

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Криворізький національний університет

ГІРНИЧИЙ ВІСНИК

Науково-технічний збірник

Заснований у 1966 році

Випуск 112

Кривий Ріг, 2024

Редакційна колегія: **Ступнік М.І.**, д-р техн. наук, проф. (головний редактор); **Бровко Д.В.**, д-р техн. наук, проф. (заступник головного редактора); **Азарян А.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Березовський А.А.**, д-р геол. наук, проф.; **Варава Л.М.**, д-р екон. наук, проф.; **Вілкул Ю.Г.**, д-р техн. наук, проф.; **Губін Г.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Жуков С.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Зінченко О.А.**, д-р екон. наук, проф.; **Зубов Д.А.**, д-р техн. наук, проф., Охрид, Македонія; **Ільяс Ніколае**, д-р техн. наук, проф., Петрошани, Румунія; **Калініченко В.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Ковальчук В.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Коробко В.М.**, д-р техн. наук, проф., Массачусетс, США; **Котов І.А.**, д-р техн. наук, доц.; **Кіяновський М.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Купін А.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Лапшин О.Є.**, д-р техн. наук, проф.; **Моркун В.С.**, д-р техн. наук, проф.; **Несмашний Є.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Олійник Т.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Паламар А.Ю.**, канд. техн. наук, доц.; **Перегудов В.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Савельєв С. Г.**, д-р техн. наук, проф.; **Сінчук О.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Сидоренко В.Д.**, д-р техн. наук, проф.; **Ткаченко А.М.**, д-р екон. наук, проф.; **Толмачов С.Т.**, д-р техн. наук, проф.; **Турило А.А.**, д-р екон. наук, проф.; **Учитель О.Д.**, д-р техн. наук, проф.; **Федоренко П.Й.**, д-р техн. наук, проф.; **Шахно А.Ю.**, д-р екон. наук, доц.; **Шишкін О.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Щокін В.П.**, д-р техн. наук, проф.

Збірник індексується в науко-метричних 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 наук. Розглянуто шляхи підвищення ефективності промислових виробництв, автоматизації, контролю та керування технологічними процесами.

Важливе місце займають питання енергозбереження, надійності охорони праці, техніки безпеки, захисту довкілля.

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

Випуск № 112 рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет Вченою радою Криворізького національного університету (протокол № 10 від 26.04.2024 року).

Адреса редакції: 50002, Кривий Ріг, вул. Пушкіна, 44.
Криворізький національний університет. Тел. 409 61 29.

<i>Андрєєв Б.М., Бровко Д.В., Хворост В.В., В Кононенко.В., Козаріс В.Я., Гапоненко К.А., Бровко В.Д.</i> Розробка моделі моніторингу технічного стану будівель та споруд поверхневого комплексу гірничодобувних підприємств на основі ланцюга Маркова	3
<i>Сахно С.І., Попруга Д.В., Мокряк Г.В.</i> Особливості роботи бетонної балки з базальтовою арматурою	7
<i>Горбачов Ю.Г., Хруцький А.О., Громадський А.С., Чумак Ю.І.</i> Обґрунтування раціональних параметрів опор ковзання безроликкових стрічкових конвеєрів	12
<i>Слободянюк Н.О., Короленко Р.В.</i> Теоретико-правові засади формування інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів в умовах децентралізації державної влади України	17
<i>Ляшок В.Г., Тиханський М.П.</i> Інтелектуальні засоби у процесах подрібнення як потужний інструмент автоматизації	23
<i>Монастирський Ю. А., Максименко І. С.</i> Дослідження закономірностей зміни витрат палива автосамоскидами дизель-тролейвозами на залізорудних кар'єрах	29
<i>Олійник Т.А., Булах О.В., Скляр Л.В., Олійник М.О.</i> Особливості збагачення гематитових руд підземного видобутку Кривбасу в крупності 1-0 мм	33
<i>Савельєв С.Г., Ярош Т.П., Бабаєвська О.В., Кондратенко М.М., Бабошко Д.Ю.</i> Аналіз металургійних методів утилізації червоного шламу	39
<i>Касімі Д.О., Чупринов С.В., Ляхова І. А., Коренко М.Г.</i> Узагальнення методичних підходів до розрахунку енергетичних параметрів газового потоку в горні доменних печей при вдуванні комбінованого дуття	45
<i>Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Настич О.Б., Галечан Н.С., Мориконь В.С., Мінько Ю.Ю.</i> Особливості технології виготовлення буронабивних палів	50
<i>Кушнерьов І.П., Кривенко Ю.Ю., Максимов І.І., Шепель О.Л., Калініченко В.О., Федоренко С.О.</i> Відпрацювання паралельно зближених покладів корисних копалин	56
<i>Кравцова Д.Ю., Зюган У.І.</i> Пошук оптимальних рішень для технічних систем в умовах невизначеності зі комп'ютеризацією розрахунків у табличному процесорі	63
<i>Радзінська Ю. Б., Багін М. Л., Гой В. В., Фролов В. О.</i> Містобудівні чинники забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів: стан та напрями трансформацій	68
<i>Астахова Н. В., Астахов В. І.</i> Захисні властивості шлакопемзобетону та шлакобетону по відношенню до сталевих арматур	73
<i>Григор'єв Ю.І., Луценко С.О., Бровко Д.В., Баранов І.В., Жуков С.О.</i> Адаптація кінцевих контурів кар'єрів №2-біс та №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в умовах динаміки гірничо-геологічних факторів	77
<i>Ткаченко Г. І., Т Ковальчук. М., Михайленко М. В.</i> Вплив якості подрібненої гірничої маси на ефективність технологічних процесів на кар'єрах Кривбасу	83
<i>Воронцов І.В., Данилейко О.К., Коломіц Г.В.</i> Розробка енергоефективної системи штучного освітлення головного корпусу Криворізького національного університету	88
<i>Олійник Т.А., Вільгельм М.М.</i> Дослідження умов формування оптимального живлення оберненої флотажії магнетиту	95
<i>Швець Д. В., Швець В. В.</i> Автоматичне керування циклом подрібнення залізної руди з урахуванням часу транспортного переміщення потоку сировини	101
<i>Шепель О.Л.</i> Актуальний стан проблеми переходу з видобутку корисних копалин відкритим способом на технології комбінованого відкрито-підземного та підземного видобутку залізорудної сировини	105
<i>Шимко В.А., Сліпич О.О.</i> Використання інноваційних рішень та VR-технологій в архітектурно-будівельному проектуванні та будівництві	110
<i>Тітов Д.А.</i> Теоретична база обґрунтування збалансованого енергонасичення породного масиву підриванням комбінованих свердловинних зарядів	114
<i>Суглобов В.В., Крупко В.Г., Крупко І.В., Веснін А.В.</i> Механізми землерийних машин з хвильовими ланцюговими передачами	122
<i>Гнатенко М.О.</i> Усунення ливарного браку деталей методами мікроплазмового наплавлення	126
<i>Рибалко Б.І., Бакай А.В.</i> Динамічна модель трансформації мікросейсмічного сигналу	130
<i>Олійник Т.А., Петелька А.В., Скляр Л.В.</i> Удосконалення процесу фільтрування залізорудного магнетитового концентрату ПРАТ «ЦГЗК» для забезпечення фабрики огрудкування сировиною для DRI обкотишів	137
<i>Моркун В. С., Моркун Н. В., Шапкіна А. А., Бобров Є. Ю.</i> Методи аналізу вібрації та акустичної емісії бурової установки в процесі буріння свердловин	144
<i>Peregudov V. V., Bolotnikov A.V., Peregudov Y. V., Romanenko A. O., Romanenko O.V., Demchenko D. A.</i> Analysis and improvement of the methodology for ractive calculations of open-pit rail.	153
<i>Ковбик К.М.</i> Дослідження протікання процесу випуску при відпрацюванні насичених водою руд у лабораторних умовах в залежності від змін фракційного складу	159
<i>Temchenko V.</i> Effect of changing the shape of the rarefaction chamber of a device for removing water from the rope surface on air flow parameters: a technical note	164
<i>Анотації</i>	169

Б.М. АНДРЕЄВ, д-р техн. наук, проф., Д.В. БРОВКО, д-р техн. наук, доц.,
В.В. ХВОРОСТ, В.В. КОНОНЕНКО, В.Я. КОЗАРІЗ, кандидати техн. наук, доценти,
К.А. ГАПОНЕНКО, аспірант, В.Д. БРОВКО, магістрант
Криворізький національний університет

РОЗРОБКА МОДЕЛІ МОНИТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД ПОВЕРХНЕВОГО КОМПЛЕКСУ ГІРНИЧОДОБУВНИХ ПІДПРИЄМСТВ НА ОСНОВІ ЛАНЦЮГА МАРКОВА

Мета. Підвищення експлуатаційної надійності та безпеки об'єктів гірничорудної промисловості, шляхом удосконалення наявної та розроблення нових методик визначення залишкового ресурсу. Це можливо досягти шляхом аналізу причин виникнення найпоширеніших видів типових дефектів будівель і споруд гірничорудної промисловості та на основі отриманих результатів провести оцінку залишкового ресурсу використовуючи ймовірнісні методи, які базуються на ланцюгах Маркова.

Методи дослідження. Використання загальнонаукових методів дослідження: статистичних, теорії ймовірностей, теорії інформації, теорії ланцюгів Маркова, формалізації, аналізу (зокрема ретроспективного) - під час побудови рішення на рівні окремих конструктивних елементів; основних принципів організації систем і системного аналізу - під час побудови моделі діагностування.

Наукова новизна. Розроблена методика, яка базується на використанні ланцюгів Маркова, дозволяє не лише ретельно аналізувати історію дефектів та їх взаємозв'язки, але й враховувати ймовірність виникнення нових дефектів в конструктивних елементах на основі попередніх даних, що в свою чергу надає можливість управління технічним станом будівельних конструкцій.

Практична значимість. Запропонована методика аналізу та оцінки залишкового ресурсу, заснована на ланцюгах Маркова, відображає глибоке розуміння складних процесів, що відбуваються у будівлях та спорудах гірничорудної галузі. Вона не лише дозволяє покращити ефективність обстеження та діагностики об'єктів, але й спрощує цей процес, знижуючи трудові затрати та вартість робіт. Це може призвести до збільшення швидкості і точності прийняття рішень щодо технічного обслуговування та ремонту, а також зменшити ризик аварійних ситуацій.

Результати. Запропоновано нову методику визначення залишкового ресурсу та категорії технічного стану будівель та споруд на основі використання ланцюгів Маркова. Сформульовано пропозиції щодо систематизації взаємозв'язку підсистем, їх технічного стану та відносної надійності об'єкту в цілому.

Ключові слова: об'єкти поверхні шахт, надійність, цепі Маркова, системи елементів конструкції, залишковий ресурс, категорії технічного стану.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-3-7

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними завданнями. Переважну більшість будівель і споруд поверхневого комплексу гірничодобувних підприємств було зведено в період інтенсивного підйому промислових потужностей, тобто в 50-х - 60-х роках минулого століття. До теперішнього часу нормативний термін служби багатьох з будівель вже минув, і для безпечної роботи підприємств потрібне продовження терміну експлуатації цих будівель і споруд.

Наразі залишковий ресурс будівель та споруд проводиться за зовнішніми ознаками. Але цей підхід має значні недоліки, пов'язані із суб'єктивністю експерта, людським фактором та ігноруванням варіативності шляхів руйнування будівлі.

Аналіз досліджень і публікацій. Огляд і аналіз публікацій ряду авторів показує, що існує велика кількість методик та методів визначення характеристик випадкових процесів [4-5, 7-10]. Існують методи, які мають наукове обґрунтування і враховують стан будівельних конструкцій та сполучених елементів у будівлях і спорудах. Неодноразово запропонований метод заснований на використанні випадкових марковських процесів дає змогу розглянути різні стани роботи системи елементів конструкції під впливом випадкових зовнішніх факторів, застосовується при розрахунку надійності та довговічності системи елементів конструкції споруд. Враховувати зовнішні фактори протягом всього терміну експлуатації споруди є безсумнівною перевагою для методів прогнозування, як для загального стану системи елементів конструкції, так і особливих станів (аварійні випадки) [4-5, 7-10].

Здебільшого будівельні конструкції розраховують на міцність, стійкість, жорсткість і не беруть до відома ймовірнісні критерії, що враховують екстремальні ситуації, ризик, несприят-

ливі впливи, техногенні причини, катастрофи. Саме цей перелік становить випадковий характер, що утворює безліч несприятливих станів.

Ймовірнісний метод, що використовується для оцінки працездатності системи елементів конструкції, дозволяє аналізувати технічний стан конструкції в процесі експлуатації та встановлювати критерій її надійності. Основою для цього методу є математична модель, яка визначає перехід від одного небажаного стану системи елементів конструкції до іншого. Цей перехід моделюється виключно за допомогою ланцюга Маркова.

Постановка задачі. Для розв'язання задачі з підвищення експлуатаційної надійності та безпеки об'єктів гірничорудної промисловості вирішується шляхом удосконалення наявної та розроблення нових методик визначення залишкового ресурсу. Це можливо досягти шляхом аналізу причин виникнення найпоширеніших видів типових дефектів будівель і споруд гірничорудної промисловості та на основі отриманих результатів провести оцінку залишкового ресурсу використовуючи ймовірнісні методи, які базуються на ланцюгах Маркова.

Викладення матеріалу та результати. Останнім часом значного розвитку набула теорія ланцюгів Маркова, якою займалися також Чжун КайЛай, Дж. Кемені, Дж. Снелл та ін. Ця теорія призначена, головним чином, для повного опису як довготривалої, так і локальної поведінки процесу та дозволяє отримати множину можливих станів будівельних конструкцій, які формуються під дією прикладених навантажень.

Введемо основні поняття, в світлі теорії ланцюгів Маркова, для опису поведінки конструкцій будівель та споруд під дією прикладених навантажень: *подія* - це стан системи елементів будівельних конструкцій; *випробування* - це зміна стану системи будівельних конструкцій, яка відбувається в певні фіксовані моменти часу або в будь-які випадкові можливі моменти часу. Залежно від часового фактору математична модель виражається в одному випадку як ланцюг Маркова з дискретним часом, в іншому - як ланцюг Маркова з безперервним часом. Виходячи з цього вплив зовнішніх чинників на систему елементів конструкцій потрібно розглядати як визначений стан, а результати дії навантаження, які призвели до зміну, як випробування. Ці стани незалежні, і поява деякого випадкового стану не залежить від результату попереднього стану. Отже, результат у майбутньому не залежить від результату в минулому [1, 3, 6, 11].

Навантаження, що діють на систему будівельних конструкцій формують послідовність несумісних станів, які утворюють повну групу. Таким чином, можливі стани системи елементів конструкції утворюють послідовність k несумісних станів A_1, A_2, \dots, A_k повної групи. Умовна ймовірність $p_{ij}(s)$ того, що в s -ій зміні настане будь-який зі станів повної групи A_j ($j=1, 2, \dots, k$), не залежить від результатів попередніх станів, якщо в $(s-1)$ -ій зміні настав можливий стан із повної групи A_i ($i = 1, 2, \dots, k$).

Припустимо, що послідовність станів системи елементів споруди утворює ланцюг Маркова і повна група складається з чотирьох несумісних станів A_1, A_2, A_3, A_4 , також відомо, що при деяких змінах з'явився стан A_1 , то умовна ймовірність того, що в наступних випадкових змінах настане стан A_3 , не залежить від того, які стани з'явилися в минулих змінах.

Отже, основними параметрами математичної моделі є:

поточний стан системи елементів конструкції;

зміна стану системи елементів конструкції.

Експлуатаційний стан системи елементів конструкції перебуває в одному з k станів: s_1, s_2, \dots, s_k -м. Внаслідок навантаження стан окремих елементів конструкції може змінюватися, переміщуючись із i -го стану в j -й стан. Системи елементів конструкції може значний час знаходитись у визначеному стані або переходити в будь-який інший стан.

Отже, ланцюг Маркова описує послідовність змін станів системи елементів конструкції, яка переходить до одного з k станів у повній групі. Умовна ймовірність $p_{ij}(s)$ визначає, який j -й стан буде прийнято після $(s-1)$ -го кроку, якщо конструкція перебувала у i -му стані до цього.

Особливість математичної моделі ланцюга Маркова полягає в тому, що умовна ймовірність $p_{ij}(s)$ не змінюється в залежності від номера кроку зміни стану системи елементів конструкції, тобто $p_{ij}(s) = p_{ij}$. В системі елементів конструкції це явище спричинює випадкове коливання навантажень, і описується математичною моделлю однорідного ланцюга Маркова з дискретним часом.

Однією з основних числових характеристик математичної моделі є перехідна ймовірність - p_{ij} . Умовна ймовірність відображає, що система елементів конструкції з i -го стану в результаті зміни перейде в j -й стан. Причому майбутній стан системи елементів конструкції не залежить від стану в минулому. У позначенні p_{ij} перший індекс вказує номер попереднього стану, а другий - номер наступного стану.

Якщо число станів системи елементів конструкції скінченне і дорівнює k , то всі можливі перехідні ймовірності записують матрицею переходу.

Матриця переходу станів системи елементів конструкції - це матриця, що містить усі перехідні ймовірності, визначені на кінцевій множині потужністю k :

$$P_n = \begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & P_{13} & P_{1k} \\ P_{21} & P_{22} & P_{23} & P_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{k1} & P_{k2} & \dots & P_{kk} \end{pmatrix} \quad (1)$$

де P_n - матриця переходу станів за $n \in N$; p_{kk} ($k=i, k=j, i=j$) - ймовірність переходу з одного й того самого i -го стану в будь-який можливий j -й стан.

Кожен рядок матриці переходу P_n утворюється з елементарних перехідних ймовірностей p_{kk} , що утворюють повну групу станів системи елементів конструкції. Сума елементарних перехідних ймовірностей дорівнює одиниці: $\sum_{j=1}^k p_{ij} = 1 (i = 1, 2, \dots, k)$ [4-5, 7-10].

Розглянемо проміжний стан r між i -м і j -м станами. Припустимо, що з початкового стану i за n переходів будівельна конструкція перейде в проміжний стан r з ймовірністю $P_{ir}(n)$, тоді за решту $(n-m)$ переходів із проміжного стану r будівельна конструкція перейде в кінцевий стан j з ймовірністю $P_{rj}(n-m)$.

Нехай подія A - це стан системи елементів конструкції, що цікавить, тобто протягом n переходів будівельна конструкція перейде з початкового стану i в кінцевий стан j , отже, $P(A) = P_{ij}(n)$; тоді подія B_r ($r = 1, 2, \dots, k$) - це припущення, протягом яких будівельна конструкція перейде з початкового i -го стану в проміжний стан r за m переходів, отже, $P(B_r) = P_{ir}(m)$; $P_{B_r}(A)$ - це умовна ймовірність настання стану A , якщо припустити, що за $n-m$ переходів будівельна конструкція перейде з проміжного стану r у кінцевий стан j , отже,

$P_{B_r}(A) = P_{rj}(n-m)$. Тоді за формулою повної ймовірності $P_{ij}(n) = \sum_{r=1}^k P_{ir}(m) \cdot P_{rj}(n-m)$ запишемо

ймовірність стану системи елементів конструкції, тобто. $P(A) = \sum_{r=1}^k P(B_r) \cdot P_{B_r}(A)$. Таким чином, якщо відомі всі можливі та кінцеві перехідні ймовірності, то можна визначити ймовірності переходу системи елементів конструкції.

На основі вище розглянутого матеріалу та проведеного статистичного аналізу за результатами багаторічного обстеження гірничотехнічних будівель і споруд шахтних комплексів Криворізького залізничного басейну, розроблено нову методику визначення залишкового ресурсу на основі ланцюгів Маркова, що дає змогу прогнозувати розвиток аварійного стану будівель і споруд [1, 3, 6, 11].

Під час проведеного статистичного аналізу було ідентифіковано 5 підсистем такі як:

- 1 - прилегла територія і вимощення;
- 2 - основи і фундаменти;
- 3 - несучі конструкції;
- 4 - огорожувальні конструкції;
- 5 - оздоблення.

Також розроблення методики визначення залишкового ресурсу і категорії технічного стану з використанням теорії графів було здійснено на основі мережевої моделі розвитку аварійного стану будівель та споруд гірничорудної промисловості, згідно якої виявлення взаємозв'язків між вершинами графів зроблено з використанням статистичної бази по об'єктах гірничорудної промисловості Криворізького залізничного басейну (рис. 1).

Як вузли графа прийнято наступні підсистеми: 1 - справний стан об'єкта; 2 - руйнування комунікацій; 3 - руйнування, оздоблення; 4 - руйнування, прилеглої території; 5 - руйнування, огорожувальних конструкцій; 6 - руйнування, опорних конструкцій; 7 - руйнування, основ і фундаментів; 8 - руйнування, об'єкта загалом.

Ребра графа є лініями впливу підсистем одна на одну.

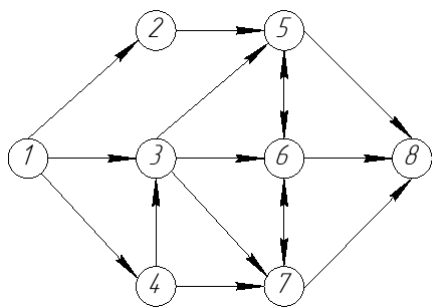


Рис.1. Сітьова модель для будівель та споруд різної поверховості

Після знаходження ймовірностей за станом у відповідні моменти часу і визначення ймовірності модельного аварійного стану об'єкта внаслідок руйнування i -того компонента системи з використанням узагальненої формули Байеса, розрахункова відносна пошкодженість будівлі визначається за формулою

$$\varepsilon_{\text{бвд}} = 0,1\varepsilon_1 + 0,26\varepsilon_2 + 0,33\varepsilon_3 + 0,19\varepsilon_4 + 0,12\varepsilon_5. \quad (2)$$

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналіз великої кількості результатів технічних обстежень об'єктів гірничорудної промисловості Криворізького залізничного басейну та наявної методики розрахунку залишкового ресурсу за зовнішніми ознаками виявив: причини виникнення і найпоширеніші види типових де-

фектів; значний вплив суб'єктивних експертних оцінок, великі відхилення і неможливість застосування наявної методики в окремих випадках.

Проведено удосконалення існуючої методики розрахунку залишкового ресурсу за зовнішніми ознаками: виключено вплив суб'єктивних експертних оцінок - розроблено пропозиції щодо визначення та уточнення величин відносної пошкодженості елементів будівельних конструкцій.

Розроблено нову методику визначення залишкового ресурсу та загального технічного стану будівель та споруд на основі ланцюгів Маркова.

Список літератури

1. Бровко Д. В. Построение моделей возможных дефектов объектов поверхности шахт в виде анализа статистических данных их технических осмотров / Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг, 2018. – Вип. 47. – С. 32-38.
2. Бровко Д. В. Анализ статистических данных возможных дефектов объектов поверхности шахт / Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток промисловості та суспільства» Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2019. – С. 49.
3. Бровко Д. В. Построение системы мониторинга надежности элементов зданий и сооружений поверхностного комплекса шахт на базе оценки энтропии / Д. В. Бровко, В. В. Хворост. // Гірничий вісник ДВНЗ "Криворізький національний університет". - 2020. - №107. - С. 73-83.
4. Tweedie R.L. Markov chains: Structure and applications / Tweedie R.L. // Handbook of Statistics. Volume 19, 2001, Pages 817-851. DOI: 10.1016/S0169-7161(01)19025-5
5. Jamie E. A Markov chain-based model for structural vulnerability assessment of corrosion-damaged reinforced concrete bridges / Ebrahim Afsar Dizaj, Jamie E. Padgett and Mohammad M. Kashani // The Royal Society. Collection. 2021. DOI: 10.1098/rsta.2020.0290
6. Бровко Д. В. Кваліметричне оцінювання в розрахунку рівня живучості об'єктів міної поверхні. / Д.В.Бровко, В. В.Хворост, В. Ю. Тищенко / Науковий вісник Національного гірничого університету // Науковий вісник Національного гірничого університету. - Дніпро, 2018 - No. 4, с. с. 66-71. doi: 10.29202/nvngu/2018-4/14
7. Karapetrou S. Time-building specific” seismic vulnerability assessment of a hospital RC building using field monitoring data / S. Karapetrou, M. Manakou, D. Bindi, B. Petrovic, K. Pitilakis // Engineering Structures, 2016. Volume 112. - pp. 114-132. DOI: 10.1016/j.engstruct.2016.01.009
8. Han K.K. Potential of big visual data and building information modeling for construction performance analytics: An exploratory study / K.K. Han, M. Golparvar-Fard // Automation in Construction, 2017. Han, M. Golparvar-Fard // Automation in Construction, 2017. Том 73. - pp. 184-198. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.11.004
9. Fenton . G.A. Reliability-based geotechnical design in 2014 Canadian Highway Bridge Design Code / G.A. Fenton, F. Naghibi, D. Dundas, R.J. Bathurst, D.V. Griffiths // Canadian Geotechnical Journal, 2016. Volume 53. - pp. 236-251. DOI: 10.1139/cgj-2015-0158
10. Yigit C.O. Experimental assessment of post-processed kinematic Precise Point Positioning method for structural health monitoring / C.O. Yigit // Geomatics, Natural Hazards and Risk, 2016. Volume 7, Issue 1. - pp. 360-383. DOI: 10.1080/19475705.2014.9177248
11. Khvorost, V.V. A reliability indicator based on assessment entropy of mining building and structure elements / Brovko, D.V., Khvorost, V.V., Kononenko, V.V., Yu Tyshchenko, V. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled, 2022, Volume 1049(1), 012028. DOI:10.1088/1755-1315/1049/1/012028

Рукопис подано до редакції 15.03.24

ОСОБЛИВОСТІ РОБОТИ БЕТОННОЇ БАЛКИ З БАЗАЛЬТОВОЮ АРМАТУРОЮ

В роботі порівнюються деформативні та міцнісні характеристики бетонної балки армованої сталеву та базальтовою арматурою.

