomov V.I., Hirin I.V., Tyshchenko V.Yu., Zhaldachenko O.A.** Rational operation of mining trucks

**Purpose.** To establish patterns that connect the mining technical conditions for the mining trucks operation with their use; to substantiate the methods for managing their resource in extreme mining conditions, which increase the efficiency of transport systems in developing a quarry.

**Research methods.** The comprehensive research method includes analysis and generalization of scientific and technical information. It bases the theoretical research on the program-target method, logical, and mathematical methods. Based on the analysis of research, the effectiveness of new technical solutions to increasing the productivity of open-pit road transport is considered. Several private methods are: structural-statistical and program-target analysis, hypothetical and axiomatic methods, and the method of interpretation.

**Scientific novelty.** The proposed classification of the operation conditions for mining trucks according to a complex criterion, based on the structural relationship of scientific and technical solutions to ensure the efficiency of the open pit vehicles in deep open pits; - methodological principles for assessing and forming the quality of mining dump trucks, and choosing the optimal model for specific mining and technical operating conditions; - established quantitative values and laws of distribution of dump trucks reliability, whose calculating the productivity of loading and transport complexes allows to determine the required amount of equipment and fulfilling the production program of a quarry during operational planning.

**Practical significance.** The data on performing open pit transport in the mine considering the layout and type of dump trucks have been collected and processed. Based on the method of structural-statistical analysis, the details and assemblies that limit the reliability of mining trucks have been identified.

**Results.** Algorithmic support, methods for optimizing the rational operation of mining trucks introduced in the PJSC "Nothern GOK" and the quality of the transport process ensure to reduce the loss of working time on auxiliary operations and the total number of maintenance and current repair posts, and to increase the rate of the calendar fund of time by 14-17%.

**Key words:** mining trucks, organization of auxiliary work, intra-quarry post.

UDK 624.02

**Slipych O., Romanenko K., Kravtsova D., Bondar O.** Installation of a stationary hydraulic hammer at a height

**Purpose.** To present a non-standard project for the installation of heavy dynamic equipment at a height - stationary hydraulic hammer.

**Research method.** It has been illuminated the result of visual and instrumental flaw detection performed by special tools of non-destructive testing and laboratory tests and measurements of constructive elements of a building in which it is necessary to install the hammer. The calculations are made in the software complex "LIRA CAD 2013", which implements the finite element method in displacements.

**Scientific novelty.** It has been demonstrated the loads calculation on the foundation of the hammer and the plan for its installation at mark of 13,640 meters. It has been analyzed current methods and recent studies of beam reinforcement.

**Practical significance.** After analyzing current methods and recent studies of beam reinforcement, the authors conclude that reinforcement of beams with metal clamps is the most appropriate in this case. First of all, metal can withstand dynamic loads; it does not crumble under tensile forces. Secondly, economic indicators have played a significant role in the selection of the material: the reinforcement project was ordered in the region of iron ore and steel production, so the cost of metal is much lower than the cost of carbon-fiber tapes.

**Results.** Necessity has been substantiated: (I) strengthening reinforced concrete beams MB52-1 at the mark +13,640 in the axes 4-6 and E-F; (II) installation of steel beams under the foundation of the hammer; (III) installation of shields of the fixed formwork of the hammer foundation. The recommendations were given.

**Key words:** install at the height, strengthening reinforced concrete beams, dynamic load, stationary hydraulic hammer

**Сліпич О.О., Романенко К.М., Кравцова Д.Ю., Бондар О.В.** Установка стаціонарного гідравлічного молота на висоті

**Мета.** У статті представлений нестандартний проект встановлення важкого динамічного обладнання на висоті - стаціонарного гідравлічного молота.

**Методи дослідження.** Був висвітлений результат візуального та інструментального виявлення дефектів, проведеного спеціальними інструментами неруйнівного контролю та лабораторних випробувань та вимірювань конструктивних елементів будівлі, в якій необхідно встановити молоток. Розрахунки проводяться в програмному комплексі "LIRA CAD 2013", який реалізує метод скінченних елементів у переміщеннях.

**Наукова новизна.** Продемонстровано розрахунок навантажень на фундамент молота та план його установки на позначці 13 640 метрів. Проаналізовано сучасні методи та останні дослідження армування балок.

**Практичне значення.** Проаналізувавши сучасні методи та останні дослідження армування балок, автори дійшли висновку, що армування балок металевими хомутами є найбільш доцільним у цьому випадку. Перш за все, метал витримує динамічні навантаження; він не обсыпається під дією сил розтягування. По-друге, економічні показники зіграли значну роль у виборі матеріалу: проект армування був замовлений в районі виробництва залізної руди та сталі, тому вартість металу набагато нижча за вартість вуглеволокнистих стрічок.

**Результати.** Обґрунтовано необхідність: (I) зміцнення залізобетонних балок MB52-1 на позначці +13640 по осях 4-6 та E-F; (II) встановлення сталевих балок під фундамент молота; (III) встановлення щитів нерухомої опалубки молоткового фундаменту. Дано рекомендації.

**Ключові слова:** установка на висоті, зміцнення залізобетонних балок, динамічне навантаження, стаціонарний гідравлічний молот.

УДК 621.311.1

**Сінчук І. О., Бойко С. М., Касаткіна І. В., Дозоренко О. В.** Аспекти розвитку вітроенергетики в умовах залізрудних підприємств

**Мета.** Метою даної роботи є розробка тактики визначення вітрового потенціалу в умовах залізрудних підприємств з подальшим втіленням цього підходу до впровадження вітроенергетичних установок, як джерел автономного живлення в структурах систем електропостачання цих видів підприємств.

**Методи дослідження.** У статті для реалізації мети досліджень використовувалися методи аналізу та синтезу статистичних метеоданих та елементи математичної статистики.

**Наукова новизна** полягає в розробці тактики визначення вітрового потенціалу в умовах залізрудних підприємств, що дозволить враховувати специфіку кожного підприємства галузі з подальшим втіленням цього підходу до впровадження вітроенергетичних установок в структурах систем електропостачання цих підприємств з реорганізацією їх структур з варіанту централізованого живлення електромереж до варіанту з розосередженою генерацією.

**Практична значимість.** Встановлені фактори, що впливають на визначення вітрового потенціалу локальної ділянки земної території залізрудного підприємства з урахуванням особливостей, що характерні для аналізованої проблеми та мають вплив на енергетичні характеристики вітроенергетичної установки як автономного джерела живлення. Модернізовано відомі методи визначення вітрового потенціалу, які інтегруються в універсальний метод оцінювання рівня енергоефективності вітроенергетичних установок згідно специфіки тих чи інших умов їх використання. Результати досліджень рекомендуються для використання при визначенні вітрового потенціалу залізрудних підприємств з метою розробки автономних джерел генерації електричної енергії.

**Результати.** Залізрудні підприємства України володіють незадіяним потенціалом вітрової енергії, що може бути задіяний для генерування електричної енергії автономними джерелами живлення у складі систем електропостачання цих підприємств. Запропонована тактика оцінювання вітрового потенціалу в умовах залізрудних підприємств України, що дозволяє визначати проєктні встановлені електричні потужності вітроустановок в умовах специфіки енергетичних комплексів і систем цих підприємств.

**Ключові слова:** електропостачання, вітроенергетичні установки, вітровий потенціал, залізрудні підприємства.

**Sinchuk I.O., Boiko S.M., Kasatkina I.V., Dozorenko O.V.** Aspects of the development of wind energy at the iron ore enterprises

**Purpose.** To develop tactics for determining the wind potential in the conditions of iron ore enterprises with the subsequent implementation of this approach to the introduction of wind power plants as sources of autonomous power supply in the structures of power supply systems of these types of enterprises.

**Research methods.** The methods of analysis and synthesis of statistical meteorological data and elements of mathematical statistics were used.

**Scientific novelty.** Development of tactics for determining the wind potential in the conditions of iron ore enterprises, which will take into account the specifics of each enterprise in the industry with the subsequent implementation of this approach to the introduction of wind power plants in the structures of power supply systems of these enterprises with the reorganization of their structures from the option of centralized power supply to the option with dispersed generation.

**Practical significance.** The factors influencing the determination of the wind potential of the local area of the earth's territory of the iron ore enterprise, taking into account the features characteristic of the analyzed problem, have been established and affect the energy characteristics of the wind power plant as an autonomous power source. The well-known methods for determining the wind potential have been modernized, which are integrated into a universal method for assessing the level of energy efficiency of wind power plants according to the specifics of certain conditions of their use. The research results can be used to determine the wind potential of iron ore enterprises in Ukraine and the world.

**Results.** Iron ore enterprises of Ukraine have untapped potential of wind energy, which can be used to generate electricity by autonomous power sources as part of the power supply systems of these enterprises. The proposed tactics for assessing the wind potential in the conditions of the iron ore enterprises of Ukraine makes it possible to determine the design installed electrical capacities of wind turbines in the conditions of the specifics of these enterprises.

**Key words:** power supply, wind power plants, wind potential, iron ore enterprises.

УДК 621.383.52

**Козакевич І.А., Будніков К.В.** Предиктивна система керування трифазним інвертором напруги

**Мета** роботи полягає у розвитку предиктивних засобів керування для трифазних інверторів напруги у складі систем автоматизованого електроприводу шляхом прогнозування оцінки змінних стану на наступному інтервалі дискретності системи.

**Методи дослідження.** У роботі використано теоретичний аналіз схеми заміщення системи «інвертор напруги – навантаження» з використанням законів електротехніки, дослідження можливих станів ключів інвертора з використанням методу комутуючих функцій, розробка дискретної прогнозуючої моделі з використанням методу Ейлера, дослідження системи предиктивного керування трифазним інвертором напруги з використанням методів математичного моделювання та аналіз показників синусоїдальності вихідного струму за допомогою методів швидкого перетворення Фур'є.

**Наукова новизна.** Доведено, що використання методів предиктивного керування трифазними інверторами напруги є раціональною альтернативою існуючим підходам на базі широтно-імпульсної модуляції, оскільки інвертор представляє собою елемент з кінцевою кількістю станів, що дозволяє здійснити прогнозування поведінки системи при застосуванні кожного з цих станів.

**Практична значимість.** Предиктивні системи керування можуть знаходити своє втілення у вигляді алгоритмічного та програмного забезпечення мікропроцесорних систем автоматизованих електроприводів.

**Результати.** Представлено аналіз схеми заміщення системи «інвертор напруги – навантаження», розроблено дискретну прогнозуючу модель, що може використовуватися в предиктивних системах керування та проаналізовано варіант функції витрат, що застосовується для оцінки відповідності кожного з варіантів подальшої поведінки системи до бажаної. Складено математичну модель системи у середовищі Matlab/Simulink, що містить предиктивний алгоритм у вигляді S-файлу.

**Ключові слова:** предиктивне керування, інвертор напруги, функція витрат, комутаційний стан, керування струмом

**Kozakevich I.A., Budnikov K.V.** Predictive control system for three-phase voltage inverter

**Purpose.** To develop predictive control tools for three-phase voltage inverters in automated electric drive systems by predictive estimation of state variables in the next interval of system discreteness.

**Research methods.** The theoretical analysis of the equivalent scheme of the system "voltage inverter – electric load" using the laws of electrical engineering, study of possible states of inverter switches using the method of switching functions, development of a discrete predictive model using the Euler method, study of predictive control of three-phase voltage inverter methods of mathematical modeling and analysis of sinusoidal indices of the output current using methods of fast Fourier transform.

**Scientific novelty.** The use of predictive control methods for three-phase voltage inverters is a rational alternative to existing approaches based on pulse-width modulation, because the inverter is an element with a finite number of states, which allows predicting system behavior using each of these states.

**Practical significance.** Predictive control systems can be realized in the form of algorithmic and software microprocessor systems of automated electric drives.

**Results.** The analysis of the equivalent scheme of the system "voltage inverter – electric load", developing a discrete predictive model that can be used in predictive control systems and analyze of the cost function using to assess the compliance of each of the options for further behavior of the system to the desired. It is proposed to use the distance between the reference current vector and its predicted value for the next discrete interval as a cost function. A mathematical model of the system in the Matlab / Simulink environment is constructed, which contains a predictive algorithm in the form of an S-file. The considered approach to the implementation of predictive current control of a three-phase inverter can be considered as an alternative to existing methods of pulse-width modulation, allows to obtain output current with low harmonic distortion.

**Key words:** predictive control, voltage inverter, cost function, switching state, current control

УДК 621.926.23.001.2

**Кляцький В.І., Бугай Л.А., Запорожець Н.С.** Експериментальні дослідження технологічних параметрів конусної дробарки мілкого дроблення

**Мета.** Експериментальна розробка конструкції футировочної броні дробарки дрібного дроблення, що утворюють камеру дроблення, і вплив її на технологічні параметри.

**Методи досліджень.** У роботі застосовані загальноприйняті методи теорії дроблення, варіаційного обчислення, статистичної обробки експериментальних і теоретичних досліджень, великим об'ємом лабораторних експериментів з використанням сучасних методик і вимірювальної апаратури. Для проведення експериментів застосовувалося рототабельне планування другого порядку з наступною обробкою результатів на ЕОМ.

**Наукова новизна.** Дослідження методів і засобів підвищення ефективності роботи конусних дробарок базується на більш-менш повному обсязі обліку діючих факторів і призводить до необхідності розгляду цілого комплексу причин. Проведено експериментальні дослідження, що включають визначення впливу профілю камери дроблення, твердості гірських порід, величини розвантажувальної щілини, на продуктивність і якість продукту дроблення. Встановлено математичну модель у вигляді рівнянь регресії, отриманих статистичними методами на базі експериментів, зібраних безпосередньо при проведенні експериментів. Для вирішення поставлених завдань було використано метод рототабельного планування другого порядку, який дозволив поряд з отриманням математичної моделі процесу, провести статистичну оцінку отриманих результатів. При плануванні експериментів в якості змінних факторів прийняті: обсяг камери дроблення, міцність подрібнювальних руд, розмір розвантажувальної щілини, довжина зони калібрування.

**Практична значимість.** На моделі конусної дробарки дрібного дроблення (М 1: 5) проведено експериментальні дослідження по визначенню впливу профілю камери дроблення при різних значеннях розвантажувальної щілини дробарки, що переробляє різну по міцності руду на продуктивність дробарки і вихід готового класу продукту дроблення.

**Результати.** Отримано оптимальні значення обсягу камери дроблення, розмір розвантажувальної щілини, довжина зони калібрування при різних конструктивно-механічних параметрах моделі конусної дробарки дрібного дроблення з різними профілями камери дроблення.

**Ключові слова:** конусна дробарка, камера дроблення, профіль.

**Klyatsky V.I., Buhai L.A., Zaporozhets N.S.** Experimental studies of process parameters of the fine cone crusher

**Purpose.** The experimental development of the armor lining design of the fine crusher which forms the crusher chamber and its impact on process parameters.

**Research methods.** Generally accepted methods of crushing theory, variational calculus, statistical processing of experimental and theoretical studies, extensive laboratory experiments using modern methods and measuring instruments have been used. To conduct the experiment, the second-order rotatable design followed by computer-based result processing has been applied.

**Scientific novelty.** The study on the methods and means of increasing the effectiveness of cone crusher performance is based on the fairly full consideration of the involved factors and results in the necessity to examine the complex set of causes. Experimental studies have been carried out. They include determining the influence of crushing chamber profile, rock hardness, the size of the crusher opening on the productive capacity, and product quality. The mathematical model in the form of regression equation obtained by statistical methods on the basis of experiments and during the experiments has been defined. To solve the set goals the method of the second-order rotatable design was used. It allows not only obtaining the mathematical model of the process but carrying out the statistical assessment of the results as well. When planning the experiments the crushing chamber volume, the hardness of the crushed ore, the size of the crusher opening, the length of the calibration area are taken as variable factors.

**Practical significance.** Experimental studies have been conducted on the fine cone crusher model (М 1 : 5) to define the impact of crusher chamber profile under different values of the crusher opening, processing ore with a different hardness on crusher capacity, and finished product output.

**Results.** It has been determined the optimal values of crushing chamber volume, the size of the crusher opening, the length of the calibration area under the different design, and mechanical parameters of the fine cone crusher model with different crushing chamber profiles.

**Key words:** cone crusher, crushing chamber, profile

УДК 622.1:528.024

**Долгіх Л.В., Діхтіяр С.В., Томашевська А.О.** Використання методів цифрової фотограмметрії в умовах підземних гірничих виробок

**Мета.** Метою роботи є дослідження питання використання методів цифрової фотограмметрії в умовах підземних гірничих виробок для підвищення ефективності маркшейдерського забезпечення гірничих робіт.

**Методи досліджень.** В роботі використані методи теоретичного аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, на основі якого обґрунтована доцільність розробки та впровадження у виробництво цифрових технологій для вирішення задач маркшейдерського забезпечення гірничих робіт, а також використані експериментальні роботи з дослідження впливу складних умов підземної розробки родовищ на якість цифрового знімання.

**Наукова новизна.** В роботі запропоновано шляхи удосконалення методик виконання орієнтирно-з'єднувальних зйомок та передачі позначки на глибокі горизонти шахти з використанням сучасних наукових досягнень в галузі приладобудування та програмного забезпечення вимірювальних та обчислювальних робіт. Розглянуто можливість використання цифрової зйомки для підвищення ефективності цих робіт, для чого виконані експериментальні роботи з дослідження впливу стиснених умов шахти, обмеженої видимості та вологості повітря. Встановлена можливість використання фотограмметричних методів, які забезпечать високу оперативність виконання робіт та необхідну точність. Визначено основні фактори впливу на точність маркшейдерських зйомок, які виконуються з використанням цифрової фотограмметрії в умовах, наближених до підземних розробок.

**Практична значимість.** Встановлені переваги та недоліки використання сучасних приладів та методів виконання орієнтирно-з'єднувальних зйомок та передачі висотних позначок на глибокі горизонти шахт у порівнянні з традиційними методами, дозволили визначити напрям їх удосконалення. Виконані роботи сприяють розробці більш ефективних методів маркшейдерських робіт зі встановлення зв'язку між різними горизонтами та денною поверхнею.

**Результати.** Досліджено можливість та точність визначення центра марки з близької відстані, що відповідає стислим умовам шахти. Визначено точність, з якою необхідно вимірювати відстані між марками, встановленими на різних горизонтах орієнтування, для яких визначається перевищення з використанням фотограмметричних методів. Досліджено ступінь впливу величини експозиції на точність моделі шахтного ствола, побудованої по цифрових знімках, визначено необхідну кількість контрольних точок та методу передрозрахунку точності вимірювань.

**Ключові слова:** висотна позначка, маркшейдерська зйомка, цифрова фотограмметрія, гірничі виробки.

**Dolgikh L.V., Dikhtiar S.V., Tomashevskaya A.O.** Digital photogrammetry methods in underground mining

**Purpose.** To study the issue on applying digital photogrammetry methods in underground mine workings to increase the efficiency of mine surveying support for mining operations.

**Research methods.** The methods of theoretical analysis of domestic and foreign experience, on the basis of which the feasibility of the development and implementation of digital technologies for solving the problems of mine surveying support of mining operations is substantiated, as well as experimental work is used to study the influence of difficult conditions of underground mining on the quality of digital photography.

**Scientific novelty.** Improving the methodology for performing orientation-connecting surveys and transferring the mark to the deep horizons of the mine using modern scientific achievements in the field of instrument engineering and software for measuring and computational work. The possibility of using digital imagery to improve the efficiency of these works was considered, for which experimental work was carried out to study the effect of confined mine conditions, limited visibility, dustiness and air humidity. The possibility of using photogrammetric methods has been established, which will ensure high efficiency of work performance and the required accuracy. The main factors of influence on the accuracy of mine surveying, which are carried out using digital photogrammetry in conditions close to underground mines, have been determined.

**Practical significance.** The advantages and disadvantages of using modern devices and methods for performing orientation-connecting surveys and transferring elevation marks to deep horizons of mines in comparison with traditional methods enabled to determine the direction of their improvement. The development of more effective methods of mine surveying to establish a connection between different horizons and the day surface.

**Results.** The possibility and accuracy of determining the center of the mark from a close distance, which corresponds to the constrained conditions of the mine, has been explored.

The accuracy with which it is necessary to measure the distances between marks set at different orientation horizons, for which the excess is determined using photogrammetric methods, has been determined. The degree of influence of the exposure value on the accuracy of the mine shaft model constructed from digital images was investigated, the required number of control points and the method for predicting the measurement accuracy were explored.