Метою роботи є виявлення переваг і недоліків застосування базальтової стрижневої арматури шляхом аналізу поведінки цифрових моделей армованої бетонної балки.

Методи досліджень. Методом скінчених елементів досліджувалась математична модель бетонної армованої балки. Для обчислення параметрів бетону використовувалась модель Друккера-Прагера, для сталеву арматури – білінійна деформативна модель.

Наукова новизна. Застосування методу скінчених елементів дозволило виявити розподілення напружень в бетоні та композитній арматурі, розрахувати коефіцієнти використання несучої здатності арматури.

Практичне значення. Проведений в роботі аналіз недоліків та переваг базальтової арматури дозволяє проектувальникам визначитись з областю її застосування в конструкціях.

Результати. В роботі розроблена математична модель армованої бетонної балки. Формування моделі відбувалось в програмному комплексі ANSYS Student. Для аналізу використовувались деформативні та міцнісні характеристики моделей. Для моделей із композитної арматури прийнято два варіанти діаметрів стрижнів: відповідні діаметри композитної та сталеву арматури однакові та відповідні діаметри композитної арматури розраховували із умов однакових початкових деформацій зі сталеву арматурою. Наведено методику підбору діаметру композитної арматури, яка має однакові деформації зі сталеву. За результатами моделювання для різних моделей зіставляли прогини балки, відносні деформації бетону, аксіальні напруження стиску і розтягу в бетоні, аксіальні напруження в стрижнях верхнього і нижнього поясу, ступінь використання несучої здатності матеріалу стрижнів. В роботі визначено, що прогини балки з базальтовою арматурою значно більші ніж у балки зі сталеву арматурою. При цьому напруження бетону в балці з базальтовою арматурою майже вдвічі більші ніж в балці зі сталеву арматурою. Напруження розтягу і стиску в базальтовій арматурі в 1,8 рази, а в базальтовій арматурі збільшеного діаметру в 3,6 рази менші ніж в моделі зі сталеву арматурою. За однакових навантажень максимальний коефіцієнт використання у сталеву арматури, мінімальний – у моделі з базальтовою арматурою збільшеного діаметру. Коефіцієнти використання несучої здатності базальтової арматури в п'ять разів, а базальтової арматури збільшеного діаметру в десять разів нижчі ніж у сталеву арматури.

Ключові слова: бетон, базальтова арматура, метод скінчених елементів, деформації, міцність.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-7-12

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Композитні матеріали знаходять дедалі більше застосування в автомобільній, аерокосмічній, будівельній та інших галузях промисловості. Порівняно з металом, композитні матеріали мають меншу питому вагу, високу питому міцність, високу корозійну стійкість [1, 2]. В будівництві композитні матеріали використовують під час відновлення та ремонту [1] таких конструкційних елементів як балки [3] і стіни [4]. Композитні матеріали у вигляді стрижневої арматури застосовують відносно недавно. Найбільш широке застосування знайшло скловолокно. Це пов'язано з його низькою вартістю і доступністю на ринку [5,6]. Але все ж таки великі перспективи мають вуглецеві волокна [7]. Вони набагато жорсткіші за скловолокна і мають модуль пружності аналогічний сталі [5]. Починаючи з початку століття все більшого застосування набуває базальтове волокно [6-10]. Основні поклади базальту розташовані в Україні [6]. Базальтова композитна арматура порівняно зі сталеву має вищу міцність на розрив – 1000-1300 МПа, але набагато нижчий модуль Юнга – близько 70 ГПа.

Аналіз досліджень і публікацій. Нині ведеться дискусія про ефективність базальтової арматури. Прихильники застосування цього будівельного матеріалу відзначають високу несучу здатність, корозійну стійкість і дешевизну матеріалу [2]. Противники вказують на низький модуль пружності матеріалу і, відповідно, більшу деформацію під навантаженням і більше тріщинотворення в армованому бетоні [12, 13, 18].

Постановка задачі. Метою цієї роботи є виявлення переваг і недоліків застосування базальтової стрижневої арматури шляхом аналізу поведінки цифрових моделей армованої бетонної балки. Як параметри аналізу використовували деформативні та міцнісні характеристики моделей.

Викладення матеріалу та результати. Для порівняння поведінки бетонних балок, армованих сталеву і базальтовою арматурою, проведено моделювання роботи цих конструктивних елементів, що армовані різною арматурою. Моделювання проводилося методом скінченних елементів у програмному комплексі ANSYS Student. Геометричні параметри математичної моделі армованої балки наведено на рис. 1.

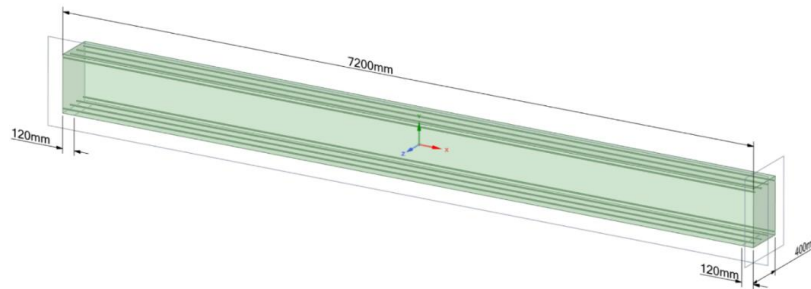


Рис. 1. Геометричні параметри математичної моделі армованої бетонної балки

Бетонна балка розміром 7200×600×400 мм встановлена на двох опорах із прольотом 7080 мм. Обидві опори мають обертальний ступінь свободи навколо осі Z. Одна з опор жорстко зафіксована вздовж осей X, Y, Z; інша вільно переміщується вздовж осі X. На верхню площину балки діє розподілене навантаження $1,68 \times 10^{-3}$ МПа.

Стрижнева арматура розташована у верхньому і нижньому поясі балки. У нижньому та верхньому поясі – чотири стрижня з інтервалом по осях 120 мм. Відстань від осей стрижнів до поверхні балок прийнято такою, що дорівнює 20 мм.

У роботі досліджувалася нелінійна поведінка матеріалів. Для моделювання поведінки бетону застосовувалася модель Друккера-Прагера. Параметри бетону були досліджені в роботах [15-17]. Механічні та фізичні властивості застосованого в математичній моделі бетону наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Фізичні та механічні властивості бетону

Density	2,3e-06 kg/mm ³
Young's Modulus	1,98e+04 MPa
Poisson's Ratio	0,160
Bulk Modulus	9,71e+03 MPa
Shear Modulus	8,53e+03 MPa
Uniaxial Compressive Strength	18,8 MPa
Uniaxial Tensile Strength	1,88 MPa
Biaxial Compressive Strength	20,0 MPa

Для моделювання поведінки сталеву арматури застосовувалася модель з білінійним ізотропним зміцненням. Механічні характеристики сталі були прийняті з умови відповідності арматури A400 і наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Фізичні та механічні властивості сталеву арматури

Density	7,75e-06 kg/mm ³
Young's Modulus	2e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,300
Bulk Modulus	1,67e+05 MPa
Shear Modulus	7,69e+04 MPa

Для композитної арматури прийнято лінійну модель поведінки, а її характеристики наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Фізичні та механічні властивості композитної арматури

Density	1,8e-06
Young's Modulus	5,5e+04 MPa
Poisson's Ratio XY	0,315
Shear Modulus XY	2,09e+04 MPa
Compressive Ultimate Strength	0
Compressive Yield Strength	132 MPa
Tensile Ultimate Strength	660 MPa
Tensile Yield Strength	660 MPa

Початкове моделювання проводили на моделі зі сталевую арматурою. Діаметри нижніх стрижнів та крайніх верхніх було прийнято 20 мм, середніх верхніх – 25 мм.

Для моделей із композитної арматури прийнято два варіанти діаметрів стрижнів: відповідні діаметри композитної та сталевій арматури однакові;

відповідні діаметри композитної арматури розраховували із умов однакових початкових деформацій зі сталевую арматурою.

Методику розрахунку відповідних діаметрів композитної арматури буде розглянуто далі.

У всіх моделях завантаження здійснювалося шляхом прикладання розподіленого навантаження на верхній пояс балки (рис. 2). Крім розподіленого навантаження, балка зазнає впливу гравітації.

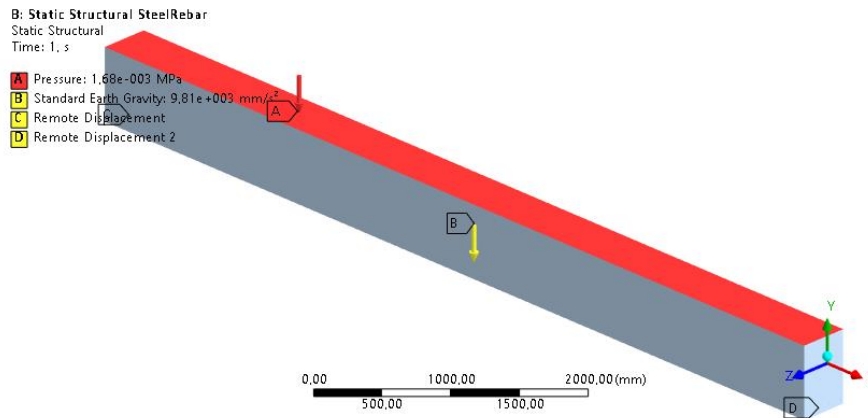


Рис. 2. Схема закріплення і розподілу навантажень

В просторі модель фіксувалась за рахунок прикладання Remote Displacement до нижніх країв балок з параметрами $X=0, Y=0, Z=0$ з одного краю та $X=Free, Y=0, Z=0$ з іншого.

Як уже зазначалося раніше, у роботі розглянуто чотири математичні моделі бетонної балки, що відрізняються матеріалом і діаметрами стрижневої арматури. У перших двох моделях діаметри композитної арматури верхнього і нижнього поясу дорівнюють відповідним діаметрам сталевій арматури.

У третій моделі діаметри стрижнів композитної арматури розраховували із умов забезпечення однакових відносних деформацій композитних і сталевих стрижнів на стадії еластичних деформацій. При цьому виходили з такого:

Модуль Юнга $E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$, де $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ і $\sigma = \frac{F}{A}$ Для круглого перерізу $A = \pi \cdot r^2$.

Таким чином для круглого перерізу

$$\sigma = \frac{F}{\pi r^2}, \text{ а } \Delta\sigma = \frac{F_2 - F_1}{\pi r^2} = \frac{\Delta F}{\pi r^2}.$$

Звідси $E = \frac{\Delta F \cdot l}{\Delta l \cdot \pi \cdot r^2}$. Позначимо модуль пружності сталевій арматури через E_{st} , композитної через E_{cpz} , а радіуси перерізу сталевій арматури, відповідно, через r_{st} , а композитної – r_{cpz} .

Для того, щоб при однакових ΔF стрижні мали однакове відносне подовження $\Delta l_{cpz} = \Delta l_{st}$, має дотримуватися умова

$$\frac{\Delta F \cdot l}{E_{cpz} \cdot \pi \cdot r_{cpz}^2} = \frac{\Delta F \cdot l}{E_{st} \cdot \pi \cdot r_{st}^2}.$$

Прибравши з рівності компоненти, що мають рівні значення, отримаємо

$$\frac{1}{E_{cpz} \cdot r_{cpz}^2} = \frac{1}{E_{st} \cdot r_{st}^2}.$$

Звідси

$$r_{cpz,\varepsilon} = r_{st} \sqrt{\frac{E_{st}}{E_{cpz}}},$$

де $r_{cpz,\varepsilon}$ – радіус композитної арматури, який забезпечує однакову зі сталевую арматурою відносну деформацію на стадії еластичних деформацій.

Для розглянутої моделі $E_{st} = 2,1e+05$ МПа, $E_{cpz} = 5,5e+04$ МПа. Радіус стрижнів нижнього поясу

$$10 \cdot \sqrt{\frac{2,1e+05}{5,5e+04}} = 19 \text{ [mm]}.$$

Аналогічно розраховано радіус композитних середніх стрижнів верхнього поясу, який дорівнює 24 мм.

Висновки та напрямок подальших досліджень. За результатами моделювання для різних моделей зіставляли прогини балки, відносні деформації бетону, аксіальні напруження стиску і розтягу в бетоні, аксіальні напруження в стрижнях верхнього і нижнього поясу, ступінь використання несучої здатності матеріалу стрижні.

Залежність прогинів балки від навантаження наведено на рис. 3-5. Для зручності на рисунках для різних моделей прийнято такі позначення:

балка зі сталевую арматурою – St;

балка з композитною арматурою діаметром, що дорівнює сталевій арматурі – C_eqv_D;

балка з композитною арматурою з діаметром, який забезпечує однакову зі сталевую арматурою відносну деформацію – C_eqv_ε.

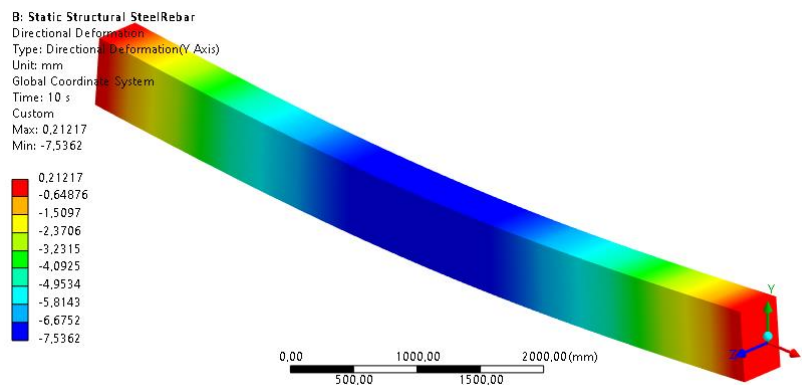


Рис. 3. Вертикальні прогини математичної моделі St

З рисунків видно, що прогин балки з базальтовою арматурою перевищує прогин балки зі сталевую арматурою в 1,7 рази. Це пов'язано зі значно більшою піддатливістю базальтової арматури. Прогини моделей St та C_eqv_ε практично однакові.

Значні відмінності у величині модуля пружності сталеві та базальтової арматури позначаються на характері розподілення та величини напружень в бетоні, табл. 4.

Таблиця 4

Напруження у верхньому та нижньому поясі математичних моделей балок

Вид математичної моделі	Максимальні напруження у нижньому поясі балки, МПа	Максимальні напруження у верхньому поясі балки, МПа
St	1,108	-1,002
C_eqv_D	2,071	-1,982
C_eqv_ε	1,097	-0,998

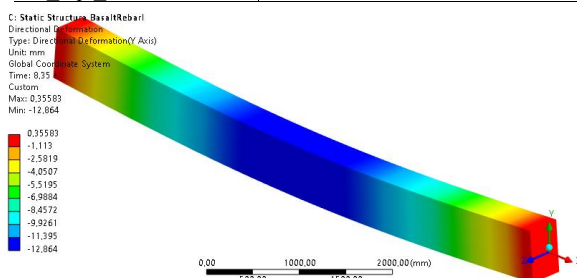


Рис. 4. Вертикальні прогини математичної моделі C_eqv_D

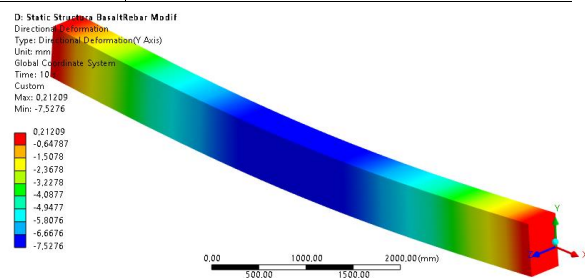


Рис. 5. Вертикальні прогини математичної моделі C_eqv_ε

Напруження бетону в балці з базальтовою арматурою майже вдвічі більші ніж в балці зі сталевую арматурою.

Різняться також аксіальні напруження безпосередньо в арматурі (рис. 6-8).

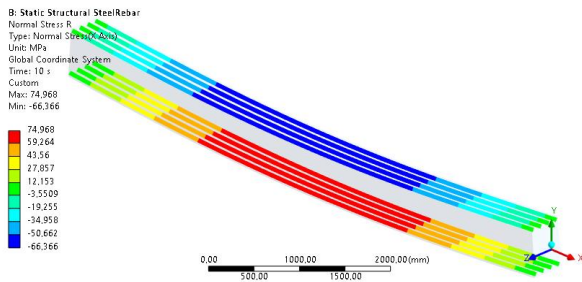


Рис. 6. Розподіл напружень в арматурі моделі S

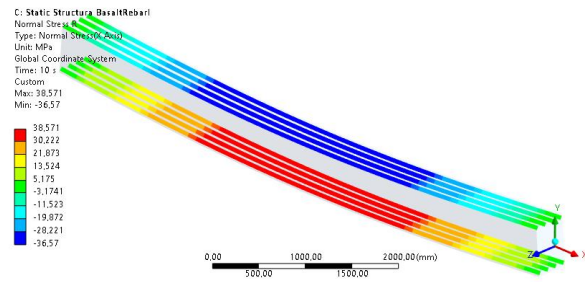


Рис. 7. Розподіл напружень в арматурі моделі C_eqv_ε

У зв'язку із більшою піддатливістю базальтова арматура в порівнянні зі сталевую сприймає набагато менші зусилля, відповідно в ній виникають менші напруження. Збільшення діаметру арматури в моделі C_eqv_ε призводить до ще більшого падіння напружень. Напруження розтягу і стиску в арматурі моделі C_eqv_D в 1,8 рази, а в моделі C_eqv_ε в 3,6 рази менші ніж в моделі St.

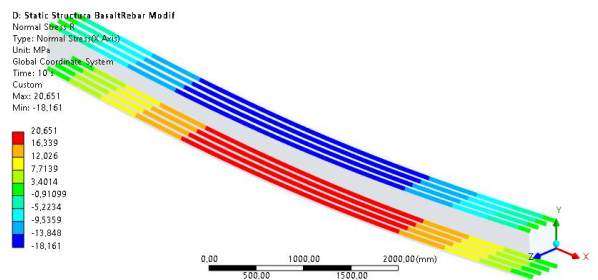


Рис. 8. Розподіл напружень в арматурі моделі C_eqv_ε

Останнім часом, для оцінки ефективності застосування того чи іншого матеріалу в конструкціях, застосовують коефіцієнти використання несучої здатності. Коефіцієнт використання несучої здатності сталевої арматури визначали як відношення напруження в арматурі до її межі плинності. Для композитної арматури – це відношення напруження до межі міцності арматури. За однакових навантажень максимальний коефіцієнт використання у сталевої арматури, мінімальний – у моделі C_eqv_ε. При навантаженні $1,68 \times 10^3$ МПа коефіцієнти використання несучої здатності нижньої арматури становлять: St – 0,300; C_eqv_D – 0,058; C_eqv_ε – 0,031. Для верхньої арматури ці показники дорівнюють: St – 0,27; C_eqv_D – 0,055; C_eqv_ε – 0,027.

Таким чином, для всіх моделей композитної арматури спостерігається недовикористання несучої здатності матеріалу.

Отримані в роботі результати дають змогу зробити порівняльний аналіз різних моделей застосування композитної арматури.

Найкращу роботу балки забезпечує модель C_eqv_ε. При цьому забезпечуються деформації на рівні значень деформацій балки зі сталевую арматурою, а напруження в бетоні, практично, не відрізняються від відповідних напружень у моделі St. Однак, коефіцієнт використання несучої здатності арматури в цій моделі дуже низький.

Високі значення повзучості аморфних склоподібних речовин можуть істотно впливати на розвиток деформацій і несучу здатність конструкцій, армованих подібними матеріалами, впродовж тривалого періоду часу. Тому подальші дослідження мають бути спрямовані на вивчення параметрів повзучості композитної арматури.

Список літератури

1. Masuelli MA. Fiber Reinforced Polymers - The Technology Applied for Concrete Repair. InTech; 2013.
2. Lapko A, Urbański M. Experimental and theoretical analysis of deflections of concrete beams reinforced with basalt rebar. Arch Civ Mech Eng 2015;15:223-30.
3. Kim HS, Shin YS. Flexural behavior of reinforced concrete (RC) beams retrofitted with hybrid fiber reinforced polymers (FRPs) under sustaining loads. Compos Struct 2011;93:802-11.
4. Luccioni B, Rougier VC. Numerical analysis of fibre reinforced polymer retrofitted masonry panels. Engineering Structures 2013;49:360-72.
5. Campbell FC. Structural Composite Materials. ASM International; 2010.
6. Pico D, Steinmann W. Synthetic fibers for composite applications. In: Rana S, Figueiro R, editors. Fibrous and Textile Materials for Composite Applications, Singapore: Springer; 2016, p. 135-170.
7. Holmes M. Global carbon fibre market remains on upward trend. Reinf Plast 2014;58:38-45.

8. Wang X, Shi J, Liu J, Yang L, Wu Z. Creep behavior of basalt fiber reinforced polymer tendons for prestressing application. *Mater Des* 2014;59:558-64.
9. Elgabbas F, Vincent P, Ahmed EA, Benmokrane B. Experimental testing of basalt-fiber-reinforced polymer bars in concrete beams. *Compos Part B-Eng* 2016;91:205-18.
10. Fiore V, Scalici T, Di Bella G, Valenza A. A review on basalt fibre and its composites. *Compos Part B-Eng* 2015;74:74-94.
11. Ramakrishnan V, Panchalan R. A new construction material – non-corrosive basalt bar reinforced concrete. *ACI* 2005;229:253-270.
12. Thorhallsson ER, Snaebjornsson JT. Basalt Fibers as New Material for Reinforcement and Confinement of Concrete. *Solid State Phenomena* 04/2016; 249. DOI:10.4028/www.scientific.net/SSP.249.79.
13. Gunnarsson A, Thorhallsson ER, Snaebjornsson JT. Simulation of experimental research of concrete beams prestressed with BFRP tendons. In proceedings of the XXII Nordic Concrete Research Symposium Reykjavik, Vodskov: 2014, p. 153-156 .
14. Thorhallsson ER, Gudmundsson SH. Test of prestressed basalt FRP concrete beams with and without external stirrups. In: Dancygier AV, editor. Proceedings of Fib symposium Engineering a Concrete future: Technology, modelling & Construction, Tel Aviv; 2013, p. 393-396.
15. S Sakhno, Y Liulchenko, T Chyrva, P O.Yanova L.Pischikova O. Determination of bearing capacity and calculation of the gain of the damaged span of a railway overpass by the finite element method. **Topical scientific researches into resource-saving technologies of mineral mining and processing.** — Sofia Publishing house “St.Ivan Rilski”, 2020. p.326-339 ISBN 978-954-353-408-1.
16. S Sakhno, Y Liulchenko, K. Bilashenko Investigation of the applicability of nonlinear mathematical models of concrete strength for modeling the destruction of concrete prisms Kryvyi Rih National University Hirnychyy visnyk. 2020,107 p. 68-73.
17. Sakhno, S. and Yanova, L. and Pischikova, O. (2021) Comparison of the structural properties of concrete beams with composite basalt and steel reinforcement. Energy- and resource-saving technologies of developing the raw-material base of mining regions. pp. 386-404. DOI: 10.31713/m1024.

Рукопис подано до редакції 28.03.24

УДК 622.647.2

Ю.Г. ГОРБАЧОВ, канд. техн. наук, проф., А.О. ХРУЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.,
А.С. ГРОМАДСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., Ю.І. ЧУМАК, ст. викладач
Криворізький національний університет

ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ОПОР КОВЗАННЯ БЕЗРОЛИКОВИХ СТРІЧКОВИХ КОНВЕЄРІВ

Мета. Метою роботи є удосконалення конструкції опор ковзання стрічкових конвеєрів для переміщення крупношматкових вантажопотоків. Необхідність перевезення величезних обсягів вантажів у гірничій та гірничозбагачувальній галузях промисловості вимагає широкого використання високопродуктивних транспортних засобів безупинного типу, насамперед стрічкових конвеєрів. З огляду на те, що вони не пристосовані для транспортування гірничої маси зі шматками крупністю більше 300-350 мм, важливого значення набувають спеціальні конструкції такого обладнання, у тому числі безроликів з ковзною стрічкою. Таким чином, важливість та актуальність теми дослідження не викликає жодних сумнівів.