**Key words:** elevation, mine surveying, digital photogrammetry, mine workings.

УДК 621.314.26

**Козакевич І.А., Сіянюк Р.В.** Система керування мережевим модульним багаторівневим перетворювачем

**Мета** роботи полягає у розробці системи керування мережевим модульним багаторівневим перетворювачем з використанням орієнтації за вектором напруги в мережі та отримання основних аналітичних залежностей, що описують функціонування такої системи.

**Методи досліджень.** У роботі використано методи аналізу напівпровідникових перетворювачів для аналізу схеми модульного багаторівневого випрямляча, методи координатних перетворень для розділення складових, що впливають на активну та реактивну потужності перетворювача, методи теорії автоматичного керування для синтезу регуляторів струму з використанням внутрішньої моделі.

**Наукова новизна.** Розроблено теоретичні аспекти функціонування системи керування модульним багаторівневим випрямлячем з використанням орієнтації за вектором напруги, що відрізняється від існуючих врахуванням перекресних зв'язків між осями  $d$  та  $q$ , а також налаштуванням параметрів регуляторів струму з використанням внутрішньої моделі.

**Практична значимість.** Представлена система керування може слугувати основою для розробки схемних рішень щодо побудови випрямної частини схем перетворення енергії автоматизованих електроприводів з двигунами, що мають середній рівень номінальної напруги.

**Результати.** Розглянуто можливість використання схеми модульного багаторівневого перетворювача в якості основи для побудови чотириквadrантного електроприводу, де дана схема буде використовуватися як у інверторній, так і у випрямній частинах. Проаналізовано основні властивості системи з орієнтацією за вектором напруги мережі та встановлено, що її використання дозволяє забезпечити роздільне керування величинами активної та реактивної потужностей. Представлено рекомендації щодо налаштування параметрів ПІ-регуляторів струму такої системи.

**Ключові слова:** модульний перетворювач, середній рівень напруги, електропривод, орієнтація за напругою, активна потужність, реактивна потужність

**Kozakevich I.A., Siianko R.V.** Grid-side modular multi-level converter control system

**Purpose.** To develop a control system for a grid-side modular multi-level converter using the orientation of the voltage vector in the grid and to obtain the basic analytical dependences that describe the functioning of such a system.

**Research methods.** The methods of semiconductor power converter analysis for the analysis of the modular multilevel rectifier circuit, coordinate transformation methods for separation of components influencing the active and reactive power of the converter, methods of automatic control theory for synthesis of current controllers using internal model are used.

**Scientific novelty.** Theoretical aspects of the operation of the control system of a modular multilevel rectifier using the orientation of the voltage vector, which differs from the existing ones, taking into account the cross-links between the d and q axes, as well as adjusting the parameters of current controllers using the internal model.

**Practical significance.** The presented control system can serve as a basis for the development of circuit solutions for the construction of the rectifier part of the energy conversion circuits of automated electric drives with motors having an medium level of rated voltage.

**Results.** The possibility of using the scheme of the modular multilevel converter as a basis for construction of the four-quadrant electric drive where this scheme will be used both in inverter and in rectifier parts is considered. The main properties of the system with the orientation of the network voltage vector are analyzed and it is established that its use allows to provide separate control of the values of active and reactive powers. In this case, the control system can be built on the principle of subordinate control with external control circuits of the active and reactive power of the converter, and the internal circuits control the current projections on the axis of the coordinate system rotating synchronously with the mains voltage vector. Recommendations for adjusting the parameters of PI current controllers of such a system are presented.

**Key words:** modular converter, medium voltage level, electric drive, voltage orientation, active power, reactive power

УДК 004.896:681.3:621.311

**Котов І.А.** Інтелектуальна підтримка автоматизації диспетчерського керування енергосистемою з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів

**Мета.** Виклад результатів дослідження з розробки і впровадження методів отримання числових характеристик оперативного керування режимом енергосистеми в аварійних ситуаціях та побудови на цій основі бази знань інтелектуальної системи автоматизації керування. Розглянуто підходи до інтелектуальної підтримки автоматизації прийняття управлінських рішень диспетчерського персоналу енергосистеми. В якості додаткового завдання поставлено врахування імовірнісного характеру навантаження вузлів.

**Методи дослідження** полягають у використанні методів теорії імовірності, теорії множин, математичної логіки, теорії автоматів, електроенергетичних систем, теорії графів, математичної статистики. Величини керуючих впливів формуються в результаті планування та реалізації розрахункових експериментів оцінки множини аварійних режимів електричної мережі енергосистеми. Враховано закони розподілу випадкових величин навантажень споживачів.

**Наукова новизна** полягає в новій моделі включення різних форм лінгвістичних знань, представлених єдиною онтологічною моделлю, та числових параметрів чутливості режиму енергосистеми до керуючих дій у інтегровану базу знань, що дозволяє створити побудову ефективних інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень та впровадження їх в діючу автоматизовану диспетчерську систему диспетчерського керування. Величини керуючих дій обчислюються з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів електричної мережі.

**Практична значимість.** Побудова бази знань диспетчерського керування режимом електричної мережі з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів, що дозволяє реалізувати програмний комплекс системи підтримки прийняття рішень, спрямованої на автоматизацію диспетчерського керування в режимі нормального та аварійного режимів енергосистем. Застосування запропонованого підходу до побудови бази знань та його використання для підтримки прийняття рішень персоналом диспетчерської служби підвищує надійність керування та збільшує час безперервної роботи оперативного персоналу із забезпеченням надійної ліквідації аварій.

**Результати.** Методи отримання та побудови бази професійних знань з урахуванням імовірнісного характеру навантаження вузлів для підтримки диспетчерського керування режимами енергосистем. Результати розрахунків для аварійного режиму дозволяють будувати функції впливу та визначати коефіцієнти матриці чутливості. Отримані набори даних режимів, що використовуються як компоненти бази знань, дозволяють ефективно оцінювати та корегувати аварійний режим шляхом автоматизації інтелектуальної підтримки процесу його диспетчеризації.

**Ключові слова:** аббревіатура, аварійний режим, закон розподілу, ймовірність, матриця чутливості, режим, сенсорна точка, цільова функція

**Kotov I.A.** Intelligent support for automation of the power system control with the probability of node loads

**Purpose.** To present the results of a study on the development and implementation of methods for obtaining numerical characteristics of operational control of the power system in emergencies and building on this basis the knowledge base of intelligent control automation system. Approaches to intellectual support of automation of decision-making of management decisions of power system control personnel are considered. As an additional task, the task of taking into account the probabilistic nature of the load on the nodes is set.

**Research methods.** The methods of probability theory, set theory, mathematical logic, automata theory, power systems, graph theory, mathematical statistics. The values of control effects are formed as a result of planning and implementation of

computational experiments for estimating the set of emergency modes of the electrical network of the power system. The laws of distribution of random values of loads of consumers are considered.

**Scientific novelty.** A new model of incorporating various forms of linguistic knowledge represented by a single ontological model and numerical parameters of the power system mode from control effects into an integrated knowledge base, which allows to create effective intelligent decision support systems and implement them in the existing automated system. management. The values of the control effects are calculated taking into account the probabilistic nature of the load on the nodes of the electrical network.

**Practical significance.** Building a knowledge base of dispatch control of the electrical network, taking into account the probabilistic nature of the load nodes, allows to implement a software package of decision support aimed at automating dispatch control in normal and emergency modes of power systems. The application of the proposed approach to the construction of the knowledge base and their use to support decision-making by the staff of the dispatching service increases the reliability of management and increases the time of continuous work of operational personnel to ensure reliable elimination of accidents.

**Results.** Methods of obtaining and building a base of professional knowledge, taking into account the probabilistic nature of the load nodes to support the control of power systems. The results of calculations for the emergency mode allow to build influence functions and to determine the coefficients of the sensitivity matrix. The obtained sets of data modes, used as components of the knowledge base, allow you to effectively assess and adjust the emergency mode by automating the intelligent support of the process of its scheduling.

**Key words:** abbreviation, emergency mode, distribution law, probability, sensitivity matrix, mode, sensor point, target function

УДК 622.25

**Гулівець О.А. , Попов С.О. , Бондарець А.О. , Олійник С.Ю.** Деякі питання коригування експлуатаційних параметрів шахтного підйому за результатами обстеження і математичного моделювання армування вертикальних стволів шахт

**Мета.** Мета дослідження – установити залежності для коригування експлуатаційних параметрів шахтного підйому за результатами обстеження технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

**Метод дослідження.** Метод дослідження – аналітичний.

**Наукова новизна.** Установлені залежності для коригування експлуатаційних параметрів шахтного підйому за результатами обстеження технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

**Практична значимість.** Застосування одержаних залежностей дозволяє визначити раціональні значення швидкості підйому скіпів та їх вантажності на основі даних обстеження технічного стану армування вертикальних стволів шахт.

**Результати.** На основі аналізу конструкцій армування вертикальних стволів шахт та робочого процесу системи «армування – під’ємна посудина» встановлено, що при русі по стволу під’ємних посудин виникає комплекс навантажень на елемент армування, які виникають внаслідок відхилень провідників від лінійної форми, наявності ексцентриситету завантажених скіпів, кручення підйомних посудин, дії коріолісової сили.

В процесі експлуатації відхилення провідників від проектного положення може збільшуватись в декілька разів. Крім цього внаслідок агресивного впливу шахтних вод і атмосфери ствола елементи його армування в певній мірі піддаються корозії. У зв’язку з цим виникає необхідність коригувати експлуатаційні параметри шахтного підйому відповідно фактичному значенню несучої здатності елементів армування вертикальних стволів шахт.

На основі аналізу конструктивних рішень армування ствола і робочого процесу системи «армування – під’ємна посудина» та застосувавши принцип сумісності деформацій провідника та розстрільної балки під дією горизонтального навантаження встановлені залежності розподілу прикладеної сили між ними залежно від їх довжини і фактичних значень геометричних характеристик їх поперечних перерізів та механічних характеристик їх матеріалів.

На основі виконання умов міцності провідника та розстрільної балки визначаються раціональні значення швидкості підйому та маси завантаженого скіпа.

**Ключові слова:** шахта, вертикальний ствол, армування ствола, провідники, розстрільні балки, допустиме напруження, умова міцності.

**Gulivets O.A. , Popov S.O. , Bondarets A.O. , Oliynyk S.Yu.** On correction of the operational parameters of a mining lift according to the survey results and mathematical modeling of the reinforcement of vertical shafts of mines

**Purpose.** The purpose of the study is to establish dependencies for adjusting the operational parameters of a mine lift based on the results of a survey of the technical condition of the reinforcement of vertical shafts of mines.

**Research method.** The research method is analytical.

**Scientific novelty.** Dependencies have been established for adjusting the operational parameters of a mine lift based on the results of a survey of the technical condition of the reinforcement of vertical shafts of mines.

**Practical significance.** The use of the obtained dependencies makes it possible to determine the rational values of the lifting speed of the skips and their carrying capacity based on the data of the survey of the technical state of the reinforcement of vertical shafts of mines.

**Results.** Based on the analysis of the structures of the reinforcement of vertical shafts of mines and the working process of the «reinforcement - lifting vessel» system, it has been established that when moving along the trunk of the lifting vessels, a complex of loads arises on the reinforcement element, which arise due to deviations of the conductors from the linear shape, the presence of eccentricity of loaded skips, torsion of lifting vessels, the action of the Coriolis force.

During operation, the deviation of the conductors from the design position can increase several times. In addition, as a result of the aggressive action of mine waters and the atmosphere of the shaft, the elements of its reinforcement are corroded to a certain extent. Therefore, it is necessary to adjust the operating parameters of the mine lift according to the actual value of the bearing capacity of the reinforcing elements of the vertical mine shafts.

Based on the analysis of the structural solutions of the barrel reinforcement and the working process of the "reinforcement - lifting vessel" system and applying the principle of compatibility of the deformations of the conductor and the shooting beam under the action of a horizontal load, the dependences of the distribution of the applied force between them were established depending on their length and the actual values of the geometric characteristics of their cross-sections and the mechanical characteristics of their materials.

Based on the fulfilment of the strength conditions of the conductor and the shot beam, rational values of the lifting speed and the mass of the loaded skip are determined.

**Key words:** mine, vertical shaft, shaft reinforcement, conductors, shot beams, allowable stress, strength condition.

УДК 621.181:62

**Суртасв В.В.** Підвищення загальної ефективності теплоенергетичних установок, теплових схем систем, пристроїв, установок утилізації тепла

**Мета** підвищення загальної ефективності теплоенергетичних установок, теплових схем систем, пристроїв, установок утилізації тепла - наукове завдання, проблема. Також метою розрахунків теплоутилізаторів є визначення показників стану робочих тіл (РТ) і потоків обміну теплоти й маси РТ у теплоутилізаторах з термодинамічної точки зору являють собою гомогенні або гетерогенні системи. От далеко не повний перелік актуальних питань, наукових задач і проблеми, рішення яких неможливо без розробки спеціальних методик рішення інженерно-технічних завдань, актуальних наукових задач і проблеми проектування й будівництва контактних тепломасообмінних апаратів.

**Методи дослідження.** Теоретичні положення, методи, постановка завдання, моделі, граничні рівноважні стани робочих тіл, узагальнені безрозмірні показники рішення завдань сталого тепло- і масопереносу тепло й масообміну в апаратах утилізації теплоти.

**Наукова новизна** полягає в тому, що рішення проблеми створення конденсаційно-охолоджувального пристрою установки системи пристрою утилізації тепла з теплоутилізатором на базі "форсункових камер" і ін., вимагає врахування різних факторів, що впливають на інтенсифікацію процесів тепломасообміну, що у свою чергу дозволяє вибрати найбільш раціональні режими роботи пристрою і вирішальним образом позначається на їх ефективності.

**Практична значимість.** Інтенсифікація тепломасообміну в конденсаційно-охолоджувальному пристрої установки, системи, пристрою з теплоутилізатором на базі "форсункових камер" досягається: високою відносною швидкістю теплоносія, що розпилюється, розвиненістю поверхні контакту між середовищами, високою дисперсністю часток теплоносія, що розпилюється, щільністю заповнення реактивного простору взаємодіючими середовищами, рівномірністю розподілу парогазового потоку уздовж поперечного перерізу контактного апарата, виконаного на базі "форсункової камери", раціональним вибором часу контакту середовищ, характером взаємного руху контактуючих середовищ.

**Результати.** Підвищення загальної ефективності теплоутилізаторів виконаних на базі "форсункових камер".

**Ключові слова:** форсунка, форсункова камера, система, пристрій, установка, ефективність, тепло- і масообмін, фактори.

**Surtaev V. V.** Improving the overall efficiency of heat and power plants, thermal circuits of systems, devices, heat recovery units

**Purpose.** Improving the overall efficiency of thermal power plants, thermal schemes of systems, devices, heat recovery plants, scientific task, the problem of improving the overall efficiency of various thermal power plants, their thermal schemes, systems of heat recovery devices, is not a complete list of current issues, scientific problems and problems, the decision of which is impossible without development of special techniques of the decision of engineering and technical problems, actual scientific problems and problems of designing and construction of contact heat and mass exchangers. Also the purpose of calculations of heat utilizers is definition of indicators of a condition of working working substances and streams of an exchange of heat and weight working substances in heat utilizers from the thermodynamic point of view represent homogeneous or heterogeneous systems.

**Research methods.** Theoretical propositions, methods, problem statement, models, limiting equilibrium states of working substances (bodies), generalized dimensionless indices for solving problems of constant heat and mass exchanges of heat and mass exchanges in heat recovery devices.

**Scientific novelty.** Solving the problem of creating a condensation-cooling device for installing a system of a heat recovery device with a heat exchanger based on a chamber with atomizers, is indicated by their effectiveness.

**Practical significance.** Intensification of heat and mass exchanges in the condensation-cooling device of an installation, system, device with a heat exchanger based on a chamber with atomizers, is achieved by: a high relative velocity of the coolant that is sprayed, the development of the contact surface between the media, high dispersion of the particles of the coolant that is sprayed, filling density the reactive space by interacting environment, the uniformity of the distribution of the vapor-gas flow along the cross-section of the contact apparatus made on the basis on a chamber with atomizers, the rational choice of the time of the contact of the environment, the nature of the mutual movement of the contacting environment.

**Results.** Improving the overall efficiency of heat exchangers made on the basis of "nozzle chambers".

**Key words:** atomizers, a chamber with atomizers, system, device, installation, efficiency, heat and mass exchange, factors.

УДК 622.013: 622.012.2

**Андрєєв Б.М., Бровко Д.В., Хворост В.В., Кононенко В.В., Романенко О.В.** Обґрунтування річної продуктивності відпрацювання запасів Васіновського родовища

**Мета.** Виробництво залізної руди в світі протягом останніх років постійно зростає в зв'язку з ростом попиту, при цьому спостерігається тенденція до посилення концентрації виробництва. На тлі закриття дрібних рудників, великі виробництва розширили свої потужності. Огляд і аналіз сучасного світового досвіду будівництва і експлуатації

шахт на крутопадаючих родовищах міцних руд дозволяє говорити про ряд характерних тенденцій у розвитку геотехнологій, які без сумніву можуть бути перенесені і адаптовані для гірничо-геологічних умов Васіновського родовища. **Методи дослідження.** При вирішенні поставленої задачі використовуються сучасні програмні комплекси для моделювання розвитку запроєктованих рішень, з урахуванням взаємодій та явищ. Вони відрізняються способами завдання вихідних параметрів, та мають свої певні інструменти для аналізу отриманих результатів.

**Наукова новизна.** Актуальність даної роботи пов'язана із розв'язанням поставленої задачі. Її результатом є встановлення залежності річної продуктивності пускового комплексу за гірськими можливостями та за умови розкриття декількох покладів. Моделювання можливого розміру річного видобутку в залежності від стану, в якому перебуває підприємство.

**Практична значимість.** Дослідження дають змогу оцінити можливу інтенсивність відпрацювання обсягів підземного видобутку на родовищі та спрогнозувати термін служби періоду відпрацювання розвіданих запасів.

**Результати.** В роботі обґрунтовано продуктивність гірничих підприємств, що адаптовані для гірничо-геологічних умов Васіновського родовища. Встановлено річну продуктивність пускового комплексу за гірськими можливостями та за умови розкриття покладу Західний. Визначені умови збільшення можливої інтенсивності відпрацювання обсягу підземного видобутку на родовищі, а також недоліки розглянутих аналітичних методів визначення оптимальної потужності рудника. Вивчено вплив геометричних параметрів охоронного цілика, розташованого в межах Центрального покладу, на значення річної продуктивності пускового комплексу по даному покладу.

**Ключові слова:** залізна руда, шахта, круто-падаюче родовище, гірничо-геологічні умови.

**Andreev B.M., Brovko D.V., Hovorost V.V., Kononenko V.V., Romanenko O.B.** Substantiation of annual productivity of the Vasinovsky deposit development

**Purpose.** Iron ore production in the world is constantly increasing due to growing demand with a tendency to increase the concentration of production. Large-scale production has expanded its capacity, while small mines have been closed. Review and analysis of modern world experience in the construction and operation of iron ore mines of steeply falling deposits allows us to highlight characteristic trends in the development of geotechnologies, which can be transferred and adapted to mining and geological conditions of Vasinovsky deposit.

**Research methods.** In solving this problem, modern software packages are used to model the development of designed solutions, considering interactions and phenomena. They differ in the ways of setting the initial parameters and have the specific tools for analyzing the results.

**Scientific novelty.** The establishment of the dependence of the annual productivity of the launch complex mountain opportunities and conditions to the deposits development. Modeling of the size of annual production depending on a condition in which the enterprise is.

**Practical significance.** The research enables to estimate the intensity of underground mining production at the field and to predict the service life of development of explored reserves.

**Results.** The paper substantiates the productivity of mining enterprises that are adapted to the mining and geological conditions of the Vasinovsky field. The annual productivity of the launch complex according to the mountain opportunities and the condition of opening the Western deposit has been established. The conditions for increasing the intensity of underground mining at the field, as well as the shortcomings of the considered analytical methods for determining the optimal capacity of the mine. The influence of geometrical parameters of the security pillar within the Central deposit on the value of the annual productivity of the launch complex deposit has been studied.

**Key words:** iron ore, mine, steeply falling deposit, mining and geological conditions.

УДК 681.5:621.311.243

**Романов С.О., Грамм О.О., Савицький О.І.** Модель системи керування процесами генерації активної та компенсації реактивної потужності на сонячних електростанціях

**Мета.** Метою статті є розробка моделі системи керування сонячною електростанцією за умов роботи її у відповідності до вимог мережі та з урахування потреб споживача, яким постає оператор систем передачі електроенергії.