Методи дослідження. Використання конвеєрів з ковзною стрічкою забезпечує можливість реалізації спокійного, малодинамічного режиму транспортування крупношматкових вантажів, кращі умови роботи стрічки та скорочення загальної вартості конвеєра за рахунок відмови від чисельних конструкцій дорогих та недостатньо надійних роликоопор. Проведені дослідження підтвердили, що використання дешевих і доступних антифрикційних матеріалів для виготовлення довгомірних елементів ковзання дозволить отримати високоефективні конструкції конвеєрних установок для подібних умов експлуатації. Для досягнення мети роботи потрібно запропонувати доцільну конструктивну схему опор ковзання, яка забезпечує найкращі умови роботи конвеєра. Виходячи з цього, зроблено висновок про необхідність обґрунтування раціональних параметрів елементів ковзання.

Наукова новизна. Досліджено та розроблено раціональну конструкцію опор ковзання безроликового стрічкового конвеєра для транспортування крупношматкових вантажопотоків, що відрізняється простотою, технологічністю виготовлення, зручністю проведення монтажних і демонтажних операцій, а також пристосованістю до роботи в умовах змінних навантажень на стрічку.

Практична значимість. Практичне впровадження запропонованої пропозиції забезпечить розширення області використання стрічкового конвеєрного транспорту у важких умовах видобувних і переробних підприємств гірничорудної промисловості.

Результати. Обґрунтовано та розроблено технічне рішення опорних антифрикційних елементів стрічкового конвеєра з ковзною стрічкою, що дозволяє транспортування крупношматкових вантажів з підвищеною швидкістю та зменшеними витратами енергії.

Ключові слова: технологічний процес транспортування гірничої маси стрічковими конвеєрами з опорами ковзання, антифрикційні елементи зі зниженим коефіцієнтом тертя ковзання.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-12-17

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Ефективна виробнича діяльність численних промислових підприємств, що пов'язана з необхідністю переміщення значних обсягів вантажів, немислима без використання сучасних засобів транспорту. У повній мірі це відноситься до гірничої та гірничозбагачувальної галузей, де щоденно потрібно транспортувати мільйони тонн мінеральної сировини та продуктів її переробки. Найбільш продуктивно можна забезпечити виконання такого грандіозного завдання за допомогою транспортного обладнання безупинного типу, у першу чергу конвеєрів [1-3].

Найбільш поширеним типом конвеєрного транспорту є стрічковий, який відрізняється достатньою простотою конструктивного виконання, технологічністю, економічністю та великою продуктивністю. Стрічкові конвеєри знаходять помітне використання у кар'єрах і на збагачувальних фабриках, усе більше застосовуються у підземних умовах. Проте в умовах гірничорудних видобувних підприємств для них існують певні обмеження, обумовлені значною вагою та абразивністю гірничої маси, а головне – крупністю шматків у рудопотоках. Внаслідок високої міцності більшості металевих руд, зокрема залізних, у гірничій масі, що транспортується із забоїв шахт і кар'єрів, може бути до 6% (за масою) шматків розміром до 1000 мм, а деколи й більше [4-6].

Утім, звичайні конструкції стрічкових конвеєрів із жорсткими роликоопорами здатні переміщати рудопотоки зі шматками крупністю не більше 300-350 мм. Крупніші камені під час транспортування створюють надзвичайно високий руйнівний динамічний вплив на стрічку та роликоопори, вартість яких у підсумку може складати до 70-80% загальної вартості конвеєра. Тому для переміщення крупношматкових вантажів потрібно використовувати спеціальні конструкції стрічкових конвеєрів, пристосовані для роботи у таких умовах експлуатації [3,5,6].

Серед відомих представників подібних установок слід згадати конвеєри з канатним поставом і підвісними роликоопорами, конструкції стрічково-ланцюгового, стрічково-канатного та стрічково-візкового типу. У першому випадку динамічний вплив крупношматкового рудопотоку амортизується за рахунок використання піддатливого канатного поставу, а решта вказаних конструкцій забезпечує звільнення конвеєрної стрічки від тягової функції – в них вона виконує лише роль підтримки вантажу. Ще одним можливим варіантом підвищення крупності транспортованих вантажопотоків є застосування безроликівих конвеєрів із ковзною стрічкою [5,6].

З огляду на це, задача вибору та обґрунтування раціональних конструктивних параметрів подібного обладнання є вельми важливою та актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій. Переміщення крупношматкового матеріалу стрічкою звичайного роликового конвеєра супроводжується наявністю різноманітних опорів, головні з яких викликаються особливим характером руху стрічки з вантажем. Причинами них стають перекошування стрічки разом зі шматками матеріалу через ролики, провисання її у проміжках між ними. Шар вантажу і сама стрічка при цьому деформуються, шматки і ролики втискаються у стрічку, багато енергії витрачається через тертя у підшипникових опорах роликів. Крім того, на таких конвеєрах часто за різними причинами спостерігаються бічні сходи стрічок і тертя їх бортів відносно нерухомих поставів установок. Усе це призводить до передчасного виходу з ладу стрічок і роликоопор [4,5].

На відміну від роликівих конструкцій, у конвеєрах з ковзною стрічкою остання рухається, спираючись на жолоб з матеріалу, що має низький коефіцієнт тертя ковзання. Процес переміщення стрічки з вантажем відбувається при цьому у стійкому спокійному режимі, немає ворушіння матеріалу, його шматки практично не змінюють свого положення, адже вони не змушені підніматися на ролики і провалюватися у проміжки між ними. Відсутні й решта перерахованих вище негативних факторів, якими супроводжується процес транспортування роликівих конструкціями. Основний опір руху стрічки при цьому обумовлюється тертям стрічки відносно

жолобу. Такі установки мають менші габаритні розміри у поперечному перетині, простіші у конструктивному та експлуатаційному відношенні через різке скорочення числа роликкоопор (вони, як правило, залишаються тільки на порожній гілці стрічки). Ще однією дуже важливою експлуатаційною перевагою стрічкових конвеєрів з опорами ковзання над звичайними роликковими конструкціями слід визнати можливість підвищення кута нахилу установок з 15-18 до 26° внаслідок відсутності ворухіння шматків вантажу на стрічці [4-6].

Існують різні конструктивні рішення стрічкових конвеєрів з ковзною стрічкою, але найбільш перспективними вважаються установки з опорами ковзання, виконаними з антифрикційних матеріалів. Ефективність промислового використання такого транспортного обладнання залежить головним чином від якості та фізико-механічних властивостей останніх. Від них очікуються мінімальні величини коефіцієнту тертя ковзання відносно стрічки, високі показники ударної та згинальної міцності, стійкості проти зносу, займистості та надлишкового водопоглинання, низька вартість та недефіцитність. Важливою вимогою до них є придатність до переробки за допомогою методу екструзії у довгомірні вироби або нанесення антифрикційного шару на основу з іншого матеріалу для формування з них жолобів ковзання вантажонесучої гілки стрічки.

Свого часу спеціалістами провідних вітчизняних науково-дослідницьких установ були проведені докладні роботи з вивчення та порівняльного аналізу можливих типів полімерних та інших матеріалів для опор ковзання. Серед них можна згадати композиції на основі фторопласту та капрону, конструкційний текстоліт, антифрикційні поліаміди різних видів тощо. Результати виконаних досліджень дозволили запропонувати декілька найбільш перспективних, а саме: високомолекулярний поліетилен низького тиску ПНД, композиційні матеріали на основі надвисокомолекулярного поліетилену СВМПЕ, деревну прескомпозицію з полімерними добавками ЕД-ПАН. Усі вони мають достатньо низький коефіцієнт тертя ковзання і порівняно невисоку вартість, технологічні у виготовленні та переробці [7-10].

Використання таких матеріалів у вигляді довгомірних смуг того чи іншого поперечного перетину для армування конвеєрного постапу дає можливість отримати працездатні конструкції конвеєрів для транспортування крупношматкової руди. Достовірність цього висновку багато разів була перевірена на практиці під час створення експериментальних установок конвеєрів з ковзною стрічкою. Наприклад, спільними зусиллями науковців інститутів НДГРІ та ІТТМ АН СРСР була розроблена конструкція модульного стрічкового конвеєра з опорами ковзання [11]. Для підвищення мобільності установки її приводні та лінійні секції змонтовані на ходових частинах шахтних вагонеток ВГ4,5А. Такий конвеєр, зібраний з необхідної кількості секцій за допомогою стяжних болтів, може бути у найкоротші терміни доставлений шахтним електровозом в будь-який потрібний у даний момент очисний забій для роботи у комплексі із засобами випуску руди з блоку, навантаження її на конвеєр та подальшого перевантаження у вагонетки магістральної електровозної відкатки. На рис. 1 показана схема лінійної секції конвеєра. Для вантажонесучої гілки стрічки опорна поверхня має вигляд увігнутого жолобу, утвореного поздовжніми смугами, виконаними з матеріалу ПНД. Для нижньої холостої гілки стрічки передбачені подвійні похилі роликкоопори.

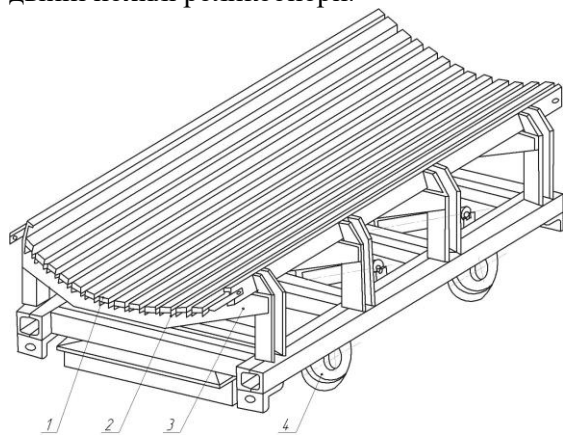


Рис. 1. Лінійна секція модульного стрічкового конвеєра з опорами ковзання: 1 – опори ковзання з поліетилену низького тиску ПНД; 2 – поздовжні; опорні швелери; 3 – поперечні опорні шпангоути; 4 – ходова частина

Окрім цього конвеєра працездатність розроблених технічних рішень щодо створення ефективних конструкцій стрічкових конвеєрів та живильників для шахт і дробильно-сортувальних фабрик була багаторазово підтверджена в інших розробках згаданих інститутів [7-9]. Таким чином було переконливо доведена необхідність широкого практичного впровадження подібного обладнання у гірничорудній промисловості в умовах

добувних та переробних підприємств, що мають справу з крупношматковими абразивними вантажопотоками.

Проте, питання вибору раціональних геометричних та експлуатаційних параметрів елементів ковзання безроликкових стрічкових конвеєрів потребує подальшого вивчення.

Постановка задачі. Для вирішення цього питання представляється доцільним обґрунтування раціонального поперечного перетину поздовжніх смуг ковзних опор поставів конвеєрів, можливих способів їх кріплення на останніх та додаткових заходів зниження коефіцієнтів тертя між ними і стрічкою.

Викладення матеріалу та результати досліджень. Для забезпечення потрібного режиму спокійного транспортування вантажу на ковзній стрічці без ворухіння шматків опори ковзання робочої гілки повинні утворювати майже суцільний увігнутий жолоб, принаймні у вигляді окремих смуг з невеликими проміжками між ними (як це показано на рис. 1). Для спрощення конструктивного виконання цих смуг краще виконувати їх з прямокутним поперечним перетином, але у цьому випадку вони будуть занадто матеріалоємними, а для їх кріплення на опорних майданчиках поставу потрібно буде використовувати численні болтові з'єднання, що значно підвищить витрати на монтажні-демонтажні операції та заміну зношених елементів новими.

Тому більш раціональними та економічними з точки зору витрат матеріалу та робочого часу будуть елементи ковзання у вигляді поздовжніх смуг каркасного типу з внутрішніми порожнинами (наприклад, П-подібної форми у поперечному перетині) та з можливістю швидкого закріплення на сталевих опорах за допомогою пружних фіксаторів. Фіксатори закріплені на швелері за допомогою заклепок через амортизаційну прокладку. Елемент ковзання фіксується на поставі шляхом натискання і замикання на фіксаторі. Демонтаж елемента здійснюється зніманнями стрижнями, що уводяться у спеціальні монтажні пази і виштовхують їх догори.

Незважаючи на високі заявлені антифрикційні властивості пропонованих матеріалів для опор ковзання, в реальних умовах експлуатації вони можуть бути суттєво гіршими. Абразивний рудний дріб'язок потраплятиме у місця контакту стрічки з елементами ковзання і підвищуватиме величину коефіцієнту тертя. За таких обставин доцільним буде використання додаткових практичних заходів для його зниження.

Хороші результати може дати застосування змащувальних рідин, які потрібно подавати у ці зони контакту. Разом із зниженням опору руху стрічки по жолобу з антифрикційним покриттям вони запобігатимуть нагріву третьових поверхонь [12]. Для здешевлення цієї операції в якості змащувальної рідини можна використовувати воду.

Відомі технічні рішення подібного типу описані у патентній літературі. Наприклад, у британському патенті [13] пропонується використовувати зволожувач з резервуаром для змащувальної рідини, який постачений капілярними отворами в елементах ковзання, виконаних у вигляді труб. Рідина з резервуару нагнітається у труби за допомогою насоса. Основним недоліком такого рішення є необхідність використання складного насосного обладнання.

Для спрощення конструкції зволожувач може бути виконаний у вигляді касети з гнотом, один кінець якого виходить з отвору в елементі ковзання і контактує з неробочою поверхнею вантажної гілки стрічки, а другий розташовується у резервуарі зі змащувальною рідиною [14]. У даному випадку кількість рідини, що потраплятиме у зону контакту третьових поверхонь, може бути недостатньою.

Кращим, на наш погляд, рішенням представляється примусова дозована подача змащувальної рідини у моменти, коли вона особливо потрібна. Така подача має бути диференційованою: більше робоче навантаження на стрічку (від рудопотоку у цілому та від окремих крупних шматків матеріалу), а, значить, більший натиск останньої на опори ковзання повинні викликати зростання подачі рідини у зону контакту. Подібне технічне рішення запропоновано в а.с. [15]. В ньому елемент ковзання з нижньою частиною у вигляді ластівчина хвоста входить в еластичний корпус і спирається на нього. У цьому корпусі під елементом ковзання передбачена порожнина з рідиною, яка може потрапляти у зону контакту стрічки з елементом через отвір у ньому. Під час роботи конвеєра у моменти збільшення навантаження на стрічку елемент ковзання стискає корпус, об'єм порожнини зменшується і рідина витискається через отвір під стрічку.

Пропонується об'єднати переваги такого роду подачі змащувальної рідини з описаними вище конструктивно-експлуатаційними властивостями елементів ковзання стрічкового конвеєра. На рис. 2 показана схема конструктивного виконання та способу закріплення такого елемента на опорній поверхні конвеєрного поставу, виконаної зі стандартного прокатного профілю (наприклад, швелеру). Опорний швелер 1 нерухомо закріплений на поставі конвеєра. У ньому роз-

ташовується амортизаційна прокладка 3, а у центральній канавці останньої з певним кроком – пружні фіксатори 4. Швелер, прокладка і фіксатори з'єднуються між собою за допомогою заклепок 5. Елемент ковзання 2 закріплюється на описаній конструкції шляхом натискання зверху і замикає на фіксаторах. При цьому між елементом ковзання і амортизаційною прокладкою утворюється порожнина 8, в яку через канал 9 із загального резервуару подається змащувальна рідина. Постачання рідиною усіх елементів ковзання поперечного перетину жолобу вантажної гілки конвеєра здійснюється з двох таких резервуарів, розташованих з обох боків поставу вище елементів для створення постійного підпору рідини.

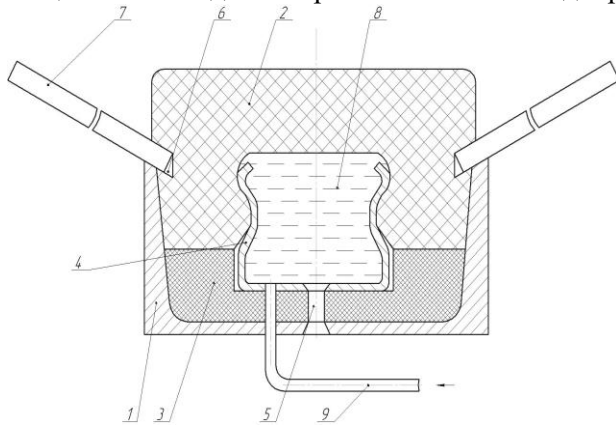


Рис. 2. Можливий варіант конструктивного виконання та способу закріплення елемента ковзання на опорній поверхні конвеєрного поставу: 1 – опорний швелер; 2 – елемент ковзання; 3 – амортизаційна прокладка; 4 – пружний фіксатор; 5 – заклепка; 6 – монтажні пази; 7 – знімні стрижні; 8 – порожнина для змащувальної рідини; 9 – канал подачі змащувальної рідини з резервуару

При підвищенні величини навантаження на стрічку елемент ковзання буде стискати амортизаційну прокладку і зменшувати об'єм внутрішньої порожнини під собою, що викликатиме витискання змащувальної рідини через отвори у зону контакту стрічки з елементом, причому об'єм витискання буде пропорційним величині навантаження. Такий диференційований режим змащення забезпечуватиме раціональне зниження сил тертя між стрічкою та антифрикційними поверхнями елементів ковзання у залежності від умов роботи конвеєра. В результаті можна очікувати суттєвого зниження споживаної потужності приводу конвеєра та забезпечення можливості підвищення швидкості транспортування крупношматкових вантажів у 1,5-2 рази у порівнянні з роликowymi конвеєрами за рахунок постійного охолодження змащувальною рідиною як зон контакту стрічки з опорами ковзання, так і внутрішніх поверхонь останніх.

Для спрощення демонтажу елемента ковзання, показаного на рис. 2, у ньому передбачені монтажні пази 6, в які в разі необхідності вставляються знімні стрижні 7 для виштовхування елемента ковзання вгору.

Для спрощення демонтажу елемента ковзання, показаного на рис. 2, у ньому передбачені монтажні пази 6, в які в разі необхідності вставляються знімні стрижні 7 для виштовхування елемента ковзання вгору.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Практичне впровадження запропонованих технічних рішень дасть можливість отримати працездатні конструкції стрічкових конвеєрів з ковзною стрічкою для транспортування крупношматкових рудопотоків в умовах видобувних та збагачувальних підприємств гірничорудної галузі. Для цього потрібні подальші дослідження з метою створення та промислового випробування таких конструкцій.

Список літератури

1. Турушин В.О. Машины промышленного транспорта безперервної дії: навч. посібник / В.О. Турушин, В.В. Федорченко. – Луганськ: Вид-во СХУ ім. В. Даля, 2009. – 134 с.
2. Гончарук О.М. Вантажопідійомна, транспортуєча та транспортна техніка / О.М. Гончарук, В.М. Стрільць. – Рівне: НУВГП, 2006. – 345 с.
3. Біліченко М.Я. Транспорт на гірничих підприємствах: Підручник для вузів / М.Я. Біліченко, Г.Г. Півняк, О.О. Ренгевич, В.І. Тарасов, А.М. Варшавський, О.В. Денищенко, Ю.М. Зражевський, О.С. Пригунов, В.С. Троцило, Ю.М. Шендерович. – Дніпропетровськ: НГУ, 2005. – 646 с.
4. Громадський А.С. Машины допоміжних процесів переробки руд / А.С. Громадський, Ю.Г. Горбачов, А.С. Ліфенцов. – Кривий Ріг: Видавничий центр ДВНЗ «КНУ», 2012. – 276 с.
5. Громадський А. С. Проектування гірничих машин і комплексів для видобутку та переробки руд: Навч. посіб. для студ. вищих і серед. спец. навч. закладів / А.С. Громадський, Ю.Г. Горбачов, А.О. Хруцький, О.С. Ліфенцов. – Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ, 2017. – 528 с.
6. Дьяков В.А. Ленточные конвейеры в горной промышленности / В.А. Дьяков, Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев, И.В. Запенин, Ю.С. Пухов, Е.Е. Шешко. – М.: Недра, 1982. – 349 с.
7. Разработка и испытания в промышленных условиях экспериментальных образцов оборудования повышенной эксплуатационной надежности системы подземного и поверхностного транспорта рудных шахт / Отчет о НИР / рук. Е.Е. Новиков. – Днепропетровск: ИГТМ АН УССР, 1987. – 52 с.
8. Разработка, изготовление и испытания в условиях ЗЖРК экспериментального образца конвейера / Отчет о НИР № 2.2-3-а-97-88-Р / рук. А.В. Бровко. – Кривой Рог: НИГРИ, 1989. – 103 с.

9. Создание новых конструкционных материалов на основе высокомолекулярных полимеров и оборудования для их переработки для изготовления опор скольжения безроликовых конвейеров / Отчет о НИР № 093202.50-062 / рук. **Г.Ф. Волынский**. – Кривой Рог: НИГРИ, 1993. – 45 с.

10. **Парховник Р.Б.** Выбор материала опор скольжения забойного ленточного конвейера / Шахтный и карьерный транспорт, вып. 11 / **Р.Б. Парховник, Ю.Г. Горбачев, А.Г. Сыч**. – М.: Недра, 1990. – С. 166-169.

11. **Каварма И.И.** Модульный ленточный конвейер с опорами скольжения / Шахтный и карьерный транспорт, вып. 11 / **И.И. Каварма, Р.Б. Парховник, Ю.Г. Горбачев, И.А. Шпакунов**. – М.: Недра, 1990. – С. 163-166.

12. **Костерин Л.С.** Выбор основных параметров смазочно-охлаждающей среды для конвейера с лентой на опорах скольжения / Шахтный и карьерный транспорт, вып. 11 / **Л.С. Костерин**. – М.: Недра, 1990. – С. 169-173.

13. Патент Великої Британії № 1273134, В8А, 1972.

14. А.с. СССР № 793892 «Ленточный конвейер», В65G 15/28, 1979 / **С.Д. Щербаков**.

15. А.с. СССР № 1487356 «Ленточный конвейер», В65G 15/28, 1987 / **И.И. Каварма, Р.Б. Парховник, Ю.Г. Горбачев, С.Н. Козырев, И.А. Шпакунов**.

Рукопис подано до редакції 22.03.24

УДК [005.21:330.322]:[336.14:352]

Н.О. СЛОБОДЯНЮК, д-р екон. наук, проф., Р.В. КОРОЛЕНКО, канд. екон. наук, доц.
Криворізький національний університет

ТЕОРЕТИКО-ПРАВОВІ ЗАСАДИ ФОРМУВАННЯ ІНВЕСТИЦІЙНО-СТРАТЕГІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ МІСЦЕВИХ БЮДЖЕТІВ В УМОВАХ ДЕЦЕНТРАЛІЗАЦІЇ ДЕРЖАВНОЇ ВЛАДИ УКРАЇНИ

Мета. Метою статті є семантичний аналіз дефініцій «децентралізація», «інвестиційний потенціал», що складає теоретичну основу інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів, а також систематизація, конкретизація його ресурсних складових та ризиків впливу різної етіології, обґрунтування ефективних інструментів зростання інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів відповідно до прийнятих правових засад його функціонування та розвитку в умовах децентралізації.

Методи дослідження. В статті використано методи: узагальнення й системний метод, аналіз і синтез, семантичний аналіз, абстрактно-логічний аналіз, метод порівняльного аналізу.

Наукова новизна. Набуло подальшого розвитку науковий підхід трактування сутності інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів в умовах децентралізації, що визначає їх здатність формувати сприятливий інвестиційний клімат в умовах дії ризиків різної етіології, в тому числі ризиків бюджетної децентралізації, можливість залучати реальні інвестиційні потоки стратегічного значення, нарощувати фінансову спроможність з метою вирішення нагальних соціально-економічних завдань відповідно до прийнятої стратегії розвитку регіону задля досягнення показників національної безпеки.

Практичне значення. Основні наукові положення статті можуть бути доведені до рівня методичних розробок й практичних рекомендацій для обізнаності громадськості, бізнесу та державних структур щодо питань залучення інвестиційних ресурсів до місцевих бюджетів в умовах децентралізації.

Результати. Досліджено та конкретизовано суть бюджетної децентралізації як механізму пошуку додаткових джерел власних ресурсів місцевих бюджетів через розширення доступу до інструментів вітчизняного й міжнародного фінансового ринку, обґрунтовано позитивний вплив реформи децентралізації на інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів. Ідентифіковано, систематизовано існуючі ризики впливу на інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів, виокремлено групу ризиків бюджетної децентралізації. Надана оцінка динаміці змін кількості договорів ДПП за 2022-2023 рр., обґрунтовано фактори, що стримують їх ефективну реалізацію. Досліджено вплив міжнародних донорів на інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів.

Ключові слова: місцевий бюджет, децентралізація, інвестиційно-стратегічний потенціал, ДПП, інвестиції.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-17-23

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Реформа децентралізації, що розпочата з 2014 року, має на меті не тільки формування ефективного місцевого самоврядування й територіальної організації влади задля подолання дисбалансу соціально-економічного розвитку регіонів, підвищення якості та рівня життя населення, формування відповідного середовища з надання доступних публічних послуг, але й сприяє загалом підвищенню рівня конкурентоспроможності таких регіонів, в тому числі за рахунок формування інвестиційного стратегічного потенціалу місцевих бюджетів. Відтак, обрана тематика дослідження є вкрай актуальною та носить прикладний характер.

Аналіз досліджень і публікацій. Теоретико-методологічні й практичні аспекти щодо розвитку місцевих бюджетів в контексті фінансової децентралізації національної економіки України всебічно досліджено у працях науковців та практиків: Андрущенко В., Ковалюк О., Кириленко О., Пасічник Ю., Раделицький Ю., Тропіна В., Косова Т., Слободянюк Н., Першко Л., Алексеєнко Л., Дубина М., Маргасова В., Данилюк Ю., Приходько Х., Крисоватий А., Юрій С. та ін. Питаннями бюджетних інвестицій займаються Затонацька Т., Баніт Ю., Рожко О., Малиняк Б., Загірняк Д.; дослідження сутності, складових та механізму управління інвестиційним потенціалом територіальних громад розкриваються в працях П. Жук та З. Сірик; ключові питання теоретико-методичних основ щодо передумов розвитку та формування ефективних механізмів фінансового забезпечення інвестиційного потенціалу місцевих бюджетів підіймаються в дослідженнях Снісаренко О., Василенко О., Хлівний В., Діденко Л та ін. Проте через недостатній рівень напрацювань з даної проблематики царина наукових досліджень потребує подальшого ґрунтовного аналізу питань щодо семантики інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів, його складових, джерел та чинників зростання та ін. в умовах розбудови місцевого самоврядування.

Постановка задачі. Метою статті є семантичний аналіз дефініцій «децентралізація» та «інвестиційний потенціал», що складає теоретичну основу інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів, а також систематизація та конкретизація його ресурсних складових та ризиків впливу різної етіології, обґрунтування ефективних інструментів зростання інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів відповідно до прийнятих правових засад його функціонування та розвитку в умовах децентралізації.

Викладення матеріалу та результати. Концепція реформи місцевого самоврядування ґрунтується на підвищенні рівня фінансової самодостатності місцевих бюджетів, зміцненні їх доходної частини, розширенні фінансових повноважень органів місцевого самоврядування, формуванні механізму оптимального розподілу бюджетних ресурсів, збільшенні алокативної (розподільної) ефективності наданих суспільних послуг [1,2].

Першочерговим вбачається здійснення аналізу категорії «децентралізація», що досліджується в працях науковців та професіоналів-практиків. Так, група науковців Міжнародного центру перспективних досліджень наголошують, що: «бюджетна децентралізація – це процес передавання повноважень (функцій, компетенцій і відповідальності) від центрального уряду до місцевих урядів (органів місцевого самоврядування). Така передача повноважень має супроводжуватися передачею відповідних фінансових ресурсів на виконання цих повноважень через запровадження місцевих податків або трансформацію чи закріплення частини загальнодержавних податків за місцевими бюджетами, що отримали нові повноваження» [3, с.7].

На думку Возняк Г. В., бюджетна децентралізація в широкому розумінні – це «розподіл відповідальності між органами влади різних рівнів у процесі управління бюджетними коштами» [4, с.254]. При цьому ключовим є саме вдосконалення міжбюджетних відносин при збереженні «централізації» бюджетного процесу в частині розподілу компетенцій між суб'єктами бюджетних відносин. «У вузькому розумінні бюджетна децентралізація передбачає певну ступінь автономності місцевих органів влади, яка дозволяє їм приймати виважені рішення в бюджетно-податковій сфері» [4, с.254].

Науковці Наконечна Г. та Матвійчук Н. в своїй роботі наголошують на тому, що ототожнення децентралізації з реорганізацією влади було зафіксовано у доповіді Програми розвитку ООН ще в 1997 році. Так, документ містив посилання, де зазначалось наступне: «децентралізація означає реструктуризацію або реорганізацію влади, в результаті чого виникає система спільної відповідальності між установами управління на центральному, регіональному та місцевому рівнях відповідно до принципу субсидіарності, тим самим збільшуючи загальну якість та ефективність системи управління разом з підвищенням авторитету і потенціалу управління на субнаціональному рівні» [5, с.41].

Власюк О. при визначенні бюджетної децентралізації акцентує на реформуванні територіальної організації влади та змінах у бюджетно-податковому законодавстві [6]. Зілінська А.С. ототожнює бюджетну децентралізацію з фінансовою децентралізацією та розкриває її зміст, як «процес розподілу функцій, фінансових ресурсів і відповідальності за їх використання між центральним і локальним рівнями управління» [7, с. 548].

Досить влучним, на наш погляд, є розуміння бюджетної децентралізації, що запропоновано Булавинець В.М.: «це перерозподіл та закріплення загальнодержавних податків та зборів за місцевими бюджетами; прямі міжбюджетні відносини та горизонтальне бюджетне вирівнювання податкоспроможності місцевих бюджетів; розширення бюджетної автономії місцевих бюдже-

тів; спрощення процедури здійснення місцевих запозичень та розширення доступу до вітчизняного та міжнародного фінансового ринку» [8].

Таким чином, конкретизація бюджетної децентралізації як механізму щодо пошуку додаткових джерел власних ресурсів місцевих бюджетів через розширення доступу до інструментів вітчизняного й міжнародного фінансового ринку визначає інвестиційний потенціал таких бюджетів та формує теоретичне підґрунтя даного наукового дослідження.

Наразі дослідженню підлягає дефініція «інвестиційний потенціал місцевих бюджетів» та розкриття основних змістовних детермінант такого поняття. Нормативно не визначено тлумачення такої категорії. Крім того, переважна кількість наукових досліджень присвячено саме розгляду інвестиційного потенціалу територіальної громади чи інвестиційного потенціалу регіону. Оскільки територіальна громада функціонує як самостійно адміністративно-територіальна одиниця, економічною основою діяльності якої є місцевий бюджет, що виступає фінансовою базою місцевого самоврядування зокрема. А відповідно до Бюджетного кодексу України (БКУ) бюджети об'єднаних територіальних громад відносяться до місцевих бюджетів, а стаття 2 БКУ розкриває наступне: «місцеві бюджети - бюджет Автономної Республіки Крим, обласні, районні бюджети та бюджети місцевого самоврядування» [9]. Відтак, автори вбачають доцільним виконати дослідження такого питання в контексті поєднання тлумачень «інвестиційний потенціал місцевих бюджетів» та «інвестиційний потенціал територіальної громади», при цьому дані категорії не є тотожними, але виступають дуже близькими за економічними змістом та структурою, крім того, інвестиційний потенціал місцевих бюджетів складається з інвестиційного потенціалу бюджету Автономної Республіки Крим, інвестиційного потенціалу обласних бюджетів, інвестиційного потенціалу районних бюджетів та інвестиційного потенціалу бюджетів місцевого самоврядування (територіальної громади).

Загальновідомо, що інвестиційний потенціал можна розглядати на основі ресурсного підходу, що передбачає сукупність відповідних інвестиційних ресурсів та можливостей щодо їх залучення. Особливістю інвестиційного потенціалу є фактор часу, тобто «відкладений у часі ефект, який має соціально-економічний або суспільний характер» [10]. Зрозумілим є вірогідність неотримання корисного ефекту через неефективні управлінські рішення органів місцевого самоврядування в процесі реалізації стратегії залучення інвестиційних ресурсів та поповнення доходної частини бюджетів, відтак, інвестиційний потенціал місцевих бюджетів виступає в ролі об'єкта управління, що передусім потребує розкриття економічного змісту сутності такої категорії.

Виникає потреба визначення сутності дефініції «інвестиційний потенціал». Аналіз літератури виявив розбіжності в трактуванні даної категорії серед науковців (табл. 1).

Таблиця 1

Аналіз дефініції «інвестиційний потенціал»

Науковець	Зміст дефініції
Кучерук Г.Ю. Вовк О.М.	«організована сукупність внутрішніх та зовнішніх економічних можливостей та ресурсів, які створюють умови для розвитку та забезпечують реалізацію стратегічних і тактичних цілей в сфері інвестиційної діяльності» [10, с. 12]
Бережна І. Ю.	«запас наявних можливостей інвестиційних ресурсів певного таксономічного рівня, потужність потоку яких щодо продукування інвестиційних доходів-ризиків зумовлена спроможностями інституційного середовища забезпечити безперервність та інтенсивність протікання інвестиційного процесу» [11, с. 256]
Іванов С.В.	«сукупність ресурсів, факторів та умов для інвестування» [12, с. 99]
Дресвянніков Д. О.	«сукупна можливість власних і залучених економічних ресурсів забезпечувати при наявності сприятливого інвестиційного клімату інвестиційну діяльність з метою і масштабах, визначених економічною політикою країни та стратегією розвитку об'єкта управління» [13, с. 25]
Бутко М. Акименко О.	«здатність регіону генерувати новий рівень прибутку за умови фінансування розвитку його соціально-економічної сфери» [14, с. 35]
Нечитайло У. П.	«здатність досягти бажаного результату через реалізацію та управління інвестиційними можливостями, що проявляються через наявні інвестиційні ресурси» [15, с. 29]
Жук П. В. Сірик З. О.	«сукупність ресурсів та можливостей (природно-ресурсних, соціальних, фінансово-економічних, інституційно-управлінських тощо), які є об'єктом управління з боку органів влади територіальної громади, спрямованого на залучення інвестиційних ресурсів для вирішення проблем територіального розвитку» [16, с. 18]
Сірик З. О.	здатність територіальної громади «забезпечити високий рівень економічного розвитку регіону, зростання його питомої ваги для національної економіки, практичну реалізацію концепції сталого розвитку на локальному рівні» [17, с. 126]
Косова Т.Д. Слободянюк Н.О.	«сукупність прогностичних інвестиційних ресурсів, які можна мобілізувати для досягнення цілей соціальної політики територіальних громад і подальшого інвестування, на зростаючій основі» [18, с. 138]

Отже, інвестиційний потенціал досить часто пов'язують із наявним запасом інвестиційних ресурсів або інвестиційними можливостями, потужністю потоку щодо генерування інвестиційного доходу, сукупністю власних та залучених економічних ресурсів забезпечувати інвестиційну діяльність.

Автори статті пропонують розуміти під інвестиційно-стратегічним потенціалом місцевих бюджетів їх здатність щодо формування сприятливого інвестиційного клімату в умовах дії ризиків різної етіології, в тому числі ризиків бюджетної децентралізації, можливість залучати реальні інвестиційні потоки стратегічного значення, нарощувати фінансову спроможність з метою вирішення нагальних соціально-економічних завдань відповідно до прийнятої стратегії розвитку регіону задля досягнення показників національної безпеки.

Нівелювання ризиків децентралізації при формуванні інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів має на меті досягнення бюджетної ефективності територій, що забезпечується високим рівнем професійного менеджменту, ресурсною базою та архітектонікою горизонтальної й вертикальної підпорядкованості бюджетів.

На думку Ваховича І. М. та Недопада Г. В., бюджетна ефективність територій залежить від сукупності факторів впливу фінансових (розширено перелік власних доходів місцевих бюджетів та їх обмежене використання, закріплена процесуальна самостійність органів місцевого самоврядування у бюджетному процесі, забезпечення місцевими бюджетами вільного переміщення товарів, послуг та факторів виробництва між територіями регіону, самостійний вибір міськими радами установ (казначейство, комерційний банк) для обслуговування рахунків місцевого бюджету, зміни у трансфертній політиці), адміністративно-територіальних (природно-кліматичні, екологічні, демографічні умови, інфраструктура, інвестиційна привабливість територій) та політичних (виборчі списки органів місцевого самоврядування та їх вплив на формування інституційного середовища регіону та бізнес середовища ОТГ) аспектів децентралізації [19]. Підвищення рівня показника бюджетної ефективності територій досягається в умовах максимізації зазначених аспектів при визначенні якості, продуктивності, трудомісткості, рентабельності бюджетних ресурсів, а також питомої ваги інвестиційних ресурсів місцевих бюджетів, котрі можуть бути капіталізовані. Автори вважають, що на інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів впливає тип структури бюджету (збалансований, профіцитний та дефіцитний), що прямо визначає розмір бюджетних ресурсів в структурі бюджету розвитку, їх вид, форму та джерело надходження, а також окреслює першочергові стратегічні задачі управлінського апарату щодо залучення додаткових інвестиційних потоків задля зміцнення фінансової стійкості й реалізації прийнятої стратегії соціально-економічного розвитку регіону (громади).

Ризики бюджетної децентралізації чинять негативний вплив на формування інвестиційного середовища місцевих бюджетів, серед яких варто виокремити наступні: ризики браку професійних менеджерів та корупційні ризики; ризики нестачі фінансових ресурсів та зменшення трансфертного фінансування; ризики поглиблення асиметрій ресурсних можливостей розвитку територій; ризики макроекономічної нестабільності; ризики порушення соціальної справедливості; ризики територіальної фінансової нерівності держави; ризики втрати цілісності та суверенітету країни [19]. Відтак, інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів формується під впливом зазначених ризиків, що в практичному розумінні проявляється рівнем досягнення економічних, соціальних, бюджетних та майнових показників в рамках прийнятої стратегії розвитку регіону.

Інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів має наступні ресурсні складові: фінансові; матеріальні; трудові; інноваційно-інвестиційні; природні; інформаційні, інтелектуальні. Нормативно-правове, адміністративно-управлінське, інфраструктурне та інституційне забезпечення безпосередньо чинять вплив на інвестиційне середовище місцевих бюджетів та є каталізатором відповідних інвестиційних процесів [16].

Реформа децентралізації позитивно впливає на інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів через розширення їх бюджетної самостійності, впровадження відповідних бюджетних механізмів перерозподілу фінансів (субвенції та міжбюджетні трансферти), залучення приватних інвестицій відповідно до договірних умов державно-приватного партнерства, залучення коштів міжнародних фондів та організацій, грантів від донорів тощо.

На сьогодні стратегічно важливим для України є орієнтація на відбудову зруйнованої інфраструктури внаслідок воєнних дій на основі механізму державно-приватного партнерства

(ДПП). В 2023 р. в порівнянні з 2022 р. спостерігався приріст кількості договорів на умовах ДПП на 5 од., тобто 198 договорів відносно 193, проте кількість діючих серед зазначених не перевищувала 9 % (2022 р.) та 11 % (2023 р.). Так, «за даними центральних та місцевих органів виконавчої влади в Україні станом на 01.01.2024 р. на умовах ДПП укладено 198 договорів, з яких реалізується 22 договори (10 - концесійних договорів, 6 - договорів про спільну діяльність, 6 - інші договори), 166 договорів не реалізується (115 - не виконується, 51 - розірвані / закінчився термін дії), 10 призупинені у зв'язку зі збройною агресією російської федерації» [20]. Зауважимо, що протягом 2023 року найбільша кількість договорів на умовах ДПП було реалізовано в сфері збору, очищення та розподілення води (Львівська та Миколаївська обл. по 2 од., Дніпропетровська, Закарпатська, Запорізька та Київська обл. по 1 од.), в сфері виробництва, транспортування і постачання тепла та розподілу і постачання природного газу (Закарпатська обл. 2 од., Житомирська та Чернігівська обл. по 1 од.), в сфері туризму, відпочинку, рекреації, культури та спорту (Волинська, Івано-Франківська, Кіровоградська та Одеська обл. по 1 од.), в сфері управління відходами, крім збирання та перевезення (Одеська та Полтавська обл. по 1 од.) та в сфері охорони здоров'я (Київська обл. 2 од.) та інші (Запорізька та Хмельницька обл. по 1 од.) [20].

Стримуючими факторами реалізації договорів ДПП є не тільки збройна агресія рф, але й недосконалість правового регулювання, відсутність податкових стимулів, тривалі бюрократичні процедури щодо підготовки, оформлення й експертизи договорів, корупційні ризики тощо. «Проект Закону про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо вдосконалення механізму залучення приватних інвестицій з використанням механізму державно-приватного партнерства для пришвидшення відновлення зруйнованих війною об'єктів та будівництва нових об'єктів, пов'язаних з післявоєнною перебудовою економіки України» №7508 від 01.07.2022 р. [21], котрий має на меті спрощення та удосконалення процедури оформлення та реалізації договорів ДПП, передбачає зміни у джерелах фінансування (пропонується ввести у законодавство поняття «донора», що конкретизує юридичний статус приватного партнера), формах державної підтримки (передбачається розширення списку форм ДПП та вдосконалення механізму щодо державної підтримки приватного інвестора шляхом компенсації різниці між передбаченим і фактичним рівнем попиту на товари чи послуги при реалізації таких договорів ДПП), запровадження проектів на відновлення інфраструктури та економіки внаслідок військової агресії проти України (такі проекти не передбачають розроблення концептуальних записок, техніко-економічного обґрунтування та виконання аналізу ефективності, що дозволить скороти термін підготовки договорів на 10-12 місяців), «інфраструктура в розстрочку» (захищені платежі з бюджету на користь приватного партнера), запровадження та запуск у 2025 році єдиної електронної системи договорів ДПП для визначення приватного партнера, запровадження стандарту єдиного європейського закупівельного документа (ESPD) тощо [21, 22].

Якісно-кількісні показники реалізації договорів на умовах ДПП сприяють зміцненню інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів, оскільки безумовними перевагами впровадження колаборацій бізнесу (вітчизняних та міжнародних приватних інвесторів) та влади (об'єкти державної та комунальної власності) на умовах ДПП є підвищення ефективності управління державною та комунальною власністю, підвищення якості та рівня надання публічних послуг для бізнесу та населення регіону, удосконалення механізму розподілу видатків на публічні послуги та утримання установ, покращення стану інфраструктурних об'єктів та впровадження новітніх технологій, зниження навантаження на державний бюджет за рахунок надходження інвестиційних потоків від донорів, зростання ВВП, зміцнення інвестиційної привабливості та ін.

Інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів ефективно може зміцнюватися й зростати також за рахунок проектів міжнародної підтримки, що вкрай необхідно в умовах збройного конфлікту та відбудови України. Такі проекти та програми орієнтовані на: створення багаторівневої системи управління при реалізації реформи місцевого самоврядування; розширення можливостей місцевого самоврядування, посилення фінансової спроможності територіальних громад за рахунок ефективного адміністрування податків та зборів, підтримки місцевого підприємництва, гармонізації проектів з регіональною політикою; цифрову трансформацію на місцевому рівні; матеріальну допомогу донорів; юридичну, фінансову та інформаційно-консультаційну підтримку з питань управління освітою, поводження з відходами, водопоста-

чанням, водовідведенням та транспортом, розбудови спроможних медичних мереж, відновлення та розвитку інфраструктурних об'єктів тощо. Серед масштабних проєктів реформування місцевого самоврядування в умовах децентралізації національної економіки слід виокремити наступні: Програма U-LEAD (01.01.2016-31.12.2023 рр. Бюджет допомоги: 176 млн EUR), Програма USAID DOBRE (08.06.2016-30.09.2025 рр. Бюджет допомоги: 107 млн USD), Проєкт USAID «Підвищення ефективності роботи і підзвітності органів місцевого самоврядування» («ГОВЕРЛА») (19.03.2021-18.03.2027 рр. Бюджет допомоги: 150 млн USD), Програма Ради Європи (01.01.2023-31.12.2024 рр. Бюджет допомоги: 1,4 млн EUR), Проєкт DECIDE (01.02.2020-31.05.2025 рр. Бюджет допомоги: 11,7 млн CHF), SALAR International (08.09.2014-31.01.2024 рр. Бюджет допомоги: 79,95 млн SEK), Проєкт PROSTO (13.09.2021-31.01.2024 рр. Бюджет допомоги: 47 млн SEK), Проєкт UCORD (01.12.2022-30.11.2026 рр. Бюджет допомоги: 8,74 млн CHF), Проєкт SURGe (01.10.2019-31.12.2024 рр. Бюджет допомоги: не розголошується) [23].

Правові засади інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів ґрунтуються на нормах діючого вітчизняного законодавства в сфері інвестицій, інновацій, бюджетного, земельного, податкового, митного тощо законодавства, а також передбачають імплементацію ключових положень міжнародного інвестиційного права та ін. Суттєвий вплив на формування та розвиток інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів чинять міжнародні фінансові інституції, в сфері діяльності яких передбачено реалізацію відповідних програм щодо зміцнення спроможності державного сектора України за напрямом підтримки та розвитку ДПП: UNECE International PPP Centre of Excellence, European PPP Expertise Centre, The National Council For Public-Private Partnerships, PPP in Infrastructure Resource Center, International Project Finance Association (IPFA), UNIDO, IFC тощо.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Отже, інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів потребує конкретизації його складових, постійного моніторингу, оцінки на предмет пошуку джерел його зміцнення, зростання та ефективного використання з урахуванням вимог реформи децентралізації та розбудови місцевого самоврядування в умовах дії ризиків зовнішнього та внутрішнього середовища. Саме подальше впровадження механізму державно-приватного партнерства, а також залучення й поширення міжнародних програм та проєктів від донорів є першочерговими, що дозволять в умовах дефіциту бюджетних ресурсів досягти соціального, економічного, екологічного ефекту від реалізації інвестиційно-стратегічних програм розвитку регіону.

Подальший напрям дослідження автори вбачають у проведенні аналізу кількісного виміру структурних змін капітальних видатків місцевих бюджетів України на фінансове забезпечення інвестиційної та інноваційної діяльності задля оцінки ресурсної складової інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів.

Список літератури

1. **Пасічник Ю. В.** Теоретико-методологічне обґрунтування розвитку місцевих бюджетів в умовах децентралізації. *Проблеми економіки*. 2018. № 4 (38). С.264-270. URL: https://www.problecon.com/export_pdf/problems-of-economy-2018-4_0-pages-264_270.pdf (дата звернення: 20.03.2024).
2. **Семенець А.О., Тюріна Д.М., Кузькін Є.Ю., Ярмак О.В.** Статистичне дослідження формування доходів місцевих бюджетів в умовах децентралізації. *Фінансово-кредитна діяльність: проблеми теорії і практики*. 2021. № 1 (36). С. 310-319.
3. Міжнародний центр перспективних досліджень. Бюджетна децентралізація в Україні в контексті реформи місцевого самоврядування. URL: https://icps.com.ua/assets/uploads/images/images/eu/fiscal_decentralization_ukr.pdf (дата звернення: 20.03.2024).
4. **Возняк Г.В.** Переваги та ризики бюджетної децентралізації: теоретико-методологічні аспекти. *Проблеми економіки*. 2015. № 2. С. 253-257. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Pekon_2015_2_37 (дата звернення: 20.03.2024).
5. **Наконечна Г., Матвійчук Н.** Бюджетна децентралізація в Україні: сутність та основні переваги реалізації реформи. *Історико-правовий часопис*. 2019. № 1. С. 39-44. URL: <https://evnuir.vnu.edu.ua/bitstream/123456789/16435/1/10.pdf> (дата звернення: 20.03.2024).
6. **Власюк О. С.** Шляхом децентралізації: виклики, ризики та пріоритети реформування регіонального розвитку в Україні. *Регіональна економіка*. 2015. № 1. С. 5-18.
7. **Зілінська А.С.** Бюджетна децентралізація Євросоюзу та перспективи для України. *Інфраструктура ринку*. 2019. Вип. 36. С. 547-553. URL: http://www.market-infr.od.ua/journals/2019/36_2019_ukr/87.pdf (дата звернення: 20.03.2024).
8. **Булавинець В. М.** Бюджетна децентралізація: сутність та специфіка реалізації в Україні. *Ефективна економіка*. 2021. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=9747> (дата звернення: 20.03.2024).