**Методи дослідження.** Методи дослідження в даній роботі включають аналітичне дослідження систем генерування електроенергії від сонячного випромінювання та математичне моделювання генерування електроенергії.

**Наукова новизна.** Вперше запропоновано систему керування, що дозволяє працювати сонячній електростанції за різних режимів роботи. Такі режими роботи включають в себе як стандартний режим на генерування максимальної активної потужності за будь-яких умов, так і роботу у неоптимальному режимі за умов отримання замовлення на електроенергію від оператора систем передачі. Такими неоптимальними режимами є резервування активної енергії для компенсації коливання частоти, внаслідок динамічної зміни погодних умов, а також за підтримки неадекватного значення активної потужності при отриманні замовлення від споживача. Також система здатна працювати у випадку отримання замовлення на реактивну потужність, що може спричинити зменшення генерування активної потужності за рахунок встановлення пріоритету компенсації електростанцією реактивної потужності.

**Практична значимість.** В статті приводиться модель системи керування сонячною електростанцією, яка виступає основою для подальшого моделювання її роботи. Встановлено залежності активної та реактивної енергії в залежності від умов навколишнього середовища та при різних режимах роботи електростанції, що виражається у зонах можливості генерування потужностей СЕС.

**Результати.** В результаті проведеної роботи встановлено можливість роботи електростанції не тільки за її стандартного режиму, а й у неоптимальних точках потужності за рахунок впровадження системи керування, що є базою для подальшої розробки більш складних систем керування з урахуванням більшої кількості факторів, а не лише вимог мережі та еталонного значення потужностей.

**Ключові слова:** система керування, сонячна електростанція, активна потужність, реактивна потужність, генерування, компенсація, електроенергія.

**Romanov S.O., Hramm O.O., Savytskyi O.I.** Control system model for active power generation and reactive power compensation processes at solar power plants

**Purpose.** To develop a model of a solar power plant control system under the conditions of its operation in accordance with the requirements of the network and considering needs of the consumer, which is the operator of electricity transmission systems.

**Research methods.** Research methods in this paper include analytical research of electricity generation systems from solar insolation and mathematical modeling of electricity generation.

**Scientific novelty.** A control system allows a solar power plant to operate in different operating modes. Such modes of operation include both the standard mode for generating the maximum active power under any conditions, and operation in the suboptimal mode under the conditions of receiving an order for electricity from the transmission system operator. Those suboptimal modes are the reservation of active energy to compensate frequency fluctuations, due to the dynamic weather conditions changes, as well as maintaining the maximum value of active power when receiving an order from the consumer. The system is also able to operate with an order for reactive power compensation, which can reduce active power generation by prioritizing reactive power compensation at the power plant.

**Practical significance.** The article presents a model of a solar power plant control system, which serves as a basis for further modeling of its operation. The dependences of active and reactive energy in case of any environmental conditions and at different operation modes of the power plant, which is expressed in the power operating areas at solar power plant.

**Results.** As a result of this work, the power plant can operate not only in its standard mode, but also in suboptimal power points due to the implementation of a control system, which possibly will be a good start for further development of more complex control systems considering more factors than only grid and reference power values.

**Key words:** control system, solar power plant, active power, reactive power, generation, compensation, electricity.

УДК622.274.3

**Кушнерьов І.П., Кривенко Ю.Ю., Максимов І.І.** Утворення компенсаційного простору в лежачому боці похилого потужного покладу

**Мета.** Удосконалення систем розробки корисних копалин для підвищення показників вилучення рудної маси з виїмкової одиниці шляхом розробки та обґрунтування нового способу утворення та місця розташування компенсаційного простору при відпрацюванні похилих рудних покладів на глибоких горизонтах шахт.

**Методи досліджень.** Аналіз та узагальнення існуючих технологій виїмання рудних покладів, процесів стійкості оголень порід, теоретичне та практичне встановлення параметрів компенсаційного простору та моделювання схем і порядку його створення в залежності від показників втрат та засмічення корисних копалин.

**Наукова новизна.** Обґрунтовані необхідність та можливість застосування камерних систем розробки на глибоких горизонтах рудних шахт. На основі встановлених залежностей об'єму компенсаційного простору по руді та породі в лежачому боці покладу, його черговості створення розроблена нова за формою та конструкцією компенсація для відбійки масиву руд в очисному блоці. Вперше встановлено алгоритм виконання робіт по утворенню компенсаційного простору в залежності від кута падіння покладу, природного укосу обваленої рудної маси та конструктивних елементів системи розробки в умовах активної дії гірського тиску.

**Практична значимість.** Розроблена інноваційна конструкція компенсаційного простору та технологічна схема його утворення на межі контакту рудного покладу з породами лежачого боку у вигляді зрізаного площиною по лінії падіння покладу конуса. Параметри компенсації пов'язані з розмірами блоку, кутом падіння покладу та можливістю виконання селективного випуску порід для утворення компенсаційного простору першої черги, що дозволяє знизити втрати та засмічення корисних копалин на виїмковій ділянці та підвищити ефективність добування руд.

**Результати.** Виконано аналіз сучасного стану застосування систем розробки рудних покладів на досягнутих глибинах шахт. Розроблена технологічна схема утворення запропонованого компенсаційного простору може бути використана при розробці родовищ корисних копалин в інших гірничо-геологічних умовах. Використання даної моделі дозволяє підвищити ефективність відпрацювання запасів очисного блоку, значно зменшити втрати та засмічення рудної маси на лежачому боці і, в цілому, у виїмальній одиниці при її випуску. Також оптимізується час стояння конструктивних елементів системи розробки, підвищується інтенсивність випуску рудної маси та на 3...5% зменшується собівартість видобутку руди при її очисному виїманні.

**Ключові слова:** рудні поклади, компенсаційний простір, система розробки, форма та місце компенсації, схема утворення, вилучення рудної маси

**Kushneriov I.P., Kryvenko Yu.Yu., Maksymov I.I.** Formation of compensation space in the lying inclined ore deposits

**Purpose.** Improving mineral development system to increase the ore extraction from the excavation unit by developing and justifying a new method of forming the compensation space when developing inclined ore deposits in the deep horizons.

**Research methods.** Analysis and generalization of existing ore extraction technologies, outcrops stability, theoretical and practical establishment of compensation space parameters, modeling the schemes and its sequence of creation with regards to indicators of losses and clogging of minerals.

**Scientific novelty.** Necessity and possibility of the chamber system development in the deep ore mines. A new compensation for the ore mass shape and construction in the treatment block is designed. The algorithm for work on compensation space formation depending on the angle of the deposit incidence, the natural slope of the collapsed ore and structural elements of the development system under active rock pressure.

**Practical significance.** An innovative design of the compensation space and a technological scheme of its formation at the contact boundary of the ore deposit with the rocks of the lying side as a plane cut along the incidence line of the cone deposit. Optimizing the compensation reduces losses and clogging of minerals in the excavation site and increases ore mining efficiency.

**Results.** The analysis of the current ore deposit development systems at the achieved depths of mines is performed. The technological scheme of the proposed compensation space can be used in the development of mineral deposits in other

mining and geological conditions. The model allows to increase the efficiency of working off the deposit of the treatment block, reduce the loss and clogging of the ore mass on the lying side. The lifespan of the development system structural elements is optimized, the intensity of ore mass production is increased and the cost of ore extraction during its extraction is reduced.

**Key words:** ore deposits, compensation space, development system, form and place of compensation, formation scheme, ore mass extraction

УДК 621.8:00494

**Бондар О.В., Кравцова Д.Ю., Чумак А.С.** Порівняння САПР КОМПАС-3D і PowerSHAPE по критеріям функціональності та економічності

**Мета** даної статті полягає у визначенні переваг і недоліків використання програмного забезпечення (ПЗ) КОМПАС-3D і PowerSHAPE для побудови корпусних деталей і визначення найбільш вигідного програмного забезпечення для поставлених цілей. У сучасному світі часто виникають питання з приводу актуальності використання того чи іншого програмного забезпечення для автоматизації процесів конструювання деталей та виробів. Тому тема та мета даної статті є досить важливою.

**Методи дослідження.** Дослідження проведено методами комп'ютерного моделювання у системах автоматизованого проектування (САПР) КОМПАС-3D і PowerSHAPE та порівняння отриманих результатів. В статті надається опис та порівняння наявного функціонала та особливостей програм, зокрема команд, які забезпечують створення деталі у даних програмних модулях. Аналізуючи в цьому контексті програмні забезпечення встановлено, що КОМПАС-3D – це система нижчого рівня, до якої висуваються мінімальні вимоги щодо компонентів, а PowerSHAPE – система середнього рівня з відповідними ознаками.

**Наукова новизна** полягає в аналізі використання конкретних програмних засобів для побудови корпусних деталей, що може полегшити вибір раціональної системи для конструкторського моделювання та проектування виробів.

**Практична значимість** роботи полягає в тому, що вона може бути використана керівниками підприємств для вибору оптимального програмного забезпечення з метою автоматизації процесів конструювання деталей.

**Результати** показали, що для невеликого підприємства з малим бюджетом, одиничним виробництвом і універсальним обладнанням раціональним буде використання ПЗ КОМПАС-3D, а для великого підприємства з широким спектром задач, середнесерійним і масовим виробництвом, для верстатів із числовим програмним керуванням, з необхідністю проведення інженерного аналізу та оптимізації конструкції — буде програма PowerSHAPE. Програмне забезпечення PowerSHAPE надає більш широкі можливості подальшої роботи з моделлю в різних пов'язаних програмних продуктах, аналізу моделі, розрахунків і т.д., ніж КОМПАС-3D.

**Ключові слова:** порівняння САПР, 3D-моделювання, корпусні деталі, КОМПАС-3D, AutoDesk PowerSHAPE, аналіз використання

**Bondar O.V., Kravtsova D.Yu., Chumak A.S.** Comparison of compas-3d with powershape on the criteria of functionality and economy

**Purpose.** To identify the advantages and disadvantages of COMPAS-3D and PowerSHAPE usage to design box-shaped workpieces and define the best software for the predetermined goals. In modern world, questions often arise about the relevance of using a particular software to automate the design processes of parts and products. Therefore, the topic and purpose of this article is quite important.