9. Бюджетний кодекс України: прийнятий Верховною Радою України 08.07.2010 р. № 2456-VI (із змін. і доп.). Офіційний сайт Верховної Ради України. URL: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/2456-17> (дата звернення: 21.03.2024).
10. Кучерук Г.Ю., Вовк О.М. Економічне обґрунтування комплексної оцінки інвестиційного потенціалу авіа-підприємства. *Економіка. Фінанси. Право*. 2008. №3. С.11-15.
11. Бережна І.Ю. Теоретико-економічні підходи до обґрунтування змісту інвестиційного потенціалу. *Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво*. 2010. №6. С. 253-258.
12. Іванов С.В. Методологічні підходи до визначення сутності інвестиційного потенціалу. *Економіка: проблеми теорії та практики*. 2004. Вип. 95. С. 98-104.
13. Дресвянніков Д. О. Формування інвестиційного потенціалу підприємства. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Економічні науки*. 2016. Вип. 31(2). С. 20-27.
14. Бутко М., Зеленський С., Акименко О. Сучасна проблема оцінки інвестиційної привабливості регіону. *Економіка України*. 2005. № 11. С. 30-37.
15. Нечитайло У. П. Аналіз сучасних підходів до визначення інвестиційного потенціалу регіону. *Інвестиції: практика та досвід*. 2010. № 15. С. 25-29.
16. Жук П. В., Сірик З. О. Інвестиційний потенціал територіальних громад: суть поняття та питання управління *Регіональна економіка*. 2017. №2. С. 16-22. URL: https://re.gov.ua/re201702/re201702_016_ZhukPV,SirykZO.pdf (дата звернення: 21.03.2024).
17. Сірик З. О. Ендогенні чинники активізації використання інвестиційно-інноваційного потенціалу територіальних громад. *Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України*. 2018. Вип. 4. С. 125-133. URL: [https://ird.gov.ua/sep/sep20184\(132\)/sep20184\(132\)_125_SirykZ.pdf](https://ird.gov.ua/sep/sep20184(132)/sep20184(132)_125_SirykZ.pdf) (дата звернення: 21.03.2024).
18. Косова Т. Д., Слободянюк Н. О. Інвестиційно-соціальний потенціал місцевих бюджетів в умовах децентралізації фінансової системи України. *Торгівля і ринок України*. 2016. Вип. 39-40. С. 133-140.
19. Вахович І. М., Недопад Г. В. Бюджетна ефективність території: механізми підвищення в умовах децентралізаційних впливів: монографія. Луцьк: ВІП ЛНТУ, 2021. 344 с.
20. Міністерство економіки України. Стан здійснення ДПП в Україні. URL: <https://me.gov.ua/Documents/Detail?lang=uk-UA&id=9fc90c5e-2f7b-44b2-8bf1-1ffb7ee1be26&title=StanZdiisnenniaDppVUkraini> (дата звернення: 22.03.2024).
21. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо вдосконалення механізму залучення приватних інвестицій з використанням механізму державно-приватного партнерства для пришвидшення відновлення зруйнованих війною об'єктів та будівництва нових об'єктів, пов'язаних з післявоєнною перебудовою економіки України: проект Закону/ Верховна Рада України. URL: <https://itd.rada.gov.ua/billInfo/Bills/Card/39902> (дата звернення: 22.03.2024).
22. Швадчак А. Реформа ДПП для повоєнної відбудови: перспектива чи ризик? URL: <https://ti-ukraine.org/news/reforma-dpp-dlya-povoyennoyi-vidbudovy-perspektyva-chy-ryzyk/> (дата звернення: 22.03.2024).
23. Міжнародна підтримка. *Децентралізація*: веб-сайт. URL: <https://decentralization.ua/donors> (дата звернення: 22.03.2024).

Рукопис подано до редакції 22.03.24

УДК 622.7:004.8

В.Г. ЛЯШОК, аспірант, М.П. ТИХАНСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ЗАСОБИ У ПРОЦЕСАХ ПОДРІБНЕННЯ ЯК ПОТУЖНИЙ ІНСТРУМЕНТ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Мета дослідження Мета даного дослідження полягає в досягненні вдосконалення процесу подрібнення корисних копалин в контексті виробничих потреб ПАТ "Північний ГЗК" за допомогою інтелектуальних методів, зокрема нейронних мереж. Застосування інтелектуальних засобів, таких як нейронні мережі, має на меті підвищення якості, точності та ефективності процесу подрібнення. Очікується, що результатом дослідження буде розробка та впровадження нових алгоритмів та методів, які забезпечать оптимальне використання ресурсів, зниження витрат та підвищення загальної продуктивності процесу подрібнення в гірничій промисловості.

Методи дослідження. Для виконання було використано: вивчення наукових досліджень та літератури в галузі застосування інтелектуальних методів у процесах подрібнення матеріалів, аналіз технологічних схем та процесів подрібнення на ПАТ "Північний ГЗК", розробка та моделювання систем для оптимізації параметрів подрібнення.

Наукова новизна. Дослідження впроваджує новітні методи інтелектуального аналізу даних, зокрема застосування штучних нейронних мереж, для оптимізації процесу подрібнення корисних копалин. Використання нейронних мереж у гірничій промисловості є новим та стрімким напрямком досліджень і відкриває широкі можливості для підвищення ефективності та точності процесів обробки руди в гірничо-збагачувальному секторі.

Практична значимість. Впровадження розроблених методів та моделей у практику подрібнення корисних копалин на ПАТ "Північний ГЗК" може призвести до підвищення якості та ефективності процесу, зменшення часу

простою та оптимізації витрат енергії. Це може мати значний позитивний вплив на економічну ефективність підприємства та загальний рівень виробництва корисних копалин.

Результати. Ця робота продемонструвала, як динамічне моделювання може використовуватися для оцінки ефектів від модифікації процесу і прогнозування фактичної продуктивності. Незважаючи на складність динамічного моделювання, воно має вищий потенціал у прогнозуванні фактичної продуктивності. Розроблені системи, використані у цій роботі, стануть корисними інструментами для подальших досліджень у галузі автоматизації для покращення показників.

Ключові слова: збагачення, нейронні мережі, інтелектуальні засоби, регулятор, автоматизація, подрібнення, моделювання, ГЗК.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-23-29

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Подрібнення - один з найдорожчих етапів збагачення корисних копалин, який зазвичай виконується за допомогою різноманітних млинів, включаючи стрижневі млини, кульові млини, напівавтогенні (SAG) та автогенні (AG) млини. Ці млини призначені для роботи з коефіцієнтом готовності млина до 95%. Одним з елементів досягнення цього показника є максимальне скорочення незапланованих простоїв через поломку футеровки млина/болтів, а також максимальне збільшення проміжку часу між замінами футеровки (плановими технічними обслуговуваннями і простоями). Проблема автоматизації технологічного процесу подрібнення була розглянута на прикладі ПАТ «Північний ГЗК», схема апаратів якого наведена нижче на рисунку 1.

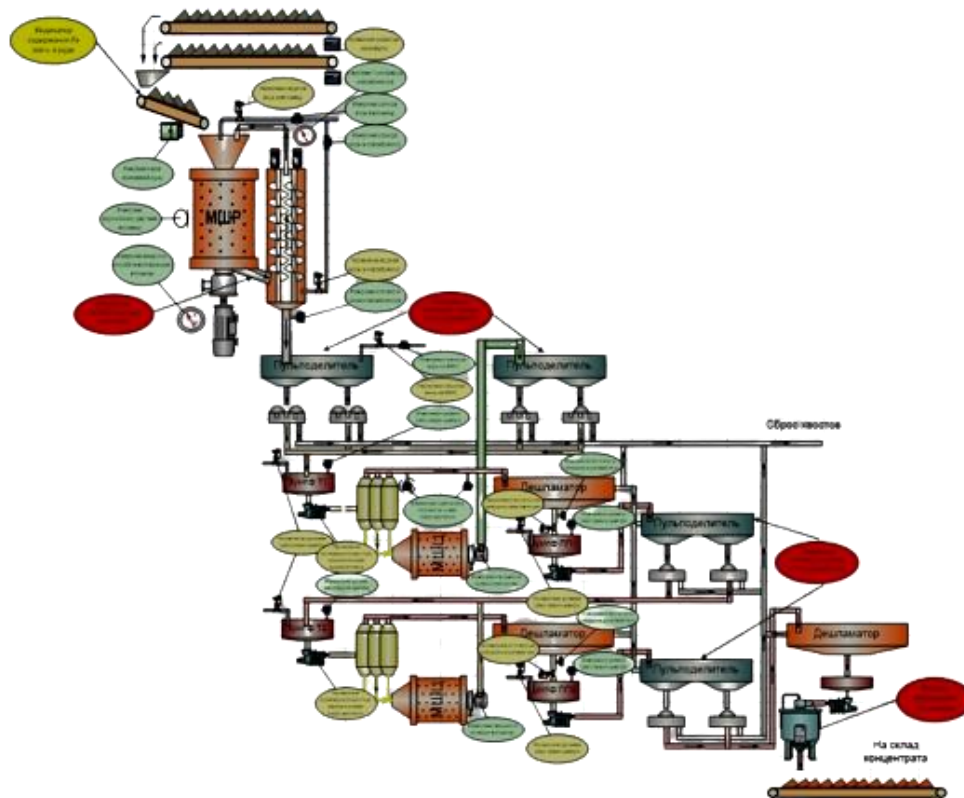


Рис.1. Схема апаратів і ланцюгів процесу збагачення на ПАТ «Північний ГЗК»

У наш час автоматизація процесів стає величезним фактором для ефективного виробництва у сфері промислового видобутку, зокрема, при видобутку рудних корисних копалин. Автоматизація гірничодобувних процесів може призвести до значного підвищення продуктивності, зменшення відходів та підвищення ефективності. Однак існуючі системи не є ідеальним рішенням, а їх альтернативи можуть мати значні обмеження і труднощі, незважаючи на їх чисельну перевагу.

Існуюча АСУТП на комбінаті реалізована на базі засобів обчислювальної техніки, а також інтерфейсних ліній зв'язку для передачі даних, що забезпечують розподілену обробку інформації. Структурна схема наведена на рис. 2.

Аналіз досліджень і публікацій. Вивчення наукових досліджень і літератури в галузі використання інтелектуальних інструментів у процесах подрібнення підкреслює значний прогрес і багатообіцяючий потенціал цих технологій в автоматизації та вдосконаленні виробничих процедур.

Дослідники активно вивчають застосування штучного інтелекту, машинного навчання та інших інтелектуальних методологій таких як моделювання у подрібненні різноманітних матеріалів.

Дослідження показують, що інтеграція нейронних мереж у практику дроблення обіцяє підвищити як точність, так і ефективність процесу. Зокрема, деякі результати досліджень свідчать про те, що використання глибоких нейронних мереж у подрібненні матеріалів може призвести до більш точних і адаптивних результатів порівняно з традиційними методами.

Крім того, в кількох публікаціях підкреслюється важливість застосування методів машинного навчання для оптимізації параметрів шліфування з урахуванням цілого ряду факторів, таких як склад матеріалу, режими роботи і бажані кінцеві результати.

Постановка задачі. Ця стаття спрямована на розгляд та аналіз основних задач, пов'язаних з використанням інтелектуальних засобів у процесах подрібнення на ПАТ «Північний ГЗК». Основні завдання, які будуть розглянуті: покращення якості та точності: Вивчення можливостей застосування нейронних мереж та інших інтелектуальних методів для забезпечення вищої якості та точності процесу подрібнення.

Викладення матеріалу та результати. З розвитком технологій онлайн-вимірювання у сфері збагачення корисних копалин зростають можливості моніторингу різних технологічних змінних у режимі реального часу. Крім того, зростає тенденція до розробки гнучких сенсорних моделей для критично важливих змінних установки, які раніше були недоступні. Ці досягнення значно підвищують можливість застосування передових методів управління у збагаченні корисних копалин. Однак для успішного впровадження таких методів необхідне всебічне розуміння динамічної поведінки технологічної схеми і складних взаємодій між змінними процесу, що регулюються ззовні, і внутрішніми (а також змінними, пов'язаними з продуктивністю). Динамічне моделювання в реальному часі є цінним інструментом для отримання такого розуміння з мінімальними витратами.

Для моделювання технологічних схем у гірничо-збагачувальному секторі доступні численні інструменти та методології моделювання. Ці інструменти широко використовуються і довели свою ефективність для вирішення таких завдань, як проектування заводу, визначення розмірів обладнання для планування виробничих потужностей, оптимізація схем, діагностика проблем і оцінка витрат. Однак більшість цих пакетів моделювання покладаються на стаціонарний аналіз, прикладом чого є METSIM, USIM PAC, Limn та JKSImMet. Крім того, вони часто використовують емпіричні моделі, іноді надто спрощені або "чорні ящики", які не можуть бути узагальненими для різних операцій підрозділу.

На рис. 3 зображено схему повного циклу процесу збагачення на ПАТ «Північний ГЗК», яка побудована у пакеті USIM PAC.

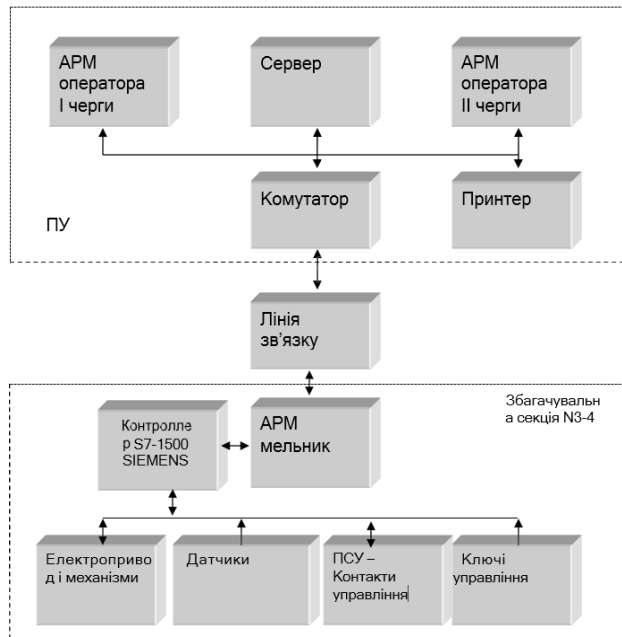


Рис.2. Структурна схема існуючої АСУТП «Північний ГЗК»

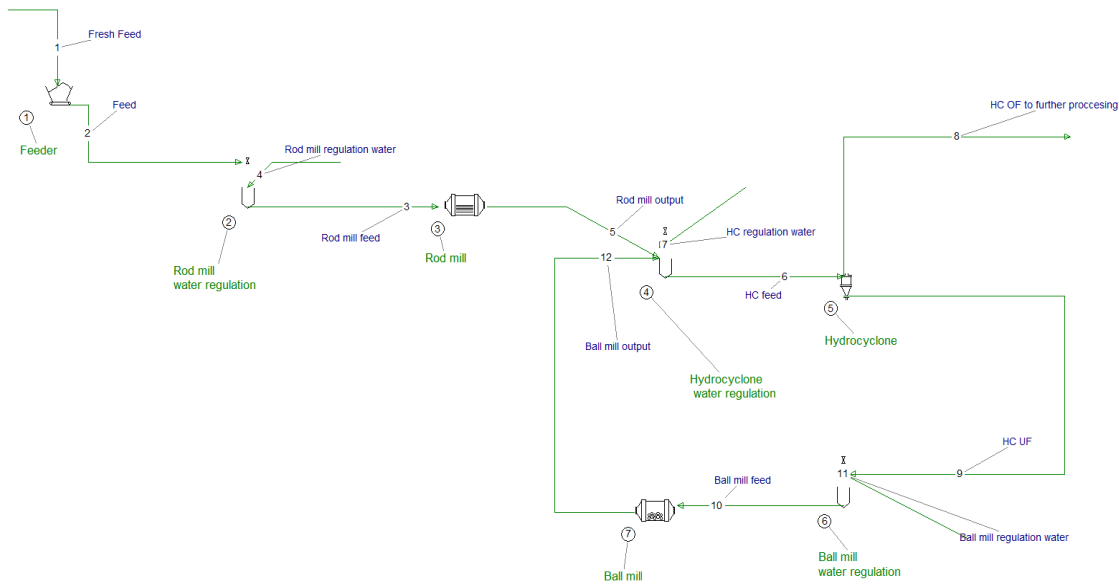


Рис.3. Технологічна схема повного циклу збагачення на ПАТ «Північний ГЗК»

Усі параметри моделі наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри моделей

Одиниця	Моделі та основні параметри	Значення
#1 – Feeder	Міксер (0)	
#2 – Rod mill regulator	Регулятор щільності (0)	
	Відсоток твердих речовин на виході регулятора (%)	70
#3 – Rod mill	Млин (0A)	
	d80 при розвантаженні млина	600 μm
#4 – Hydrocyclone regulator	Регулятор щільності (0)	
	Відсоток твердих речовин на виході регулятора (%)	
#5 – Hydrocyclone	Гідроциклон (0B)	
	Коротке замикання (%)	25
	d80 вихідного тонкого потоку	60 мкм
	Виправлена недосконалість кривої розділу	0,4
#6 – Ball mill regulator	Регулятор щільності (0)	
	Відсоток твердої речовини на виході регулятора (%)	55
#7 – Ball mill	Млин (0A)	
	Нахил гранулометричного складу продукту	100 μm
	Розраховано	

Алгоритм моделювання USIM PAC є ітеративним. На кожній ітерації він розраховує вихідні потоки від кожної одиниці обладнання, використовуючи модель роботи установки як функцію потоків живлення. Після розрахунку потоків на кожній ітерації всі розраховані витрати порівнюються зі значеннями з попередньої ітерації.

Для досягнення збіжності алгоритму зазвичай встановлюється критерій збіжності, який може бути заснований на різницях між значеннями на поточній і попередній ітераціях. Конвергенція досягається, коли цей критерій збіжності виконується. Зазвичай критерій збіжності може бути виражений як сума всіх різниць найменших квадратів між витратами на поточній і попередній ітераціях, яка стає меншою за певне значення, встановлене як критерій зупинки ітеративного процесу.

Після розрахунку діаметрів млинів і гідроциклонів виконується пряме моделювання для оновлення матеріального балансу і збереження результатів. В наших моделях передбачено розрахунок не лише витрат і розподілу частинок за розміром для кожного потоку, але й споживаної потужності млинів і падіння тиску в гідроциклоні. Порівняльну характеристику наведено на рисунку 4.

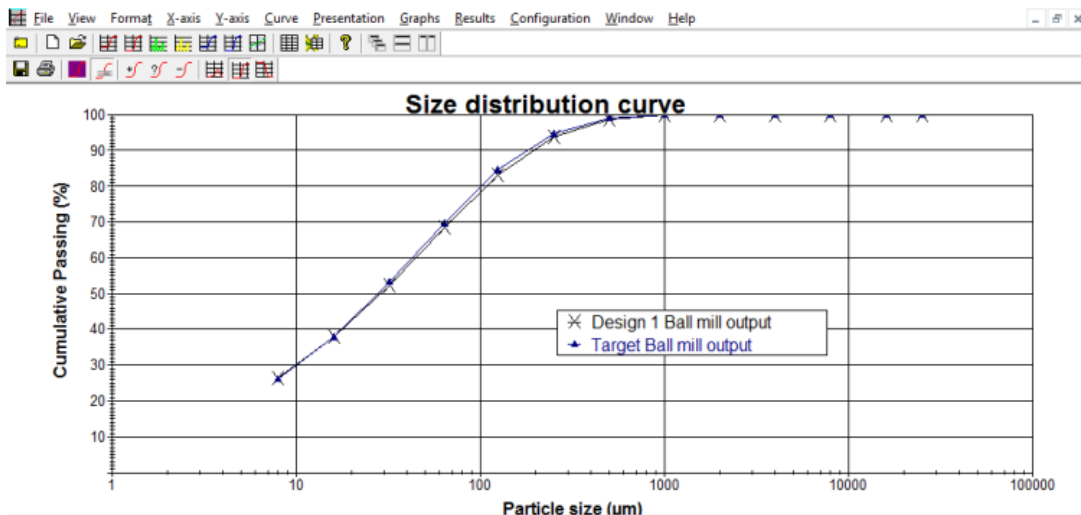


Рис.4.Порівняння об'єктивного та змодельованого виробництва кульового млина

Циркуляційне навантаження трохи перевищує навантаження цільового файлу. Невелике ручне збільшення стрижневої фрези діаметр від 1,87 до 2 м дає ближчі результати.

Так як зі зростом популярності нейронних мереж та штучного інтелекту зросли можливості прогнозування та швидкодії було прийнято рішення покращити існуючу систему автоматизації на базі нейрорегулятора. Для цього було використано пакет для модуляції Matlab і бібліотеку для нього Grinding Tool. Ця бібліотека містить апарати, які утворюють ланцюги збагачення.

Штучні нейронні мережі виявили свою корисність у різних областях для інтелектуального аналізу даних. Зазвичай вони використовуються для апроксимації функцій, класифікації та розпізнавання шаблонів.

Структура штучної нейронної мережі полягає у взаємозв'язку вузлів через синаптичні та активаційні зв'язки. Вага, присвоєна кожному зв'язку, визначає вплив вхідних даних на виходи. Кожен нейрон має три ключові елементи: зв'язки (ваги), суматор (який обчислює суму вхідних сигналів) і функцію активації, яка визначає вихідний сигнал.

Штучні нейронні мережі можна класифікувати за розташуванням нейронів і схемою зв'язку шарів: з прямим зв'язком, зі зворотнім зв'язком та самоорганізовані мережі. У мережах з прямим зв'язком інформація подається на вхід і передається через мережу без повернення інформації між шарами. Навчання в основному здійснюється за допомогою алгоритмів навчання на основі зворотного поширення.

Системи управління, які використовують нейронні мережі, можуть бути альтернативою тим, які побудовані на основі класичних методів управління. Це можливо завдяки тому, що нейронна мережа, яка має два шари і може мати будь-яку кількість вузлів у прихованому шарі, здатна апроксимувати будь-яку функцію дійсних чисел з потрібною точністю. Для впровадження функції прогнозування в систему моніторингу необхідно побудувати модель нейромережі.

Кожен вхід мережі відповідає одному з факторів. Виходи мережі відповідають продуктивності, точності та енергоспоживанню. Ваги мережі визначають значущість факторів.

На додаток до ідентифікації факторів, мережа може визначати прогнозований стан системи на основі наявних даних і оптимізувати роботу за заданим параметром. В якості параметрів оптимізації можна взяти T, W і Q, або введений узагальнюючий показник, який відображає всі три критерії, в залежності від їх значущості.

Для забезпечення системи моніторингу функцією прогнозування необхідно побудувати нейромережеву модель вигляду

$$y(k+d) = N \left[\begin{matrix} y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1), u(k), \\ u(k-1), \dots, u(k-n+1) \end{matrix} \right], \quad (1)$$

де $y(k)$ – вхід моделі; d – кількість циклів прогнозування; $u(k)$ – вихід моделі.

Необхідно спроектувати нелінійний регулятор наступного загального вигляду:

$$u(k) = G \left[\begin{matrix} y(k), y(k-1), \dots, y(k-n+1) \\ y_r(k+d), u(k-1), \dots, u(k-m+1) \end{matrix} \right]. \quad (2)$$

На рис. 5 показано вже зібрану схему моделювання.

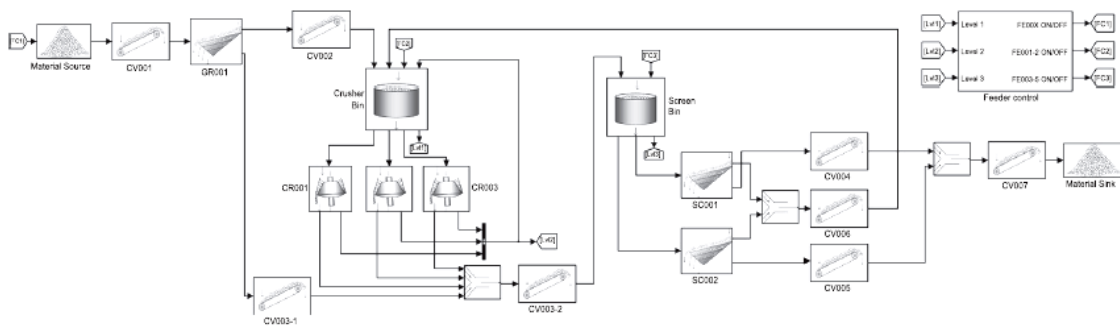


Рис.5.Схема процесу на базі нейрорегулятора побудована в Matlab

Результат роботи системи з навченим контролером показано на рис. 6, де крива 1 показує вхідний сигнал; а крива 2 - вихідний сигнал.

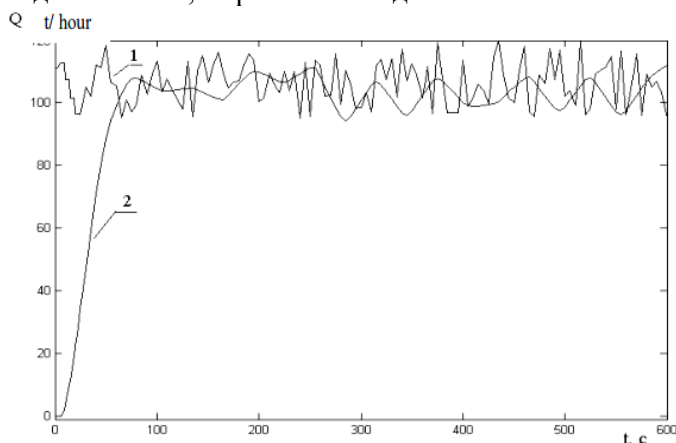


Рис.6. Результати навчання нейромоделі

Висновки та напрямок подальших досліджень: На прикладі «Північного ГЗК» було продемонстровано використання різних інтелектуальних засобів для автоматизації процесу подрібнення. Дані варіанти дали змогу покращити якість різних параметрів цього технологічного процесу. У рамках дослідження було акцентовано увагу на моделюванні динамічних ефектів у виробництві через механічні модифікації процесу. Далі аналіз повинен зосередитися на контурах керування, де налаштовуються регулятори, і випробовуються різні

алгоритми наглядного контролю та враховується більше збурень.

Ця робота продемонструвала, як динамічне моделювання може використовуватися для оцінки ефектів від модифікації процесу і прогнозування фактичної продуктивності. Незважаючи на складність динамічного моделювання, воно має вищий потенціал у прогнозуванні фактичної продуктивності. Розроблені системи, використані у цій роботі, стануть корисними інструментами для подальших досліджень у галузі автоматизації для покращення показників.