**Research methods.** The research was carried out by computer modeling methods in computer-aided design (CAD) systems KOMPAS-3D and PowerSHAPE and comparison of the obtained results. The article provides a description and comparison of the available functionality and features of programs, including commands that provide the creation of details in these software modules. Analyzing the software in this context, it was found that KOMPAS-3D is a lower-level system with minimal component requirements, and PowerSHAPE is a mid-level system with the appropriate features.

**Scientific novelty.** The analysis of the specific software application to design box-shaped workpieces that makes the choice of the rational system for design modeling and development easier.

**Practical significance.** It can be used by enterprise managers to choose the appropriate software for parts design automation.

**The results** prove that for the small budget enterprise with individual production and general-purpose equipment COMPAS-3D will be a priority while PowerSHAPE suits for large multitasking enterprise with medium and large volume production where the engineering analysis and design optimization is required. PowerSHAPE software provides more opportunities for further work with the model in various related software products, model analysis, calculations, etc., than COMPASS-3D.

**Key words:** CAD comparison, 3D modeling, body parts, COMPAS-3D, AutoDesk PowerSHAPE, analysis of the use.

УДК 004.852

**Мітрошин В. О., Шаповалова Н. Н., Доценко І. О., Сайтгарєєв Н. Х.** Модель персоналізації рекомендацій контенту на основі колаборативної фільтрації

**Мета.** Розробити і теоретично обґрунтувати ефективність застосування персоналізованої рекомендаційної системи товарів, послуг або контенту на основі технології машинного навчання, яка поєднує в собі такі підходи до персоналізації рекомендацій, як колаборативна фільтрація та фільтрація контенту. Розробити механізм визначення доцільності використання певної метрики виявлення подібності користувачів і реалізувати його у режимі «реального часу» на розроблювальній системі. Створити безпечний сервіс з персоналізованою системою рекомендацій товарів, послуг або контенту, забезпечивши захист особистих даних користувачів.

**Методи дослідження.** У роботі використано наступні методи дослідження: аналіз джерел з досліджуваної теми, метричні методи визначення приналежності об'єктів до певної групи за їх схожістю, методи теорії штучного інтелекту, моделювання процесу навчання алгоритмів класифікації, формалізація побудованих моделей, методи проектування програмного забезпечення для розробки програмної моделі, емпіричні методи обґрунтування оптимальних параметрів навчання моделі, методи об'єктно-орієнтованого проектування та програмування.

**Наукова новизна** полягає в тому, що розроблена модель рекомендаційної системи дозволяє на початковому етапі роботи системи оцінити вподобання користувача, майже не володіючи інформацією про його прихильності. В роботі запропоновано механізм підбору певної метрики для визначення групи приналежності користувача, що в цілому має забезпечити точність наданої рекомендації.

**Практична значимість** виконаної роботи полягає в тому, що розроблено веб-сервіс, який надає персоналізовані рекомендації товарів, послуг або контенту щодо уподобань користувача, з забезпеченням вимог захисту персональної інформації, високої точності виконаних рекомендацій. Модуль рекомендаційної системи оформлено у вигляді прикладного програмного інтерфейсу, що дозволяє його застосування на будь-якій веб-платформі.

**Результати.** Запропоновано особистісно-орієнтований підхід до рекомендацій товарів, послуг або контенту, розроблено універсальну рекомендаційну систему, яка поєднує в собі і колаборативну, і фільтрацію контенту, а також розроблено веб-сервіс, з урахуванням вимог безпеки персональних даних користувачів.

**Ключові слова:** Рекомендаційна система, машинне навчання, метричний метод, метрика, колаборативна фільтрація, фільтрація контенту

**Mitroshyn V.O., Shapovalova N.N., Dotsenko I.O., Saitgareev N.H.** The content personalization model based on collaborative filtering

**Purpose.** To develop and theoretically substantiate the efficiency of a personalized recommendation system of goods, services, or content that is based on machine learning technology, which combines such approaches to the recommendations personalization as collaborative filtering and content filtering. Develop a mechanism for determining the expediency of using certain metrics to detect user similarities and implement it in real-time on the development system. Create a secure service with a recommendation-personalized system for goods, services, or content, ensuring the protection of the personal users' data.

**Research methods.** The following research methods are used: analysis of sources on the research topic, metric methods for determining the affiliation of objects to a certain group by their similarity, methods of artificial intelligence theory, modeling the learning process of classification algorithms, formalization of models, software design methods for software development, empirical methods of substantiation of optimal parameters of model learning, methods of object-oriented design and programming.

**Scientific novelty.** The developed model of the recommendation system allows at the initial stage of the system's operation to assess the user's preferences, almost without knowing the information about his preferences. The paper proposes a mechanism for selecting a metric to determine the group of user affiliation, which should ensure the accuracy of the recommendation.

**Practical significance.** A developed web service that provides personalized recommendations for goods, services, or content on the user's preferences, ensuring the protection of personal information and high accuracy of the recommendations made. The recommendation system module is designed in the form of an application software interface that allows its use on any web platform.

**Results.** A personality-oriented approach to product, service, or content recommendations is proposed, a universal recommendation system has been developed, which combines both collaborative and content filtering, and web service has been developed, taking into account the security requirements of users' personal data.

**Key words:** recommendation system, machine learning, metric method, metrics, collaborative filtering, content filtering

УДК 52-1:524.382

**Ткаченко Ю. Д., Швець Д. В., Карабут Н.О.** Аналіз методів виявлення та спостереження подвійних зірок

**Мета.** Метою дослідження є розгляд та класифікація існуючих методів реєстрації та спостереження подвійних зірок.

**Методи дослідження.** Проведено системний аналіз існуючих способів виявлення подвійних систем, проаналізовано наявні на сьогодні підходи та розглянуто їх особливості.

**Наукова новизна.** Розглянуто типи подвійних зірок, які можна класифікувати як візуальні, що виглядають як два окремих компоненти, відносно положення яких змінюється через рух вздовж своїх орбіт, астрометричні, в яких візуально помітна тільки одна компонента зі змінним рухом, який спричиняється гравітаційним впливом другої компоненти, спектроскопічні, спектри яких виявляють регулярні зміни та фотометричні, періодичні коливання повної яскравості яких викликані рухом компонентів подвійної системи.

**Практичне значення.** Фізичні подвійні зірки представляють для астрономії як науки в цілому фундаментальний інтерес, який здебільшого визначається тим, що саме вивчення подвійних зірок дозволило однозначно встановити єдність закону всесвітнього тяжіння Ньютона у Всесвіті і отримати, спираючись на спостереження, фундаментальні знання про маси зірок, їх світності і еволюції.

**Результати.** Використовуючи існуючі на сьогодні методи виявлення подвійних зірок можливо з'ясувати велику кількість їх параметрів незалежно від типу подвійних систем. Відповідно до методу спостереження і виявлення тієї або іншої системи зірок, можна скористатись різними варіантами знаходження параметрів світил. Зміна блиску тіла системи зазвичай викликана зміною взаємного положення тіл, внаслідок їх руху по орбітах, а також обертанням тіла навколо власної осі. В останньому випадку крива блиску дозволяє встановити період обертання тіла на час спостереження. У змінних зірок зміна блиску може бути пов'язана з рухом навколо неї менш яскравої зірки-компаньйона, а також може свідчити про наявність планет коло неї. Зміни зсувів або роздвоєнь спектральних ліній спектрально-подвійних зірок дозволяють визначити променеву швидкість, яка є проекцією орбітальної швидкості на промінь зору. Криві променевих швидкостей одного або обох компонентів дають можливість обчислити елементи істинної орбіти.

**Ключові слова:** астрономія, подвійні зірки, астрофізика, спектральний аналіз.

**Tkachenko Yu. D., Shvets D.V., Karabut N.O.** Analysis of methods for detecting and observing binary stars

**Purpose.** Consider and classify existing methods of registration and observation of binary stars.

**Research methods.** A systematic analysis of existing methods for detecting binary systems has been carried out, today approaches have been analyzed and their features were considered. A systematic analysis of existing methods for detecting binary systems has been carried out. Current approaches have been analyzed and their features were considered.

**Scientific novelty.** The types of binary stars that can be classified as visuals look like two separate components, the relative position of which varies through the movement along its orbits, astrometric, in which only one component with variable motion is visually noticeable, which is caused by the gravitational effect of the second component, spectroscopic, the spectra of which reveal regular changes and photometric, the periodic oscillations of the total brightness of which are caused by the movement of the components of the binary system.

**Practical significance.** Physical binary stars represent a fundamental interest for astronomy as a science, which is largely determined by the fact that the study of double stars allowed unequivocally to establish the unity of Newton's law of world-wide gravity in the universe and gain, based on observation, fundamental knowledge of the masses of stars, their luminosity and evolution.

**Results.** Using existing methods for detecting binary stars, it is possible to determine a large number of their parameters, regardless of the type of binary systems. According to the method of observation and detection of a particular stars system, you can use different options for finding the parameters of the stars. The change in the brightness of the system body is usually caused by a change in the relative position of the body, due to the movement of bodies in orbits, as well as the rotation of the body around its axis. In the latter case, the light curve allows you to set the period of rotation of the body at the time of observation. In variable stars, the change in brightness may be due to the movement around it of a less bright companion star, and may also indicate the presence of planets around it. Changes in the shifts or bifurcations of spectral lines of spectroscopic binaries make it possible to determine the radial velocity, which is the projection of the orbital velocity onto the line of sight. The radial velocity curves of one or both of the components make it possible to calculate the elements of the true orbit.

**Key words:** astronomy, binary stars, astrophysics, spectral analysis

УДК 621.311

**Замицький О.В., Гриценко О.В.** Дослідження фотоелектричного перетворення з системою охолодження

**Мета.** Метою даної роботи є вибір найбільш ефективної системи охолодження для установки фотоелектричного перетворення з концентратором сонячного випромінювання.

**Методи дослідження.** У роботі використані чисельні методи, методи математичного аналізу, математичне моделювання, програмування.

**Наукова новизна.** Встановлено вперше, що залежності температури води на виході від ККД теплообмінника мають лінійний характер. Побудовано графік ККД систем охолодження.

**Практичне значення.** На сьогоднішній день в світі спостерігається стрімке зростання використання фотоелектричних перетворювачів. Тому підвищення ефективності перетворення сонячної енергії в електричну є актуальне наукове завдання. Використання системи охолодження підвищує стійкість фотоелектричного перетворювача до високих температур, що дозволяє не тільки збільшити генерацію електрики влітку, але і продовжити термін служби модулів.

**Результати.** Сонячна панель під дією світла виробляє не тільки електроенергію, але і тепло. У звичайній сонячній панелі в точці максимальної потужності лише 10-15% сонячної енергії, яка падає на неї, перетворюється в електрику; 4 % відбивається від лицьової поверхні сонячної панелі; більша частина решти перетворюється в тепло. Нормальною для роботи фотоелектричного перетворювача є температура 25 °C. З ростом температури потік електронів усередині елемента зростає, що викликає збільшення сили струму і падіння напруги. Падіння напруги при цьому більше, ніж збільшення сили струму. Тому загальна потужність зменшується, що призводить до того, що панель працює з меншою ефективністю. Для того щоб знизити температуру фотоелектричного перетворювача, необхідно передбачити систему охолодження. В роботі розглядаються системи охолодження водою, повітрям та туманом для установки фотоелектричного перетворення з концентратором сонячного випромінювання. Виконано моделювання процесу охолодження водою сонячної панелі з використанням теплообмінника прямотрубного типу в програмі SolidWorks. Також виконано розрахунок системи охолодження туманом та повітрям. Виявлено найбільш ефективну систему охолодження.

**Ключові слова:** фотоелектричний перетворювач, охолодження, теплообмінник, сонячна панель, температура панелі, тепло, сонячна радіація, температура води.

**Zamitskyi O.V., Hrytsenko O.V.** Research of photoelectric conversion with cooling system

**Purpose.** The purpose of this work is to select the most efficient cooling system for the installation of photovoltaic conversion with a concentrator of solar radiation.

**Research methods.** Numerical methods, methods of mathematical analysis, mathematical modeling and programming are used in the work.

**Scientific novelty.** It is established for the first time that the dependences of the outlet water temperature on the heat exchanger efficiency are linear. The schedule of efficiency of cooling systems is constructed.

**Practical significance.** The use of photovoltaic converters is growing today in the world. Therefore, improving the efficiency of conversion of solar energy into electricity is an urgent scientific task. The use of a cooling system increases the resistance of the photoelectric converter to high temperatures, which allows not only to increase electricity generation in summer but also to extend the life of the modules.

**Results** The solar panel under the influence of sunlight produces not only electricity but also heat. In a conventional solar panel at the point of maximum power only 10-15% of the solar energy that falls on it is converted into electricity; 4% is reflected from the front surface of the solar panel; most of the rest is converted into heat. A temperature of 25 °C is normal for the photoelectric converter to work. As the temperature increases the flow of electrons inside the element increases which causes an increase in the current and the voltage drop. The voltage drop is greater than the increase in the current. Therefore, the total power is reduced which leads to the fact that the panel works with less efficiency. In order to reduce the temperature of the photoelectric converter it is necessary to provide a cooling system. The paper considers cooling systems with water, air

and fog for the installation of photoelectric conversion with the concentrator of solar radiation. The process of cooling the solar panel with water using the straight-tube heat exchanger was performed in SolidWorks. The calculation of the cooling system by fog and air was also performed. The most efficient cooling system has been identified.

**Key words:** photoelectric converter, cooling, heat exchanger, solar panel, panel temperature, heat, solar radiation, water temperature.

УДК 622.27

**Письменний С.В., Білюк В.О.** Дослідження твердіючих сумішей при відпрацюванні Криворізького залізрудного родовища ім. Кірова ПрАТ «ЦГЗК»

**Мета.** Обґрунтування камерної системи розробки із подальшою закладкою виробленого простору і вибору закладального матеріалу для підземного видобутку магнетитових кварцитів в умовах шахти ім. Артема ПрАТ «ЦГЗК» для збереження земної поверхні, площа якої забудована житловими та промисловими спорудами і ускладнена зонами обвалення від розробки покладів багатих залізних руд.

**Методи дослідження.** В роботі використано комплексний метод досліджень, що включає в себе аналіз і узагальнення відомих розробок в досліджуваній області.

**Наукова новизна.** Новизна полягає в удосконаленні очисних камер шляхом надання їм склепінної форми при розробці родовища камерною системою із подальшою закладкою виробленого простору, що дозволить збільшити об'єм камер, а також сприятиме збереженню їх стійкості протягом усього строку експлуатації. В якості твердіючої закладки запропоновано використовувати суміш, до складу якої входять полімерні добавки, що сприяють покращенню властивостей готової закладки, а також дозволяють знизити її вартість за рахунок зменшення обсягу компонентів на 1 м<sup>3</sup>, а також дають змогу ширше використовувати відходи гірничо-видобувної галузі.

**Практична значимість.** В результаті використання камерних систем, що передбачають застосування твердіючої закладки, в 3-4 рази знижуються втрати і засмічення при видобутку руди, а при додаванні полімерних добавок до її складу дозволить у 2 рази зменшити вартість закладки, за рахунок чого забезпечується високий економічний ефект і з часом затрати на закладні роботи окупаються.

**Результати.** Досліджено, що для відпрацювання запасів магнетитових кварцитів залізрудним родовищем ім. Кірова доцільно застосовувати камерну систему розробки з закладкою виробленого простору, з метою збереження денної поверхні. Для відпрацювання запасів у поперсі 220-130 м, з метою збереження стійкості налягаючих порід, пропонується формувати очисну камеру склепінчастої форми у верхній частині очисного блоку. Згідно виконаних укрупнених техніко-економічних показників встановлено, що при забезпеченні однакових фізичних властивостей закладального матеріалу, закладка на основі полімерів дешевша в 2 – 3 рази у порівнянні з закладкою на основі цементного розчину.

**Ключові слова:** магнетитові кварцити, очисна камера, закладка, стійкість, міцність, камерна система розробки

**Pysmennyi S.V., Biluk V.O.** Research of hardening mixtures during development of the Krivoriizkyi iron ore deposit named after Kirova PJSC «CGZK»

**Purpose.** To substantiate the chamber development system with the subsequent laying of the produced space and the choice of laying material for underground mining of magnetite quartzites in the mine Artema PJSC «CGZK» for preservation of the earth's surface, the area of which is built up by residential and industrial constructions and complicated by landslide zones from development of deposits of rich iron ores.

**Research methods.** The paper uses a comprehensive research method that includes analysis and generalization of known developments in the study area.

**Scientific novelty.** The novelty is to improve the cleaning chambers by giving them a vaulted shape during the development of the field by a chamber system with subsequent bookmarking of the produced space, which will increase the volume of the chambers and help maintain their stability throughout the life. As a hardening bookmark, it is proposed to use a mixture containing polymer additives that improve the properties of the finished bookmark, as well as reduce its cost by reducing the volume of components by 1 m<sup>3</sup>, as well as allow wider use of mining waste.

**Practical significance.** As a result of use of the chamber systems providing application of a hardening bookmark, losses and clogging at ore extraction are reduced by 3 – 4 times, and at addition of polymeric additives to its structure will allow to reduce 2 times cost of a bookmark at the expense of what the high economic effect is provided. sometimes the cost of mortgage work pays off.

**Results.** Development of magnetite quartzite reserves by the iron ore deposit Kirova is expedient to apply the chamber system of development with a bookmark of the made space, for the purpose of preservation of a day surface. To work out the reserves in the floor of 220-130 m, in order to maintain the stability of the overlying rocks, it is proposed to form a vault-shaped cleaning chamber in the upper part of the treatment unit. According to the performed enlarged technical and economic indicators, it is established that with the provision of the same physical properties of the laying material, the bookmark on the basis of polymers is cheaper by 2 – 3 times in comparison with the bookmark on the basis of cement mortar.

**Key words:** magnetite quartzites, purification chamber, bookmark, stability, strength, chamber development system

УДК: 620.91

**Рудь Ю.С., Білоножко В.Ю.** Розробка заходів енергозбереження в технологічному процесі виробництва агломерату на гірничо-збагачувальних комбінатах

**Мета.** Аналіз проблеми енергозбереження в технологічному виробництві агломерату на гірничо-збагачувальних комбінатах і розробка конструкторських рішень, які забезпечують рекуперацію технологічного тепла і його викорис-

тання для підвищення техніко-економічних характеристик обладнання. Можливі варіанти рішення проблеми показано на прикладі трьох конструкцій агломераційних машин.

**Метод досліджень** заснований на поєднанні методів аналізу складових проблеми енергозбереження в технологічному виробництві агломерату, а також відомих конструкцій агломераційних машин, і синтезу нових підходів до вирішення цієї проблеми з метою розробки нових конструкторських рішень.

**Наукова новизна.** Результати аналізу проблеми енергозбереження в технологічному виробництві агломерату на гірничо-збагачувальних комбінатах дозволили теоретично обґрунтувати тезу, що для рекуперації тепла можливо ефективно використовувати два джерела: тепло газів, які засмоктуються ексгаустером через вакуум-камери при спіканні шихти; тепло газів, які перекачуються димосмоком через шар агломерату при його охолодженні.

**Практичне значення.** Тепло, отримане при рекуперації енергії технологічного процесу спікання залізорудної шихти на агломераційних машинах, може бути використано для підвищення техніко-економічних показників агломераційної фабрики гірничо-збагачувального комбінату. Обсяги тепла, які містяться в газі і парі, що прокачуються ексгаустером і димосмоками машини і які можуть бути використані у виробництві, складають 64,9% від загального значення витратної частини теплового балансу виробництва агломерату або 1050-1730 кДж / кг (250-412 ккал / кг).

**Результат.** Забезпечується зростання продуктивності агломераційних конвеєрних машин шляхом інтенсифікації процесу спікання за рахунок рекуперації тепла газів і пари, що прокачуються ексгаустерами та димосмоками. При рекуперації тепла, яке створюється в технологічному процесі спікання шихти, росте коефіцієнт корисної дії агломераційної машини і техніко-економічні показники гірничо-збагачувального підприємства. При цьому досягається значна економія газу та знижується кількість шкідливих викидів.

**Ключові слова:** агломераційна конвеєрна машина, процес спікання, рекуперації технологічного тепла, конструктивні рішення, техніко-економічні характеристики

**Rud Yu. S., Belonozhko V. Yu.** Development of energy-saving measures in the technological process of agglomerate production at mining plants

**Purpose.** To analyze the problem of energy saving in the technological production of sinter at ore mining and processing plants and to develop design solutions that ensure the recovery of process heat and its use to improve the technical and economic characteristics of equipment. Possible solutions to the problem are shown on the example of three designs of sintering machines.

**Research method.** Methods for analyzing the components of the problem of energy saving in the technological production of sinter, as well as known designs of sintering machines, and the synthesis of new approaches to solving this problem in order to develop new design solutions.