Список літератури

1. **Купін О.І.** Інтелектуальна ідентифікація та керування в умовах процесів збагачувальної технології: Монографія / А.І. Купін. Кривий Ріг: КТУ, 2008. 204 с.
2. Автоматизовані системи керування процесами термічної обробки котунів на конвеєрній випалювальній машині: монографія / **В.Й. Лобов, Л.І. Єфіменко, М.П. Тиханський, С.А. Рубан.** Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2015. 250 с.
3. **Купін, А.** Інтелектуальна ідентифікація та управління в умовах технологічного процесу збагачення, Кривий Ріг: КТУ, 2008.
4. **Купін, А.** Нейронна ідентифікація технологічного процесу збагачення залізної руди, Матеріали 4-го семінару IEEE з інтелектуального збору даних та передових технологій і застосувань обчислювальних систем, 2007. 225-227 с.
5. **Назаренко, В., Купін, А.** Інтелектуальне керування процесом збагачення магнетитових кварцитів, матеріали XXIII Міжнародної конференції з автоматичного керування. Вінниця, 2006. 406-409 с.
6. **Купін, А.** Обґрунтування використання технологій штучного інтелекту для управління процесом збагачення магнетитових кварцитів, Кривий Ріг: Вісник КТУ, Вип.1, 2003. 51-55 с.
7. **Купін, А.** Прогнозування якісних показників збагачення залізної руди за допомогою емулятора нейронної мережі, Матеріали II Міжнародної конференції "Стратегія в промисловості та освіті", Том 1, Болгарія, ТУ Варна: 2006. 99-102 с.
8. **Азарян А., Кириченко Ю., Кучер В.** Автоматизація першої стадії подрібнення, класифікації та магнітної сепарації - реальний шлях підвищення ефективності збагачення залізної руди, Кривий Ріг: Вісник КНУ: зб. наук. праць, Вип.36, 2014. 276-280 с.

Рукопис подано до редакції 11.03.24

Ю. А. МОНАСТИРСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., І. С. МАКСИМЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ЗМІНИ ВИТРАТ ПАЛИВА АВТОСАМОСКИДАМИ ДИЗЕЛЬ-ТРОЛЕЙВОЗАМИ НА ЗАЛІЗОРУДНИХ КАР'ЄРАХ

Мета. Підвищення ефективності роботи кар'єрного автомобільного транспорту за рахунок зменшення витрат палива шляхом встановлення дизель-тролейвозного обладнання на кар'єрні автосамоскиди.

Методи дослідження. Положення теорії автомобілів та транспортних процесів і систем, методи теорії планування експериментів, аналіз літературних джерел, наукове узагальнення раніше виконаних досліджень.

Наукова новизна. На підставі дослідження процесу транспортування вантажів кар'єрними автосамоскидами та дизель-тролейвозами встановлені закономірності зміни витрат палива кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю 90, 130 та 220 тонн від довжини траси, закономірності зміни питомих витрат палива дизель-тролейвозами від довжини траси при різних частинах тролейної ділянки та закономірності зміни питомих витрат палива від питомої частини тролейної ділянки при різних довжинах трас руху.

Практична значимість. Результати досліджень будуть використані при оцінці доцільності використання та прогнозування роботи дизель-тролейвозів на базі кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю від 90 до 220 т.

Результати. Встановлені закономірності зміни лінійних витрат палива від довжини їздки з вантажем кар'єрними автосамоскидами з електромеханічною трансмісією. Середні розрахункові лінійні витрати палива для автосамоскидів вантажопідйомністю 90 т складають 10-12 л/км, 130 т – 16-18 л/км, 220 т – 24-26 л/км. Менші значення відповідають трасам більшої довжини за рахунок меншої питомої частини витрат палива під час непродуктивних операцій транспортного циклу. Встановлена параболічна залежність питомих витрат палива дизель-тролейвозу від довжини траси руху та лінійна залежність питомих витрат палива дизель-тролейвозу від тролейної частини ділянки маршруту. Встановлено, що абсолютна довжина траси руху впливає не дуже суттєво на питомі витрати палива, більш суттєвий вплив має частина тролейної ділянки в загальній довжині траси. При збільшенні тролейної частини траси з 30 до 70 % на найдовшій трасі величина відносних витрат палива зменшується з 0,76 до 0,41. Для зменшення витрат палива при впровадженні дизель-тролейвозів необхідно мати траси максимальної довжини з максимальною довжиною тролейної ділянки, це може призвести до зменшення загальних витрат палива у 2,5 рази.

Ключові слова: кар'єр, транспорт, автосамоскид, дизель-тролейвоз, витрати палива, дорожні умови експлуатації.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-29-33

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Питання зменшення витрат палива кар'єрного транспорту завжди є пріоритетним, особливо в умовах обмеження енергетичних ресурсів [1-3] та розвитку світової промисловості у напрямку зменшення витрат викопного палива. Застосування пріоритетних напрямів у розвитку кар'єрного автомобільного транспорту може вирішити поставлене питання [4, 5]. Одним з таких напрямів є електрифікація автотранспорту та впровадження дизель-тролейвозів, які дозволяють значно економити паливо та зменшувати викиди відпрацьованих газів [6].

Аналіз досліджень і публікацій. Використанням в глибоких кар'єрах дизель-тролейвозів займаються практично всі провідні світові виробники кар'єрних автосамоскидів [7-14].

Катерпіллар (Caterpillar) перейшов від випробувань чотирьох дизель-тролейвозів на базі автосамоскидів CAT-795 F AC вантажопідйомністю 337 т на 700-метровій трасі до роботи десяти аналогічних машин на 3 км тролейній лінії на мідному руднику Айтік (Aitik) шведської компанії Буліден (Boliden). Було встановлено, що CAT-795F AC може рухатися по 10-відсотковому фізичному ухилу та дорожнім умовам із твердим покриттям зі швидкістю 28 км/год, що практично в 2 рази вище проти режиму, з рухом лише на дизельному двигуні, при цьому економія палива складає до 40 літрів на один кілометри шляху [8, 9]. Буліден (Boliden) заявляє, що скоротить споживання дизельного палива автосамоскидами CAT-795 F AC у тролейвозному виконанні на 5500 куб. м/рік на тролейній лінії довжиною 1,7 км на кар'єрі Кевіца (Kevitsa) [9]. Сім дизель-тролейвозів Комацу (Komatsu) замовила Купер Монтайн Майнінг (Copper Mountain Mining) у Канаді для використання на одно кілометровій тролейній трасі. Планується скорочення викидів вуглекислого газу, а відповідно і витрат палива в кар'єрі на 30% в термін до 2035 року. Компанія Перші Квантові Мінерали (First Quantum Minerals) впроваджує додатково 11 дизель-тролейвозів на базі автосамоскидів Лібхер (Liebherr) T-284 вантажопідйомністю 363 т, з них три вантажівки на кар'єрі Вартовий (Sentinel) і вісім на кар'єрі Кобре Панама (Cobre Panama) у Панамі. Незабаром парк із 38 Лібхер (Liebherr) T-284 у Панамі буде найбільшим у світі парком вантажівок ультракласу у тролейвозному виконанні [10]. Лібхер (Liebherr) T-236 вантажопідйомністю 100 т впрова-

джується у тролейвозній модифікації на головній під'їзній дорозі рудника Ерзберг (Erzberg) у Австрії [11]. Компанія РНЦ Мінералс (RNC Minerals) заявила, що вивчає можливість використання дизель-тролейвозів на своєму нікель-кобальтовому проєкті Дюмонт (Dumont) у Квебеку, Канада. На головних гірничих виставках світу Баума (Bauma) останнім часом з'являється все більше експонатів дизель-тролейвозної тематики [12-14].

В Україні залізорудна компанія Ferrexpo планує електрифікувати 14 кілометрів кар'єрних автошляхів шляхів в кар'єрах Полтавського ГЗК, Єривського ГЗК та Біланівського ГЗК. При цьому планується протягом 10 років отримати економію операційних витрат у понад \$400 млн і зменшити обсяги викидів вуглецю на 526 тис. т за рахунок зменшення витрат дизельного пального [6].

Отже, впровадження дизель-тролейвозів на основі кар'єрних автосамоскидів з електромеханічною трансмісією вантажопідйомністю від 100 т є сучасним ефективним рішенням підвищення ефективності роботи кар'єрного автомобільного транспорту за рахунок зниження витрат палива та збільшення продуктивності його роботи, це буде доцільним і на залізорудних кар'єрах України. Але питання визначення показників роботи особливо витрат палива ще потребують досліджень відповідно умов експлуатації машин.

Постановка задачі. Розглянути у відносних величинах, для машин різної вантажопідйомності, зміни витрат дизельного палива при різних дорожніх умовах експлуатації, які характеризуються довжиною траси руху та питомому відношенню довжини тролейної частини (ступені тролейзації) у загальній довжині траси.

В якості базових значень прийняті показники роботи кар'єрних автосамоскидів, які можуть бути використані в даних умовах експлуатації, вантажопідйомністю 90, 130 та 220 т не обладнаних тролейною системою. Автосамоскиди даних вантажопідйомностей є найбільш розповсюдженими машинами при перевезенні залізних руд та вскришних порід на українських кар'єрах у Кривому Розі та Горішніх Плавнях.

Викладення матеріалу та результати. Дослідження виконувалися на основі положень теорії автомобілів та транспортних процесів і систем, методів теорії планування експериментів, методик визначення параметрів роботи кар'єрного автомобільного транспорту та визначення витрат палива кар'єрними автосамоскидами з електро-механічною трансмісією [15]. Аналіз автомобільних трас руху в залізорудних кар'єрах України показав, що довжина їздки з вантажем коливається від 1,0 до 5,0 км при ухилах від 6 до 12 %, середня швидкість руху по трасам складає близько 20 км/год, при цьому з вантажем від 8 до 12 км/год, без вантажу швидкість близька до обмеженої нормативами експлуатації для українських кар'єрах величини у 30 км/год.

Вихідними даними для досліджень прийняті: довжина траси руху в навантаженому стані l від 1 до 5 км, частина траси руху з тролейною ділянкою Tr від 30 до 70 % від довжини руху з вантажем, ділянки без тролей розташовані у вибоях чи на перевантажувальних майданчиках в основному мають ухил близький до горизонтального, тому швидкості руху автосамоскидів на цих ділянках прийнята середньою при русі з вантажем - 10 км/год.

При розрахунку витрат дизельного палива (табл.1) були прийняті наступні вихідні дані: кар'єрний автосамоскид вантажопідйомністю 90 т двигун – Cummins KTA-38C, потужність 783 кВт; кар'єрний автосамоскид вантажопідйомністю 130 т двигун – Cummins KTTA-50C, потужність 1194 кВт; кар'єрний автосамоскид вантажопідйомністю 220 т двигун – Cummins QSK-60 C, потужність 1715 кВт; питомі витрати палива двигунами при номінальній потужності від 202 до 209 г/(кВт·год.), витрати палива кар'єрним автосамоскидом при русі з вантажем відповідають витратам палива двигуна при роботі при номінальному навантаженні; при маневруванні та русі без вантажу як кар'єрним автосамоскидом так і дизель-тролейвозом витрати палива складають за усередненими даними [7-14] 40 % від номінальних витрат, під час очікування завантаження, завантаження та очікування розвантаження витрати палива машин дорівнюють витратам палива при роботі двигуна на холостому ходу, під час руху в тролейному режимі витрати палива дизель-тролейвозом дорівнюють витратам палива при роботі двигуна на 7 % від номінальних витрат.

Таблиця 1

Сумарні витрати палива, (літрів) на трасах різної довжини самоскидами різної вантажопідйомності

Довжина траси, км	1	2	3	4	5
Вантажопідйомність 90т	22,33	42,94	63,54	84,14	104,75
Вантажопідйомність 130 т	35,06	67,42	99,77	132,12	164,47
Вантажопідйомність 220 т	50,61	97,30	143,99	190,68	237,38

Практично не змінні витрати палива від довжини їздки з вантажем (рис.1) доводять, що при маневруванні витрачається не велика кількість палива і маневрування не є визначальним при встановленні витрат палива, на відміну від суттєвого впливу маневрових операцій на продуктивність та загальний час їздки з вантажем. Середні розрахункові лінійні витрати палива для самоскидів вантажопідйомністю 90 т складають 10-12 л/км, 130 т – 16-18 л/км, 220 т – 24-26 л/км, при чому менші значення відповідають трасам більшої довжини за рахунок меншої питомої частини витрат палива під час непродуктивних операцій транспортного циклу. За даними криворізьких гірничо-збагачувальних комбінатів витрати палива кар'єрними автосамоскидами з електромеханічною трансмісією БЕЛАЗ-75131 вантажопідйомністю 130 т знаходяться на рівні 15 - 20 л/км, а БЕЛАЗ-75306 вантажопідйомністю 220 т – на рівні 25 – 30 л/км. Таким чином розрахункові значення витрат палива відповідають фактичним значенням що підтверджує достовірність розрахунків.

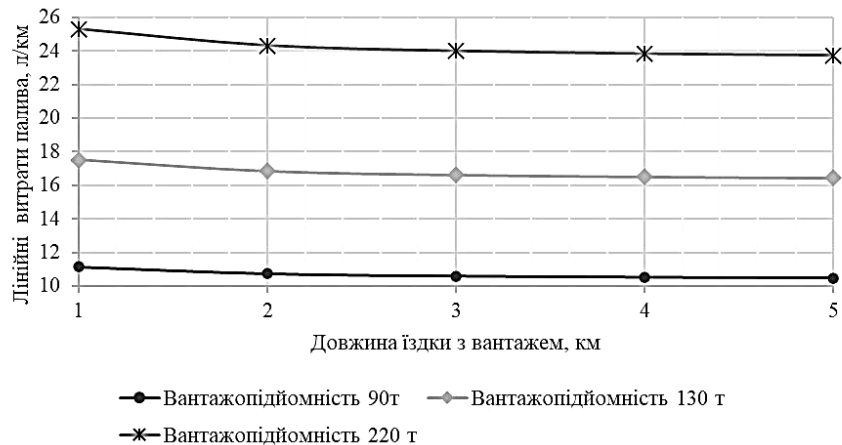


Рис. 1. Закономірності зміни лінійних витрат палива від довжини їздки з вантажем

Для визначення ефективності впровадження дизель-тролейвозів необхідним є знання про витрати палива, тому що складова витрат палива у загальних витратах на транспортування гірничої маси може сягати 50-60 %. При цьому різноманіття виробників кар'єрних автосамоскидів та різних двигунів внутрішнього згорання на однакових машинах обумовлює доцільність встановлення не абсолютних значень для певного автосамоскиду, а саме питомих, які дозволяють їх адаптувати для різних машин. На основі теоретичних досліджень встановлені закономірності зміни питомих витрат палива, тобто відношення витрат палива кар'єрного автосамоскиду троллейвоза до витрат палива звичайного кар'єрного автосамоскиду які працюють на однакових трасах від довжини трас руху при різних частинах тролейної ділянки (рис.2) та від частини тролейної ділянки при різних довжинах трас руху (рис. 3).

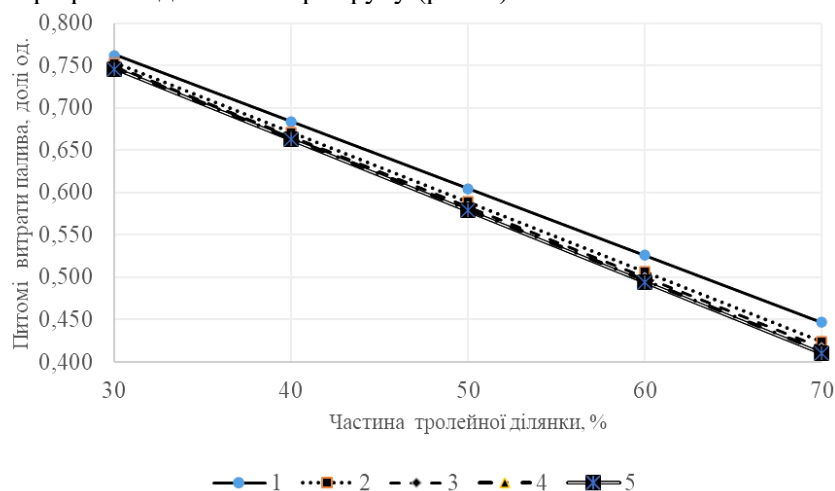


Рис. 2. Закономірності зміни питомих витрат палива від частини тролейної ділянки при різних довжинах трас руху

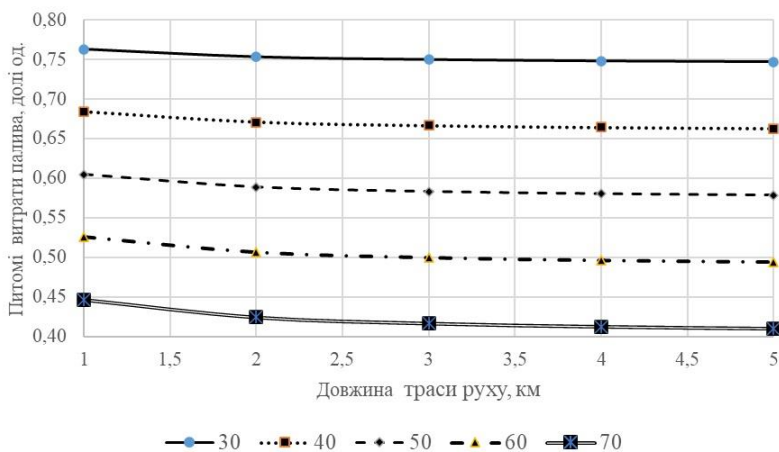


Рис 3. Закономірності зміни питомих витрат палива від довжини трас руху при різних частинах, у відсотках, тролейної ділянки

Встановлено, що довжина траси руху, як і у випадку з продуктивністю, впливає не дуже суттєво на питомі витрати палива, суттєвий вплив має питома частина тролейної ділянки в загальній довжині траси. Максимальне відносне зменшення витрат палива спостерігається на найдовшій трасі з найбільшою тролейною ділянкою, практично в 2,5 рази (питомі витрати на рівні 0,4). Такий висновок доводить що для зменшення абсолютної величини витрат палива необхідно мати траси максимальної довжини з максимальною довжиною тролейної ділянки. Зменшення витрат палива обумовить, за нормативами заводів виробників двигунів внутрішнього згорання, збільшення інтервалу проведення технічного обслуговування та зменшення витрат пов'язаних з ним.

Для встановлених закономірностей отримана, за допомогою методики раціонального планування експериментів, двохфакторна аналітична залежність питомих витрат палива від довжини траси та питомої частини тролейної ділянки, долі одиниць

$$PP = -0.0008p + 0.0022l^2 - 0.0194l + 1.021,$$

де p - питома частина тролейної ділянки, процент від загальної довжини траси руху, % (межі від 30 до 70 %), l - загальна довжина траси руху, км (межі від 1 до 5 км).

Встановлено, що на питомі витрати палива довжина траси впливає по параболічній залежності, а питома частина тролейної ділянки - по лінійній залежності.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Використовуючи встановлені закономірності можливо визначати прогностичні витрати палива для конкретних трас руху при оцінці доцільності використання дизель-тролейвозів на базі кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю 90, 130 та 220 т. Означені закономірності витрат палива також можуть бути використані для автосамоскидів іншої вантажопідйомності з відповідним корегувальним коефіцієнтом потужності двигуна та питомих витрат палива.

Список літератури

1. Пахомов В.І., Гірін І.В., Тищенко В.Ю., Жалдаченко О.А. Обґрунтування раціональної організації експлуатації кар'єрних автосамоскидів // Вісник Криворізького національного університету Збірник наукових праць Випуск 52, м. Кривий Ріг, КНУ, 2021, с. 58-64
2. Hirin I.V., Tyshchenko V.Yu. Comparative analysis of safety design for electric vehicle and internal combustion engine cars // Вісник Криворізького національного університету Збірник наукових праць Випуск 51, м. Кривий Ріг, КНУ, 2020, с. 57-62
3. Пахомов В.І., Гірін І.В., Гірін В.С. Дослідження та розробка заходів, спрямованих на зниження токсичності викидів промислового автотранспорту // Вісник Криворізького національного університету Збірник наукових праць Випуск 50, м. Кривий Ріг, КНУ, 2020, с. 73-78.
4. Сістук В.О., Монастирський Ю.А. Пошук оптимальної схеми установки кар'єрного автосамоскида під навантаження для умов глибоких кар'єрів // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства», м. Кривий Ріг, КНУ, 2022 р. С.128.
5. Монастирський Ю.А., Потапенко В.В. Адаптивна система технологічного автотранспорту кар'єру // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Розвиток промисловості та суспільства», м. Кривий Ріг, КНУ, 2022 р. С.124.
6. Фергехро планує електрифікувати кар'єрний транспорт / <https://gmk.center/ua/news/ferrexpo-planuie->

[elektrizuvati-kar-iemij-transport/?fbclid=IwAR2skv5J7ZG2qbdh0AZ4Qvq6M582hm1xVMqliPjchVgsEg8q5iv2rBPxixA](https://www.researchgate.net/publication/364828508_elektrizuvati-kar-iemij-transport/?fbclid=IwAR2skv5J7ZG2qbdh0AZ4Qvq6M582hm1xVMqliPjchVgsEg8q5iv2rBPxixA)

7. Siemens patented all-electric Mobile Mining Truck based on proven technology / <https://imining.com/2021/11/04/siemens-patented-electric-mobile-mining-truck-based-proven-technology/>
8. Caterpillar introduces trolley assist system for CAT® electric drive mining trucks / https://www.cat.com/en_AU/news/machine-press-releases/caterpillar-introduces-trolley-assist-system-for-cat-electric-drive-mining-trucks.html
9. Trolley assist for diesel-electric trucks in mining: 3 reasons why it is taking off. Thanks to Boliden's recent trial at its Aitik open-pit mine, in Sweden, the subject of trolley assist is back on the mining industry's agenda. / <https://new.abb.com/mining/mineoptimize/systems-solutions/mining-electrification/trolley-assist-for-diesel-electric-trucks>
10. Trolley-assisted haul roads construction and maintenance / <https://www.globalroadtechnology-blog.com/industry-articles/trolley-assisted-haul-roads-construction-and-maintenance>
11. Liebherr Trolley Trucks Testing Success at Austrian Mine <https://www.heavyliftnews.com/liebherr-trolley-trucks-testing-success-at-austrian-mine/>
12. An introduction to trolley-assist haulage systems/ <https://globalroadtechnology.com/trolley-assist-haulage-systems/>
13. 5 things you may not have known about the Trolley Assist System <https://www.liebherr.com/en/ind/latest-news/news-press-releases/detail/5-things-you-may-not-have-known-about-the-trolley-assist-system.html>
14. Can a dirty industry come clean? How mining equipment is becoming more sustainable / <https://www.mobilehydraulictips.com/can-a-dirty-industry-come-clean-how-mining-equipment-is-becoming-more-sustainable/>
15. **Y. Monastyrskyi, V. Sistuk, I. Maksymenko.** Prospects for using truck trolley-assisted haulage systems in deep iron ore open pit mines. Vytautas Ostaševičius (pirmininkas). (2023). Transport Means 2023. Part II. Proceedings of the 27th International Scientific Conference. P.705 – 709. <https://ebooks.ktu.edu/pdfreader/transport-means-2023.-part-ii.-proceedings-27th-international-scientific-conference/>. doi:10.5755/e01.2351-7034.2023.P2.

Рукопис подано до редакції 21.03.24

УДК 622.7

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук, проф., О.В. БУЛАХ, Л.В.СКЛЯР, кандидати техн. наук, доценти, Криворізький національний університет
М.О. ОЛІЙНИК, канд. техн. наук, менеджер продукту, компанія "Weir Minerals"

ОСОБЛИВОСТІ ЗБАГАЧЕННЯ ГЕМАТИТОВИХ РУД ПІДЗЕМНОГО ВИДОБУТКУ КРИВБАСУ В КРУПНОСТІ 1-0 ММ

Мета. Метою даної роботи є проведення досліджень сухим способом на залізних рудах підземного видобутку з визначенням технологічних показників на вібраційному полігармонічному гравітаційному сепараторі.

Методи дослідження. Мінералогічний, хімічний аналізи. Гранулометричний склад матеріалу визначався за допомогою ситового аналізу, обробка та узагальнення матеріалу дозволили створити оптимальні умови розділення мінеральних зерен за крупністю на похилій поверхні вібраційного полігармонічного гравітаційного сепаратора.

Наукова новизна. На підставі визначення параметрів сепарації гематитових кварцитів підземного видобутку Кривбасу і особливостей їх мінерально-технологічного складу встановлено, що ефективність процесу класифікації у повітряному середовищі за граничним зерном 1 мм вище 97 % може бути досягнута за рахунок використання полігармонічного високочастотного розсіву з визначеним кутом нахилу декі, що дозволило отримати товарний залізорудний концентрат з масовою часткою заліза загального 65,32% при його виході 57,48% та вилученні заліза загального у концентрат 61,91%.

Практична значимість. Дослідження та промислові випробування зі збагачення залізних руд підземного видобутку Кривбасу сухим способом з використанням вібраційного полігармонічного гравітаційного сепаратора показали доцільність, перспективність, високу ефективність та можливість реалізації на гірничо-збагачувальних комбінатах, які здійснюють переробку рядової залізорудної сировини з отриманням концентрату зі значною часткою корисного компонента, що забезпечує можливість отримання високоякісної продукції.

Результати. В результаті проведених промислових випробувань сепарації мінеральної сировини у повітряному середовищі за рахунок використання полігармонічного високочастотного розсіву доведено можливість отримання з гематитових руд підземного видобутку Кривбасу високоякісного залізорудного концентрату крупністю 1-0 мм 57,48% за виходом з масовою часткою заліза загального 65,32 % і масовою часткою оксиду кремнію 5,9 % . Ефективність сепарації при цьому 97,37 %.

Ключові слова: видобуток підземний, сепаратор полігармонічний високочастотний, розділення, крупність, склад гранулометричний, поверхня просіювальна, ефективність.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-33-39

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Частка товарної залізорудної продукції, що одержується з руд підземного видобутку і експортується на зовнішній ринок підприємствами становить близько 50% ринку України. Масова частка заліза у таких рудах коливається від 54,0 до 60,0%, що не дозволяє їй бути конкурентоспроможною не тільки на зовнішньому, а й навіть на внутрішньому сировинному ринку [1].

Збагачення залізних руд, зокрема підземного видобутку є важливим аспектом у гірничодобувній індустрії. Цей процес сприяє ефективному вилученню цінних компонентів із руд, що підвищує загальну продуктивність та економічну ефективність видобутку. В комплексі це є складним процесом, що включає безліч технологічних етапів та спрямовано на підвищення концентрації заліза в руді і забезпечення високої якості кінцевого продукту як цінної сировини для металургійної промисловості. Ефективне використання різних методів переробки залізорудної сировини істотно впливатиме на якість і вартість металу, що робить його важливою ланкою в ланцюжку видобутку та обробки природних ресурсів.

Але, у сучасній гірничодобувній промисловості, особливо при підземному видобутку залізних руд, існує низка проблем, пов'язаних з їх подальшою переробкою. Однією з ключових проблем є високий вміст нерудної складової у видобутій сировині, що обґрунтовує необхідність розробки ефективних методів збагачення руд для отримання якісного продукту.

Існуючі методи можуть бути енерговитратними та вимагати значних фінансових вкладень, що створює додаткові проблеми для промислових підприємств. Окрім цього необхідність дотримання суворих екологічних стандартів під час переробки руд стає дедалі актуальнішою у суспільстві.

Не варто забувати й про економічні аспекти, які відіграють важливу роль, оскільки високі витрати на технології переробки та обмежені ресурси можуть стати на заваді розвитку галузі. Пошук ефективних та економічно вигідних рішень залишається важливим завданням для промисловості з переробки залізорудної сировини.

Аналіз досліджень і публікацій. Підвищення конкурентоспроможності залізорудної товарної продукції, яку виробляють гірничо-видобувні підприємства нині є однією з актуальних проблем галузі. Наразі ці підприємства випускають основну продукцію у вигляді багатих залізних руд з вмістом корисного компоненту на рівні 54-61% та концентратів якістю 64-67%. Для використання такої продукції у доменному виробництві вміст заліза повинен бути не менше 55%. Підвищення якості концентрату, в більшості випадків, досягається шляхом підвищення вмісту заліза та зменшення кількості шкідливих домішок, що у подальшому буде сприяти інтенсифікації процесів доменного виробництва [2-4].

Серед усіх мінералів, які містять залізо та визначатимуть перспективність залізорудних родовищ будуть магнетит, гематит, мартит, гетит [5], які є подальшою сировиною для процесів металургійного виробництва. Постійно зростаючий попит на сталь зумовлює залучення у переробку навіть низькосортних руд через стрімке зниження запасів багатой руди. При цьому можуть використовуватись деякі технології збагачення, що передбачають використання різниці у специфічних властивостях рудної і нерудної фаз [6].

Однак, через складність мінерального складу та постійне зниження якості вихідної сировини існуючі технології збагачення, зокрема гематитових руд, потребують певних заходів щодо їх удосконалення. Нині проблемі переробки багатих гематитових руд необхідно приділити особливу увагу через велику кількість факторів, які будуть впливати на вибір методу їх збагачення. Перш за все вплинуть умови та глибина їх видобутку та, як наслідок, погіршення якості видобуваної сировини [7, 8].

На початкових стадіях розробки заходів щодо отримання продукту потрібної якості було використано рудорозбірку ручним способом, що давало змогу виділити продукт якістю 65 мас.%, який представлено багатими мартитовими та залізолюдко-мартитовими різновидами. У подальшому, технології переробки цієї сировини поступово вдосконалювались та були спрямовані на більш повне вилучення заліза шляхом класифікації за крупністю та впровадженням методів більш глибокої переробки [8]. Однак, в умовах сучасних проблем з водопостачанням досить важливим завданням буде вирішення питання розробки «сухих» способів сепарації [9].

При підземному видобутку залізної руди, через її змішаний мінеральний склад, досить часто використовується первинна переробка яка заснована на методах дезінтеграції з подальшим поділом за крупністю з отриманням аглоконцентрату та неконденційного продукту. Видобута

гематитова руда з вмістом заліза 51-55 мас.% дробиться за три стадії з подальшою класифікацією за крупністю, що дозволяє збільшити вміст заліза у дрібному класі до 55-59 мас.% [10].

Розвиток технологій збагачення залізних руд підземного видобутку буде спрямовано на підвищення ефективності, зниження екологічного впливу та впровадження інноваційних рішень.

В такому випадку потрібно обрати метод переробки та створити необхідні умови для отримання концентрату з вмістом корисного компоненту, що перевищуватиме 62% [11].

Постановка задачі. Технологічна можливість збагачення залізних руд підземного видобутку наразі вивчається та повністю не визначена. Це дає змогу більш детально дослідити дану сировину за допомогою мінералогічного, хімічного, гранулометричного аналізів та визначити особливості збагачення руд у крупності 1-0 мм для отримання конкурентоспроможного товарного продукту.

Викладення матеріалу та результати. З метою визначення можливості та необхідності збагачення залізних руд підземного видобутку сухим способом були проведені деякі дослідження з грохочення на вібраційному полігармонічному гравітаційному сепараторі з визначенням технологічних показників. Даний сепаратор дозволяє розділяти корисні копалини з широким діапазоном фізичних властивостей, що є його перевагою у порівнянні з іншим обладнанням для класифікації матеріалу за крупністю.

Програма виконання технологічних випробувань включала детальне вивчення мінералогічного, гранулометричного складу матеріалу, проведення експериментів зі збагачення у повітряному середовищі на діючому устаткуванні та аналізу і синтезу отриманих результатів.

Вихідна сировина, яка поступала на дослідження, представлена гематитовими кварцитами підземного видобутку Криворізького басейну крупністю 16-0 мм з вмістом заліза загального 61,5%. Рудна частина представлена гематитом у різновидах мартит+залізна слюдка та дисперсним гематитом. Зустрічається також магнетит з вмістом близько 2,5%. Нерудну частину представлено, в основному, кварцом з його вмістом на рівні 12%. До інших мінералів, які присутні у досліджуваній сировині належать: хлорит, біотит, гідрогематит, гетит, каолінит, апатит, карбонат, пірит. Мінеральний та гранулометричний склад вихідної сировини наведено у табл.1 та 2.

Таблиця 1

Мінеральний склад вихідної сировини

гематит		Мінерали			Сума
мартит+залізна слюдка.	дисперсний гематит	магнетит	кварц	інші	
64,54	17,49	2,5	12,0	2,75	100,00

Таблиця 2

Гранулометричний склад вихідної сировини

Клас крупності, мм	Частковий вихід, %	Сумарний вихід., %	Вміст заліза загального, %	Вилучення, %
-16+10	9.17	9.17	42.48	6.46
-10+6	11.36	20.53	55.4	10.44
-6+2	12.7	33.23	56.5	11.9
-2+1	8.67	41.9	60.3	8,67
-1+0.5	8.92	50.82	63.91	9.45
-0.5+0.25	33.05	83.87	65.61	35.96
-0.25+0.16	13.62	97.49	63.91	14.43
-0.16+0.071	0.87	98.36	63.11	0.9
-0.071+0.050	0.3	98.66	65.71	1.79
-0.05+0	1.34	100		
Разом	100		60.31	100

Досліджувана сировина характеризується тонко- та дрібнозернистою структурою та шаруватою текстурою. Гематит характеризується тонким зрощенням з нерудними мінералами та має низький ступінь розкриття у класах крупності – 0,1 мм. В цьому випадку буде дещо складним отримання багатого товарної аглоруди та бідних відвальних хвостів через наявність тонких включень гематиту у нерудній частині та його проростання у ній. Агрегати та індивіди гематиту є досить тонкими, глибоко пророщеними у зернах кварцу та характеризуються розміром

0,001 – 0,05 мм. При цьому, наявність у вихідній сировині гідроксидів заліза та силікатів, що містять залізо визначить відносно високий вміст корисного компоненту у хвостах сепарації. Тому, для отримання високоякісної товарної продукції з руди підземного видобутку крупністю 16 – 1 мм на збагачення потрібно спрямовувати матеріал з вмістом класу – 0,074 мм на рівні 90 – 100%.

Вивчений матеріал крупністю -16+1,0 мм на 53,5% складний гематитовою рудою з величезним переважанням її мартитового різновиду. Близько 40% матеріалу представлено тонкошаровими гематитовими кварцитами, серед яких виявлено всі мінералогічні різновиди. Решта загальної маси матеріалу проби представлена гематитовими середньошаровими, безрудними та малорудними кварцитами (рис.1).

Вивчення розподілу зростків та вільних уламків показало, що вже в класі крупності -1,0+0,5 мм вільні мартитові уламки трохи більше перевищують кількість мартитових зростків. У класі -0,16+0,071 мм кількість зростків мартиту становить близько 6% загального обсягу мартиту. У класі крупності -0,071+0,05 мм цей показник становить 3,5%. Стовідсоткове розкриття мартиту спостерігається в класі крупності -0,05 мм (рис.2).

Оцінка розкриття мартиту у матеріалі крупністю -1,0+0,0 мм показала, що значне переважання (92,6% проти 7,4%) вільних уламків над зростками відзначається у класі крупності -0,071+0,05 мм.

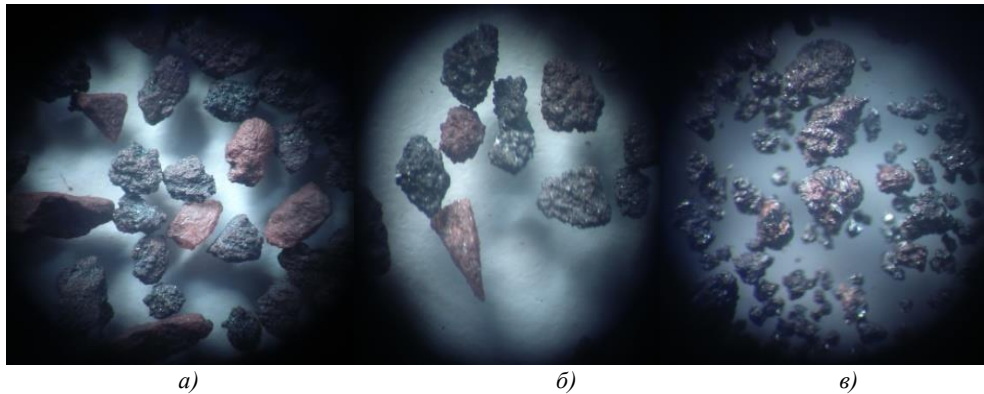


Рис. 1. Матеріал класів крупності -2,0+1,0 мм (а); -1,0+0,5 мм (б); -0,5+0,25 мм (в)

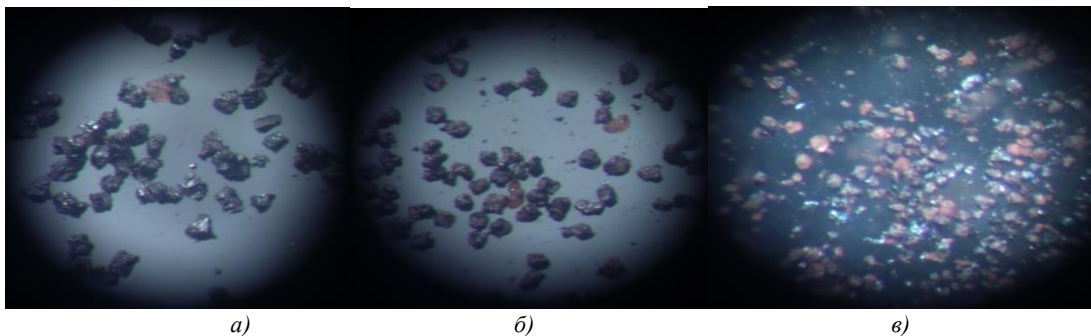


Рис. 2. Матеріал класів крупності -0,16+0,071 мм (а); -0,071+0,05 - мм (б); -0,05 мм (в)

У матеріалі крупністю -0,16+0,071 мм кількість мартитових зростків становить 32,1%. Стовідсоткове розкриття мартиту спостерігається у крупності -0,05 мм (рис. 3).

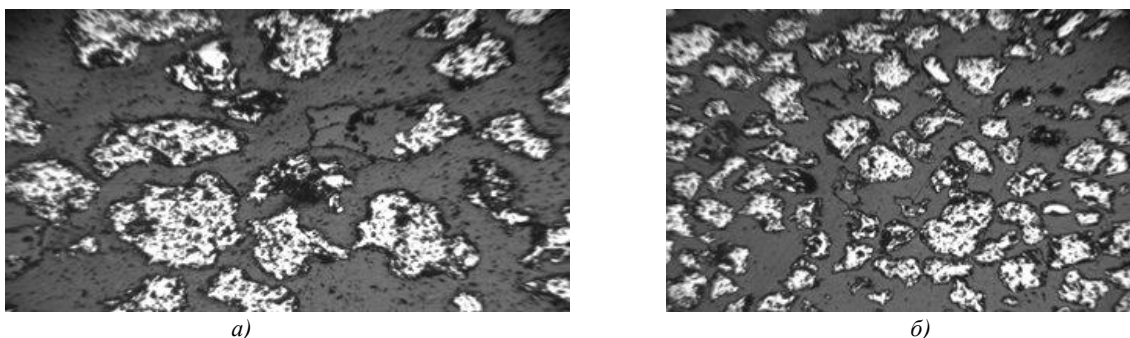


Рис. 3. Матеріал класів крупності $-0,16+0,071$ (а) та $-0,071+0,05$ (б) мм; 1 – багаті зростки мартигу; 2 – багаті зростки кварца; 3 – вільні уламки мартигу; 4 – вільні уламки кварцу – зб. 125^x; б – зб. 85^x

Як зазначено вище, крупність вихідної сировини складала 16-0 мм та вологість в межах 5-6%.

Дослідження проводилися на сепараторі у якого просіювальна поверхня має сито, що самоочищається з можливістю регулювання кута нахилу у діапазоні від 25° до 30° при постійній питомій продуктивності сепаратора за вихідним живленням, що складала 6-8 т/м²·год. Сепаратор має можливість налаштування на матеріали з широким діапазоном фізичних властивостей, що істотно відрізняє його від аналогічних машин для поділу сировини по крупності. Він призначений для поділу твердих частинок, що містяться в матеріалі, як у вологих, так і сухих сипких сумішах на два класи крупності [12,13].

З метою підвищення ефективності грохочення визначена можливість регулювання амплітуди та частоти коливань рами сепаратора.

За результатами експериментальних досліджень визначено оптимальний кут нахилу деки, що при питомій продуктивності сепаратору 7,2 т/м²·год склав 30° (табл. 3). Так, при куті нахилу сита 30° досягнуто найкращі показники збагачення гематитової руди, а саме масова заліза загального у підрешітному продукті складала 65,32%. Вихід концентрату – 57,48% при вилученні заліза загального у концентрат 61,91%. Ефективність сепарації при цьому складала 97,37%. У результаті аналізу досліджень встановлено, що при класифікації руди у повітряному середовищі шляхом високочастотного розсіву за граничним зерном 1 мм використовуючи прийняті налаштування сепаратора можливо отримати високоякісний товарний продукт з масовою часткою заліза загального більш ніж 65 %.

Таблиця 3
Результати досліджень на сепараторі ВПГС-5М за граничним зерном 1 мм та різним кутом нахилу деки

Кут нахилу деки	Найменування продукту	Вихід, %	Масова частка Fe _{заг} , %	Вилучення Fe _{заг} , %	Ефективність розділення, %
25	Надрешітний	39,01	55,84%	35,93	98,13
	Підрешітний	60,99	63,68	64,07	
	Вихідний	100,00	60,62	100,00	
27,5	Надрешітний	42,57	54,31	38,19	96,10
	Підрешітний	57,43	65,16	61,81	
	Вихідний	100,00	60,54	100,00	
30	Надрешітний	42,52	54,33	38,09	97,37
	Підрешітний	57,48	65,32	61,91	
	Вихідний	100,00	60,65	100,00	

За результатами розгорнутого хімічного аналізу отриманого підрешітного продукту (табл. 4), який є концентратом визначено, що масова частка кремнезему в отриманому продукті становить 5,9%. Ситовий аналіз наведено у табл. 5.

Таблиця 4
Результати розгорнутого хімічного аналізу отриманого концентрату крупністю 1-0 мм

Показники	Елементи																	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe заг	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P	S заг.	Cl	CO ₂	Соли водорозчинні	Fe _m	Плп
Масова частка, %	5,9	0,15	65,32	2,1	91,05	0,09	0,25	0,05	0,12	0,032	0,038	0,011	0,021	0,187	0,054	0,318	1,42	0,62

Таблиця 5
Результати ситового аналізу отриманого концентрату крупністю 1-0 мм

Показники	Класи крупності, мм							Разом
	+1	-1+0,5	-0,5+0,25	-0,25+0,16	-0,16+0,071	-0,071+0,05	-0,05+0	
Вихід, %	5,84	14,46	53,57	22,07	1,42	0,49	2,15	100

За результатами мінералогічного аналізу отриманого концентрату (табл. 6) з'ясовано, що він складається переважно з мартиту та дисперсного гематиту. При цьому кількість магнетиту та інших мінералів незначна. Найбільший вміст мартиту спостерігається у класах крупності -0,25+0,1; -0,1+0,071 та -0,071+0,05 мм, а найменший – у класі -0,05 мм. Вміст дисперсного гематиту поступово знижується, починаючи з верхніх класів крупності, але характеризується найбільшим значенням у класі -0,05 мм. Вміст кварцу не перевищує 6,0 об.%, але видно, що у верхніх (+0,5, -0,5+0,25 мм) та нижніх (-0,071+0,05, -0,05 мм) класах крупності його вміст більше ніж проміжних класах крупності.

Таблиця 6

Мінеральний склад отриманого концентрату крупністю 1-0 мм, об.%

Клас крупності, мм	Мінерали					Всього
	гематит		магнетит	кварц	інші	
	мартит+ зал.сл.	дисп.гем.				
+0,5	68,0	22,3	1,3	6,3	2,1	100,0
-0,5+0,25	68,5	22,1	1,1	5,4	2,9	100,0
-0,25+0,1	69,6	21,4	0,9	4,4	3,7	100,0
-0,1+0,071	70,3	20,3	1,4	4,1	3,9	100,0
-0,071+0,05	69,8	19,6	1,2	5,3	4,1	100,0
-0,05+0,0	63,2	25,3	1,1	6,1	4,3	100,0
Разом за концентратом	68,0	22,0	1,2	5,5	3,3	100,0

Висновки та напрямок подальших досліджень. Проведені дослідження з визначення можливості збагачення залізних руд підземного видобутку Кривбасу у повітряному середовищі з використанням вібраційного полігармонічного гравітаційного сепаратора показують доцільність та перспективність використання запропонованого способу.

На підставі визначення параметрів сепарації гематитових кварцитів підземного видобутку Кривбасу і особливостей їх мінерально-технологічного складу встановлено, що ефективність процесу класифікації у повітряному середовищі за граничним зерном 1 мм вище 97 % може бути досягнута за рахунок використання полігармонічного високочастотного розсіву з визначеним кутом нахилу декі, що дозволило отримати товарний залізорудний концентрат з масовою часткою заліза загального 65,32% при його виході 57,48% та вилученні заліза загального у концентраті 61,91%. Масова частка кремнезему у концентраті – 5,9 %.

Список літератури

1. Tetiana OLIINYK, Liudmila SKLYAR, Natalia KUSHNIRUK, Nadiya HOLIVER, Barbara TORA, 2023 – Ocena skuteczności technologii wzbogacania kwarcytu hematytowego, Inżynieria Mineralna z. 1(51), Wyd. Polskiego Towarzystwa Przeróbki Kopalni, Kraków, s. 33 – 44 <http://doi.org/10.29227/IM-2023-01-04>
2. Ступнік М.І. Розробка технологій збагачення середньовкраплених гематитових кварцитів Кривбасу / М.І. Ступнік, В.В. Перегудов, В.С. Моркун, Т.А. Олійник, М.К. Короленко // Nauka innov. - 2020. - Т.16, №6. - С. 56-72.
3. Олійник Т.А. Перспективи розвитку технологій збагачення залізних руд / Т.А. Олійник // Збагачення корисних копалин. – 2018. – Вип. 69(110). – С. 32-44.
4. Булах О.В. Пошук рішень з підвищення ефективності збагачення окислених руд Кривбасу / О.В. Булах, О.О. Булах // Гірничий вісник. – 2016. – Вип. 101. – С. 174-178.
5. Булах О.В. Вдосконалення технології збагачення змішаних руд / О.В. Булах // Гірничий вісник. – 2017. – Вип. 102. – С. 183-187.
6. Електронний ресурс: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591020303338>
7. Трачук А.А. Анализ способов обогащения кусковых гематитовых руд Кривбасса / А.А. Трачук // Гірничий вісник. – 2015. – Вип. 100. – С. 92 – 95.
8. Булах О.В. Развитие технологій переробки бідних залізних руд гематит-мартитового складу / О.В. Булах // Збагачення корисних копалин. – 2019. – Вип. 73(114). – С. 16-20.
9. Електронний ресурс: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0032591018308441>

10. Олейник Т.А. Повышение качества бедных кусковых руд шахтной добычи Кривбасса методом отсадки / Т.А. Олейник, Л.В. Склад // Збагачення корисних копалин. – 2013. – Вип. 53(94). – С. 44-57.

11. Ніколасенко К.В. Технологічні рішення збагачення бідних гематитових руд штату Оріса (Індія), для отримання з них кондиційного концентрату / К.В. Ніколасенко, В.Д. Євтехов, В.В. Філенко, П.К. Ніколасенко // Вісник Криворізького національного університету. – 2013. – Вип. 34. – С. 111-114.

12. Пат. 26638 України, МПК U51C1/00. Спосіб збагачення залізорудної сировини / Рева О.В., Євтехов В.Д., Ахкзов Ю.Л.– u200708203; заявл. 18.07.2007; опубл. 25.09.2007. Бюл. № 15,2007.

13. Пат. 87016 України, МПК C251C1/00. Спосіб збагачення залізорудної сировини / Рева О.В., Євтехов В.Д., Ахкзов Ю.Л.– a200708201; заявл. 18.07.2007; опубл. 10.06.2009. Бюл. № 11.2009

Рукопис подано до редакції 25.03.24

УДК 669.054.83

С.Г. САВЕЛЬЄВ, д-р техн. наук, проф., Т.П. ЯРОШ, канд. техн. наук, доц.,
О.В. БАБАЄВСЬКА, М.М. КОНДРАТЕНКО, ст. викладачі,
Д.Ю. БАБОШКО, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

АНАЛІЗ МЕТАЛУРГІЙНИХ МЕТОДІВ УТИЛІЗАЦІЇ ЧЕРВОНОГО ШЛАМУ

Відзначено різноманітність методів утилізації червоного шламу – побічного продукту глиноземного виробництва, світове накопичення якого неухильно збільшується, посилюючи негативний вплив на оточуюче природне середовище. Показано, що переважна більшість найбільш ефективних методів утилізації базується на поєднанні піро- та гідрометалургійних способів. Проаналізовано основні науково-практичні результати ряду досліджень металургійних методів утилізації червоного шламу, опублікованих у провідних фахових виданнях протягом кількох останніх років. Зроблено висновок про економічну доцільність комплексного вилучення з червоного шламу цінних металів – заліза, алюмінію, титану, скандію. Відзначено необхідність проведення дослідно-промислових випробувань технологій безвідходної переробки червоного шламу з урахуванням його характеристик.

Метою роботи є порівняльний аналіз металургійних методів утилізації червоного шламу з метою визначення розробок, найбільш перспективних для промислової реалізації.

Методи наукового дослідження. У роботі використані загальнологічні методи наукового дослідження – аналіз і синтез, аналогія, узагальнення.