**Scientific novelty.** The results of the analysis of the problem of energy saving in the technological production of sinter at ore mining and processing plants made it possible to theoretically substantiate the thesis that it is possible to effectively use two sources for heat recovery: heat of gases that are sucked in by the exhaustor through vacuum chambers during sintering of the charge; heat of gases, which are pumped by smoke exhausters through the agglomerate layer when it is cooled.

**Practical significance.** The heat obtained during energy recuperation of the technological process of sintering iron ore charge on sintering machines can be used to improve the technical and economic indicators of the sintering plant of a mining and processing plant. The volumes of heat contained in the gas and steam pumped by the exhaustor and smoke exhausters of the machine and which can be used in production make up 64.9% of the total value of the cost part of the heat balance of sinter production or 1050-1730 kJ / kg (250-412 kcal / kg).

**Results.** An increase in the productivity of sintering conveyor machines is provided due to the intensification of the sintering process when using the heat of gases and steam of vacuum chambers and smoke exhausters. When heat, created in the technological process of sintering the charge, is recovered, the efficiency of the sintering machine and the technical and economic indicators of the mining and processing enterprise increase. At the same time, significant gas savings are achieved and the amount of harmful emissions is reduced.

**Key words.** sintering conveyor machine, sintering process, process heat recovery, design solution, technical and economic characteristics

УДК 628.517.2

**Худик М. В., Шаповалов В. А., Шепель О. Л.** Засоби зниження виробничого шуму компресорних станцій шахт

**Мета.** Метою даної роботи є аналіз існуючих рішень при проектуванні компресорних станцій для зниження шумового навантаження, яке впливає на обслуговуючий компресори персонал. Робота відцентрових компресорів супроводжується утворенням та поширенням підвищеного рівня виробничого шуму високочастотного і тонального характеру. Для попередження поширення виробничого шуму у приміщеннях компресорних станцій, джерела його утворення можуть обладнуватися звукопоглинальними укриттями, які виготовляються з різних матеріалів. Недосконалість монтажу звукопоглинальних укриттів або невірний підбір звукоізолюючого матеріалу призводить до зниження їх звукопоглинальної ефективності погіршуючи санітарно-гігієнічні умови праці працівників.

**Методи дослідження.** Використовувався аналіз та узагальнення літературних джерел, охоронних документів на винаходи та корисні моделі щодо типів та конструктивних рішень звукоізолюючих пристосувань для зниження рівня шумового навантаження.

**Наукова новизна.** Розглянуто можливості зниження шумового навантаження на обслуговуючий персонал при роботі відцентрових компресорів за рахунок використання різних звукопоглинальних матеріалів для монтажу звукопоглинальних укриттів та пристосувань.

**Практична значимість.** Проведений аналіз показав, що для забезпечення допустимих рівнів шумового навантажен-

ня у приміщеннях компресорних станцій і на території оточуючих житлових районів необхідно враховувати розташування житлових районів на стадії проектування компресорних станцій уникаючи розміщення системи скидання повітря у бік цих районів, проникання виробничого шуму із приміщення у приміщення при відкритих вікнах та дверях, додаткове шумове навантаження, яке виникає при роботі вентиляторів вентиляційних систем.

**Результати.** Проведені дослідження роботи відцентрових компресорів компресорних станцій шахт показали необхідність застосування вбудованих у привід збуджувальних систем або тиристорних перетворювачів замість окремих електро механічних збудників, проведення дистанційного контролю вібрації підшипників для скорочення часу знаходження обслуговуючого персоналу біля компресорної установки, обладнання звукопоглинальних укриттів турбін, редукторів і муфт. Ці та інші заходи та засоби дозволять поліпшити санітарно-гігієнічні умови праці обслуговуючого персоналу компресорних станцій шахт.

**Ключові слова:** відцентровий компресор, компресорна станція, виробничий шум, звукопоглинальне укриття, звукоізоляційний матеріал, шумове навантаження

**Khudyk M. V., Shapovalov V. A., Shepel O. L.** Means for reducing the industrial noise of compressor stations of mines

**Purpose.** Analyze existing solutions in the design of compressor stations to reduce the noise load, which affects the personnel operating the compressors. The operation of centrifugal compressors is accompanied by the formation and spread of an increased level of industrial noise of a high frequency and tonal nature. To prevent the spread of industrial noise in the rooms of compressor stations, the sources of its generation can be equipped with sound-absorbing shelters, which are made of different materials. The imperfection of the installation of sound-absorbing shelters or the wrong selection of sound-insulating material leads to a decrease in their sound-absorbing efficiency, worsening the sanitary and hygienic working conditions of workers.

**Research methods.** The analysis and generalization of literary sources, titles of protection for inventions and utility models with respect to the types and design solutions of soundproofing devices to reduce the level of noise load were used.

**Scientific novelty.** The possibilities of reducing the noise load on the operating personnel during the operation of centrifugal compressors through the use of various soundproofing materials for the installation of sound-absorbing shelters and devices are considered.

**Practical significance.** The analysis showed that in order to ensure the permissible levels of noise load in the rooms of compressor stations and on the territory of surrounding residential areas, it is necessary to take into account the location of residential areas at the design stage of compressor stations, avoiding the placement of an air discharge system towards these areas, the penetration of industrial noise from room to room when open windows and doors, additional noise load that occurs when the fans of ventilation systems are operating.

**Results.** The researches carried out on the operation of centrifugal compressors in mine compressor stations showed the need to use incentive systems or thyristor converters built into the drive instead of separate electromechanical stimuli, remote monitoring of bearing vibration to reduce the time spent by service personnel near the compressor unit, equipment of sound-absorbing shelters for turbines, gearboxes and couplings. These and other measures and means will improve the sanitary and hygienic working conditions of the operating personnel of the compressor stations of the mines.

**Key words:** centrifugal compressor, compressor station, industrial noise, sound-absorbing shelter, sound-insulating material, noise load

УДК 621.311.1

**Козакевич І.А., Котякова М.Г.** Аналіз впливу джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії

**Мета** роботи полягає у розробці системи керування інверторами джерел розосередженої генерації з мінімізацією гармонічних викривлень вихідної напруги. Даний напрямок є актуальним у зв'язку з бурхливим розвитком джерел відновлювальної енергії, а також потенційним їх впливом на зниження якості електричної енергії.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи теорії автоматичного керування при аналізі динамічної системи відновлювальне джерело енергії – інвертор – фільтр – мережа та розробки регуляторів системи керування, методи математичного моделювання для аналізу процесів у електроенергетичній системі з відновлювальними джерелами енергії, методи теоретичних основ електротехніки для аналізу складових активної та реактивної потужності, що циркулює між джерелом енергії та мережею централізованого електропостачання.

**Наукова новизна.** Розроблено принцип функціонування систем інтеграції відновлювальних джерел енергії до мереж електропостачання з мінімізацією впливу на показники якості електричної енергії. В основі розробленого принципу – двоконтурна система керування, яка містить зовнішній контур керування величинами вихідної напруги та частоти інвертора, а внутрішній контур – керування складовими вектору мережевого струму.

**Практична значимість.** Розроблена система керування може знаходити практичне втілення у системах інтеграції відновлювальних джерел енергії, а також в системах поліпшення якості електричної енергії.

**Результати.** Розглянуто принципи формування систем керування мережевими інверторами задля мінімізації їх впливу на якість електричної енергії в мережі. Розглянуто аналітичні залежності, що описують динамічну систему відновлювальне джерело енергії – інвертор – фільтр – мережа змінного струму та складено модель у просторі станів, що може бути основою для синтезу системи керування. Запропоновано внутрішню систему керування струмом реалізовувати з використанням Н $\infty$ -регуляторів, а зовнішню систему керування величинами амплітуди та частоти вихідної напруги – з використанням методу статизму.

**Ключові слова:** відновлювальні джерела енергії, якість електричної енергії, гармонічні складові, закон статизму, коефіцієнт загального гармонічного спотворення

**Kozakevich I.A., Kotyakova M.G.** Analysis of the influence of sources of distributed generation on the power quality

**Purpose.** To develop a control system for inverters of distributed generation sources with minimization of harmonic distortions of the output voltage. This area is relevant due to the rapid development of renewable energy sources, as well as their potential impact on reducing the power quality.

**Research methods.** The methods of automatic control theory in the analysis of dynamic system renewable energy source - inverter - filter - network and development of control system controllers, methods of mathematical modeling for analysis of processes in power system with renewable energy sources, methods of theoretical foundations of electrical engineering for analysis of active components and reactive power circulating between the energy source and the centralized power supply network.

**Scientific novelty.** The principle of functioning of systems of integration of renewable energy sources into power supply grids with minimization of influence on indicators of power quality is developed. The developed principle is based on a two-circuit control system, which contains an external control circuit of the output voltage and inverter frequency, and the internal circuit - control of the components of the grid current vector.

**Practical significance.** The developed control system can find practical implementation in systems of integration of renewable energy sources, as well as in systems for improving the power quality.

**Results.** The principles of formation of control systems of grid inverters for minimization of their influence on power quality in a grid are considered. Analytical dependences describing a dynamic system renewable energy source - inverter - filter - AC network are considered and a model in the state space is made, which can be the basis for the synthesis of the control system. It is proposed to implement the internal current control system using  $H_\infty$ -regulators, and the external control system of the amplitude and frequency of the output voltage - using the method of statism.

**Key words:** renewable energy sources, electric energy quality, harmonic components, law of statism, total harmonic distortion coefficient

**Збірник наукових праць**

*В і с н и к*  
*Криворізького національного університету*

**Випуск 52**

Редактор, коректор  
Комп'ютерний набір, верстка

Апанащенко С.І.  
Підпригора Н.П.

Здано в набір 29.04.21. Підписано до друку 03.05.21 за рекомендацією Вченої Ради  
Криворізького національного університету, протокол № 9 від 27.04.2021 року  
Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. 24,06. Тираж 100 прим.

**Замовл. № 21. Укр., англ.**

Надруковано:  
ФОП Сінельніков Дмитро Анатолійович  
Свідоцтво ДК № 6780 від 29.05.2019р.  
50050, м. Кривий Ріг, пр.Металургів, 30/49.  
тел. (067) 777-17-33

*Адреса видавництва:*  
*вул.Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, 50027*

*Криворізький національний університет, 2021.*  
*Вип. 52, С. 3-204*