Наукова новизна роботи. На основі проведеного аналізу встановлено, що найбільш ефективними методами металургійної переробки червоного шламу, які забезпечують найбільший ступінь вилучення металів, є такі, що в оптимальному співвідношенні поєднують процеси піро- і гідрометалургії при мінімальних витратах енергії та викидах шкідливих речовин в оточуюче середовище.

Практична значущість роботи полягає в розширенні уявлень щодо можливих напрямів вирішення проблеми масштабної утилізації червоного шламу, отриманні висновків, які дають необхідну науково-технічну інформацію для ефективного практичного застосування найбільш результативних методів металургійного використання червоного шламу та вказують перспективні шляхи продовження досліджень у цьому напрямку.

Результати роботи свідчать про те, що сучасний рівень розробок металургійних методів утилізації червоного шламу вже наблизився до положення, яке дозволяє впевнено визначати економічно ефективні, технологічно досконалі безвідходні прийоми переробки цієї цінної техногенної сировини. Широке промислове впровадження безвідходних металургійних методів утилізації червоного шламу не тільки зменшить собівартість виробництва глинозему і відповідно алюмінію, але й суттєво покращить екологічну ситуацію в районах розташування підприємств алюмінієвої промисловості.

Ключові слова: червоний шлам, утилізація, пірометалургія, гідрометалургія, технологія, відновлення, вилугування, ефективність.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-39-45

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Червоний шлам є побічним продуктом найбільш поширеного процесу промислового виробництва глинозему з бокситу за способом Байєра, а глинозем є сировиною для отримання алюмінію, другого за затребуваністю металу в світі після заліза. У зв'язку з характерними технологічними операціями гідрохімічного способу Байєра, який передбачає тонке подрібнення вихідної сировини та її подальшу обробку лужним розчином, на виході з процесу червоний шлам являє собою лужну (рН = 9-12) розбавлену (R = P : T = 8-10) пульпу червоного кольору, шкідливу для оточуючого середовища та здоров'я людини. Завдяки цим характеристикам, а також наявності в складі червоного шла-

му цінних металів – заліза, алюмінію, титану, скандію та ін.– питання його безпечної та ефективної утилізації є дуже актуальним.

Широкомасштабне промислове використання червоного шламу, світові запаси якого знаходяться на рівні 4 млрд т [1], здатне суттєво вплинути на розвиток не лише чорної та кольорової металургії, а й промисловості будівельних матеріалів, шляхового будівництва тощо. Але поки що зі 180 млн т червоного шламу, які щорічно утворюються, лише 3 % використовуються для отримання керамічної продукції. Тому останнім часом спостерігається збільшення кількості наукових досліджень, спрямованих на розробку ефективних металургійних процесів переробки червоного шламу, про що свідчить тематика публікацій, представлених у міжнародних «індексах цитування» – Scopus і Web of Science. Саме новітні матеріали, розміщені на найбільш авторитетній платформі Scopus впродовж останніх п'яти років, були використані при проведенні детального аналізу металургійних методів утилізації червоного шламу. Адже серед усіх можливих сфер його використання тільки металургійна галузь промисловості з її величезними виробничими потужностями здатна забезпечити не тільки переробку в повному обсязі червоного шламу поточного виробництва, але й поступову розробку раніше накопичених запасів цієї цінної техногенної сировини.

Аналіз досліджень і публікацій. Останнім часом у фахових закордонних виданнях було опубліковано ряд оглядових статей, присвячених проблемі утилізації червоних шламів методами піро- і гідрометалургії.

Докладний спеціалізований огляд технологій вилучення заліза з червоного шламу на підставі 61 публікації виконано в Університеті Цінхуа (Китай) [1]. З існуючих трьох основних процесів виробництва гідроксиду алюмінію – спікання, Байєра і комбінованого – було розглянуто використання червоного шламу, що утворюється при реалізації байєровського методу, яким виробляється 95 % гідроксиду алюмінію завдяки простоті процесу та низькому енергоспоживанню.

Стислі результати дослідження технології металургійного використання червоного шламу на підставі аналізу 165 публікацій викладено в роботі співробітників Південно-Східного університету (Китай) [2], мета якої полягала в з'ясуванні міри небезпечності червоного шламу шляхом вивчення його фізичних і хімічних властивостей. Кінцева ціль – на базі розгляду можливості використання червоного шламу в різних галузях, оцінюючи переваги та недоліки різних технологій, визначити найбільш здійснений підхід до комплексної та нешкідливої утилізації червоного шламу у великих масштабах.

Аналіз 3422-х журнальних статей, присвячених червоному шламу, розміщено в статті працівників трьох установ: компанії International Envirotech Limited, Південно-Китайського педагогічного університету (Китай) і Університету Дікіна, Бервуд (Австралія) [3]. Цю роботу проведено для оцінки доступності літератури з наступних аспектів дослідження червоного шламу: характеристика, обробка для мінімізації шкідливого впливу, відновлення цінних металів, застосування в оточуючому середовищі та використання в якості будівельних матеріалів.

Проблемам і можливостям використання процесу прямого відновлення-магнітної сепарації на основі вугілля для переробки відходів кольорової металургії з високим вмістом заліза присвячена стаття співробітників Центрального Південного університету (Китай) [4], для написання якої проаналізовано 107 літературних джерел.

Ціллю критичного огляду 147 публікацій, виконаного співробітниками Індійського технологічного інституту ІТІ-Руркі (Індія), була оцінка червоного шламу як поліметалічного джерела [5]. У статті представлено огляд лабораторних і пілотних досліджень, комерційних проєктів, використовуваних для вилучення заліза, алюмінію, титану, скандію та рідкоземельних металів з червоного шламу різного походження.

У статті співробітників Північно-Східного університету (Китай) на підставі аналізу 108 літературних джерел систематизовано стан досліджень з вторинної переробки цінних металів (алюмінію, заліза, натрію, титану, скандію, галію, ванадію та рідкоземельних металів) із червоних шламів за останні роки [6]. При цьому було порівняно переваги та недоліки різних процесів відновлення з урахуванням таких показників, як ефективність відновлення, енергоспоживання та вплив на довкілля.

Огляд світової практики переробки червоних шламів пірометалургійними способами виконано співробітниками Інституту металургії та матеріалознавства ім. О.О. Байкова РАН, Націо-

нального дослідницького технологічного університету «MICS», Президії РАН (РФ) [7]. При аналізі 91 джерела інформації розглянуто як способи низькотемпературного твердофазного відновлення за температур 1050-1200 °С з наступним відділенням заліза методом магнітної сепарації, так і високотемпературні процеси, що включають відновлювальну плавку за температур вище 1400 °С. Крім того, в роботі розглянуто способи вторинного використання одержуваних шлаків для вилучення глинозему, титану та рідкоземельних металів, а також процеси підготовки червоних шлаків: знелужування, сушіння та згрудкування.

У статті співробітників Державної ключової лабораторії передової металургії та Пекінського науково-технологічного університету (Китай) [8], з посиланням на 94 літературні джерела інформації, розглядається великомасштабний і нешкідливий метод переробки червоного шламу з високим вмістом заліза, який включає вилучення заліза за допомогою пірометалургії з наступною утилізацією відходів для приготування в'язких матеріалів.

Три аспекти комплексного використання червоного шламу розглянуто в роботі співробітників Центрального Південного університету (Китай) [9]: ефективне вилучення цінних компонентів, повне використання сировинного ресурсу та екологічна складова. Їх застосування при розробці нових технологій повинно забезпечувати ринкову конкурентоспроможність, захист навколишнього середовища й екологічний баланс.

Стисла характеристика представлених вище аналітичних статей, присвячених переважно металургійному напрямку утилізації червоного шламу, дає підставу поставити наступну задачу даної статті.

Постановка задачі. Завданням представленого дослідження є порівняльна аналітична оцінка піро- і гідрометалургійних методів утилізації червоного шламу на підставі новітніх публікацій останніх п'яти років з метою визначення напрямів розробок, найбільш перспективних для реалізації в промислових масштабах.

Викладення матеріалу та результати. Аналіз досліджень і розробок пірометалургійних методів утилізації червоного шламу представлено в роботах [10-16].

Сутність нової технології вилучення заліза з червоного шламу, розробленої співробітниками Південно-Західного університету науки і технологій, Ключової лабораторії радіоактивних і рідкісних розсіяних мінералів Міністерства землі та ресурсів [10] і Північно-Східного університету [11] (Китай), полягає в додаванні до шламу присадки та відновника з наступною сегрегаційною випал-магнітною сепарацією (рис. 1). Після збагачення отримано залізний концентрат (Fe 80,29 мас. %) при загальному вилученні заліза 92,08 %. Результати рентгенівської дифракції та скануючої електронної мікроскопії показали, що після сегрегаційного випалу гематит перетворився на нову фазу, що складалася в основному з металевого заліза та магнетиту.

Схожий процес вилучення заліза з червоного шламу досліджено співробітниками IT Roorkhee (Індія) [12]. Було з'ясовано, що стадія карбонізації сприяє вилученню луку з червоного шламу у вигляді розчинного натрію алюмінату, який можна повторно використовувати в процесі Байєра. Тому процес попередньої карбонізації шламу з наступним первинним магнітним збагаченням перед відновлювальним випалом і подальшим вторинним магнітним збагаченням забезпечує оптимальні умови для вилучення заліза та є економічно ефективним з погляду питомої витрати відновника.

Технологію карботермічного відновлення для вилучення заліза та видалення натрію з червоного шламу досліджено також співробітниками Пекінського університету науки і технологій (Китай) і Вуллонгонгського університету (Австралія) [13]. При оптимальній температурі відновлення 1450 °С, основності 1,5 і часу відновлення 12 хв. ступінь металізації та видалення натрію досягають 96,63 і 90,62 % відповідно.

Дослідження основних факторів, що впливають на ефективність вилучення заліза з червоного шламу при відновлювальному випалі, виконано співробітниками Технологічного університету Шахруду за участю представника компанії Jajarm Alumina (Іран) [14]. Встановлено, що кра-

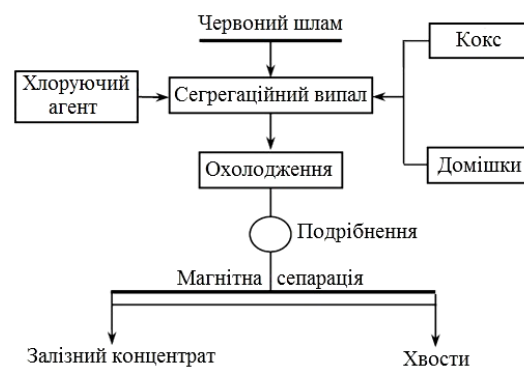


Рис. 1. Схема технологічного процесу випробування сегрегаційного випалу – магнітної сепарації

шим агрегатом для відновлення є трубчаста піч з аргонем, оптимальна температура і час випалу складають відповідно 1000 °C і 60 хв., напруженість магнітного поля дорівнює близько 1000 Гаус; за цих умов можна отримати концентрат магнітної сепарації з вилученням заліза на рівні 89,9 %.

Співробітниками Північно-Східного університету, Спільного національно-місцевого інженерно-дослідницького центру високоєфективних технологій розробки ресурсів тугоплавких залізних руд і ТОВ «Чанчунський інститут золотого дизайну» (Китай) запропоновано відновлення червоного шламу монооксидом вуглецю в псевдозрідженому шарі [15]. Результати експериментів показали, що за оптимальних умов процесу – температура відновлення 800 °C, концентрація CO 85 % і час відновлення 30 хв. – досягнуто ступінь металізації та ступінь відновлення на рівні 68,08 і 78,72 % відповідно. Попередньо відновлені таким чином матеріали можуть бути використані як сировина для відновної плавки в електропечах.

Фахівцями Уханьського університету науки та технологій і Ключової лабораторії з ефективного використання та агломерації металургійних мінеральних ресурсів Хубей (Китай) досліджено вплив залізної руди з високим вмістом марганцю на процес прямого відновлення високозалізного червоного шламу [16]. Під час випробувань змінювали такі параметри, як температура і час відновлення, масове співвідношення C/Fe і кількість заліза, що додавалася з рудою з високим вмістом марганцю. Результати показали, що ступінь металізації червоного шламу досягала 84,07 % при температурі 1150 °C, часі витримки 150 хв. і масовому співвідношенні C/Fe 2,0. За рахунок синергетичного ефекту відновлення червоного шламу в присутності високомарганцевого залізняку прискорювалось і ступінь металізації шихти збільшувалась до 93,52 %.

Варто відзначити, що, не зважаючи на високий ступінь вилучення заліза, описані технології відновного випалу червоного шламу не можна вважати цілком досконалими, оскільки вони спрямовані на витягання зі шламу тільки одного корисного компоненту – заліза, а отриманий при цьому супутній продукт потребує подальшої переробки.

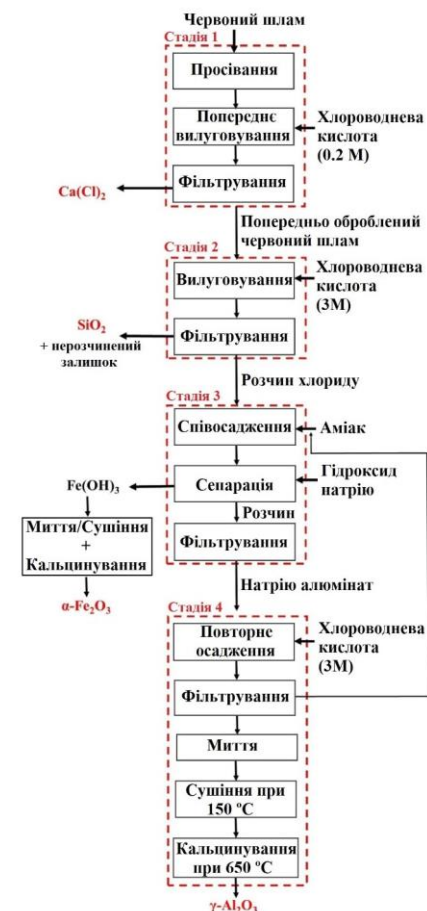


Рис. 2. Блок-схема вилучення глинозему та оксиду заліза з червоного шламу

Аналіз досліджень і розробок гідрометалургійних методів утилізації червоного шламу представлено в роботах [17-21].

У результаті ступінчастого вилуговування основних цінних компонентів червоного шламу – оксидів заліза й алюмінію – з використанням соляної кислоти співробітники Іранського університету науки і технологій (Іран) отримали наступні результати [17]. На стадії попереднього вилуговування в оптимізованих умовах з використанням HCl (0,2 M) при кімнатній температурі протягом 2 год. видалено 89 % кальцію, що міститься в червоному шламі. Для селективного видалення твердого кремнезему залишок обробляли концентрованою HCl (3,0 M) при 95 °C, що приводило до розчинення заліза й алюмінію з ефективністю до 90 % (рис. 2). Використання методик FT-IR, BET, EDS, XRD, SEM і TEM дозволило встановити, що новоствореними продуктами при осадженні катіонів Fe³⁺ і Al³⁺ є нанорозмірний α -гематит і мезопористий γ -оксид алюмінію. Отже, дешевий червоний шлам був перетворений на дуже цінні нанорозмірні оксиди металів за нескладною технологією та при використанні дешевих реагентів. Більш того, цей метод генерує найменшу кількість відходів у процесі вилуговування, а всі реагенти можуть бути відновлені для подальшого використання, що робить цей метод перспективним.

Інтернаціональна команда науковців з університетів Угорщини, Іраку, В'єтнаму, Індії та Південної Кореї вивчала процес вилучення Sc як основного продукту та Fe як побічного продукту з угорського червоного шламу шляхом екст-

ракції розчинником (EP) з подальшим селективним виділенням Sc і Fe з фільтратів [18]. Для видалення заліза перед екстракцією застосовувалися піро- та гідрометалургійні методи. Запропоновано два екстрагенти на основі фосфорорганічних сполук: біс(2-етилгексил)фосфорна кислота (Д2ЕГФК) і трибутилфосфат (ТБФ). Результати показали, що EP з використанням діетилового ефіру та три-н-октиламіну (N235) ефективно екстрагує Fe(III) з фільтрату HCl у вигляді HFeCl₄. Більше 97 % Sc було екстраговано екстрагентом Д2ЕГФК з концентрацією 0,05 моль/л. Після відгону органічної фази Д2ЕГФК отримували Sc(OH)₃ у вигляді осаду. У системі ТБФ екстраговано 99 % Sc, концентрація екстрагенту – 12,5 об. %.

В процесі досліджень вилучення цінних компонентів з червоного шламу співробітників Університету Севільї (Іспанія) в якості агентів-вилуговувачів використовували воду, сірчану кислоту та гідроксид натрію [19] при різному співвідношенні L/S і часу контакту. З техніко-економічних та екологічних міркувань оптимальними умовами для вилучення цінних елементів з червоного шламу визнано: концентрація H₂SO₄ 2 М, контакт впродовж 24 год., співвідношення L/S = 5. В цих умовах досягаються високі ступені вилуговування цінних елементів, таких як La (47,6 %) або V (11 %).

У роботі співробітників Федеральних університетів Пара та Ріо-де-Жанейро (Бразилія) представлено математичне моделювання й оцінено кінетичні параметри вилуговування червоного шламу з використанням алгоритму Метрополіса-Гастінгса методу Монте-Карло Марківських ланцюгів [20]. Червоний шлам, отриманий з регіону Амазонки в Бразилії, вилуговувався сірчаною кислотою концентрацією 20 і 30 об.% при 60, 80 і 90 °С. Під час вилуговування проби відбирали кожні 30 хв. і центрифугували для відокремлення фільтрату від концентрату. Математична модель кінетики вилуговування червоного шламу є системою пов'язаних диференціальних рівнянь і заснована на моделі ядра, що скорочується. Максимальне вилуговування оксидів заліза й алюмінію склало в середньому 96 і 91 % відповідно, тоді як максимальне вилучення титану в сірчаноокислий розчин не перевищило 26 %. Кінетика вилуговування оксидів заліза, титану й алюмінію мала середні значення порядку реакцій 1,52, 2,96 і 2,05 відповідно. Значення енергії активації варіювалися від 64 до 176 кДж/моль. Запропонована математична модель пройшла належну перевірку, що дозволило застосовувати її для оцінки кінетичних параметрів вилуговування інших хімічних елементів, присутніх у червоному шламі.

Співробітники Китайської академії наук і Куньмінського університету науки та технологій (Китай) запропонували спільну стратегію для алюмінієвої та чорної металургії, засновану на переробці червоного шламу гідрометалургійним методом [21]. За цією технологією шлам спочатку оброблявся розчином H₂SO₄ з отриманням катіонів Fe³⁺ і Al³⁺ і одночасним дослідженням численних факторів впливу на процес вилуговування. При подальшому фільтруванні пульпи отримували кек, основними компонентами якого були CaSO₄, TiO₂ і SiO₂, придатні для повторного використання як добавки при виробництві будівельних матеріалів. Після співосадження, поділу залізо- та алюмінійвмісних продуктів і прожарювання Fe(OH)₃ отримували кінцевий продукт, вміст заліза в якому становив 58,01 %, що відповідало вимогам до сировини агломерацийного виробництва.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Наявність значної кількості публікацій, присвячених утилізації червоного шламу, як техногенної сировини для отримання цінних металів – заліза, алюмінію, титану, рідкоземельних металів тощо – вказує на надзвичайну актуальність проблеми безпечної й економічно ефективною масштабної переробки цього побічного продукту глиноземного виробництва, щорічне одержання якого складає приблизно 180 млн т., а світове накопичення перевищило 4 млрд т. Важливу роль в актуальності цього питання відіграє екологічна складова – шкідливий вплив червоного шламу на оточуюче середовище та здоров'я людини. Особливо активно дослідження з використанням сучасного обладнання в цьому напрямку проводяться в Китайській Народній Республіці, що можна пояснити накопиченням в цій країні значних обсягів червоного шламу, кількість яких перевищує 1,3 млрд т, у тому числі близько 520 млн т шламу з вмістом оксидів заліза понад 30 %.

Переважає більшість опублікованих матеріалів свідчить про ретельні дослідження пропонує ефективних методів металургійної переробки червоного шламу, що дає підстави вважати їх перспективними для дослідно-промислової перевірки та наступного впровадження у виробництво. У першу чергу це стосується пірометалургійних методів переробки червоного шламу, які відрізняються від гідрометалургійних більшою простотою та можливістю прискоре-

них темпів великомасштабної реалізації. Серед пірометалургійних способів найбільш перспективними представляються процеси, в яких обробка матеріалу здійснюється газоподібним відновником у псевдозрідженому шарі, що дозволяє скоротити час обробки, а також методи, що включають технологічні прийоми попередньої підготовки сировини та інтенсифікації процесу відновлення.

Гідрометалургійні технології є більш складними, але дозволяють отримати високу ступінь вилучення металів з червоного шламу. Найбільш ефективним слід вважати комплексний багатостадійний процес переробки червоного шламу, який оптимально поєднує піро- і гідрометалургійні стадії та забезпечує найменші енергетичні витрати і мінімальне забруднення навколишнього середовища.

Одним із напрямків подальших досліджень металургійної утилізації червоного шламу може бути більш детальне вивчення ефективності окремих технологічних прийомів комбінованого піро- та гідрометалургійного процесу з подальшим переходом на його комплексне випробування в умовах дослідно-промислового етапу роботи.

Список літератури

1. Iron Recovery Technology of Red Mud—A review. **Hao Kong, Tuo Zhou, Xinhua Yang, Yingli Gong, Man Zhang and Hairui Yang**. *Energies*. 2022, 15 (10), 3830; <https://doi.org/10.3390/en15103830>
2. Summary of Research Progress on Metallurgical Utilization Technology of Red Mud. **Li, X.-F., Zhang, T.-A., Lv, G.-Z., Wang, K., Wang, S.** *Minerals*, 13 (6), 737. 2023 <https://doi.org/10.3390/min13060737>
3. **Anyi Niu, Chuxia Lin**. Trends in research on characterization, treatment and valorization of hazardous red mud: A systematic review. *Journal of Environmental Management*. Volume 351, February 2024, 119660 <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119660>
4. Application of coal-based direct reduction-magnetic separation process for recycling of high-iron-content non-ferrous metallurgical wastes: Challenges and opportunities. **Xianqing Xu, Zhengqi Guo, Deqing Zhu, Jian Pan, Congcong Yang, Siwei Li**. *Process Safety and Environmental Protection*, Vol. 183, March 2024, pp. 59-76. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.12.057>
5. **Shrey Agrawal, Nikhil Dhawan**. Evaluation of red mud as a polycrystalline source – A review. *Minerals Engineering* Volume 171, 1 September 2021, 107084. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107084>
6. Recovery of valuable metals from red mud: A comprehensive review. **Xiaolin Pan, Hongfei Wu, Zhongyang Lv, Haiyan Yu, Ganfeng Tu**. *Science of The Total Environment*. Volume 904, 15 December 2023, 166686. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723053111>
7. Обзор мировой практики переработки красных шламов. Часть 1. Пирометаллургические способы. **Д.В. Зиневев, П.И. Грудинский, В.Г. Дюбанов и др.** Изв. вузов. Черная металлургия. 2018. Том 1, №11. – С. 843-858. DOI: 10.17073/0368-0797-2018-11-843-858
8. The harmless and value-added utilization of red mud: Recovering iron from red mud by pyrometallurgy and preparing cementitious materials with its tailings. **Pengfei Wu, Xiaoming Liu, Zengqi Zhang, Chao Wei, Jie Wang, Jiarui Gu**. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Available online 21 November 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.11.038>
9. A Review on Comprehensive Utilization of Red Mud and Prospect Analysis. **Li Wang, Ning Sun, Honghu Tang and Wei Sun**. *Minerals*, 2019, 9 (6), 362; <https://doi.org/10.3390/min9060362>
10. A novel process for extraction of iron from a refractory red mud. **Wei Ding, Junhui Xiao, Yang Peng, Siyue Shen, Tao Chen, Kai Zou, Zhen Wang**. *Physicochem. Probl. Miner. Process.*, 56(6), 2020, 125-136. DOI: 10.37190/ppmp/127319.
11. A novel process to fully utilize red mud based on low-calcium sintering. **Jiannan Pei, Xiaolin Pan, Yanming Zhang, Haiyan Yu, Ganfeng Tu**. *Jour. of Environmental Chem. Engin.* Vol. 9, Is. 6, December 2021, 106754 <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106754>.
12. **Shrey Agrawal, Veeranjayulu Rayapudi, Nikhil Dhawan**. Extraction of Iron values from Red mud. *Materials Today: Proceedings*. Volume 5, Issue 9, Part 1, 2018, Pages 17064-17072. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.04.113>.
13. Carbothermal reduction of red mud for iron extraction and sodium removal. **Huaixuan Feng, Xue-feng She, Xiaomin You, Guang-qing Zhang, Jing-song Wang and Qing-guo Xue**. *High Temperature Materials and Processes*. Volume 41 Issue 1. Published by De Gruyter June 28, 2022. <https://doi.org/10.1515/htmp-2022-0005>
14. **Nooshin Navi, Mohammad Karamoozian, Mohammadreza Khani**. Recovery of Iron from Bauxite Red Mud by Reduction Roasting Method. *Journal of Mining and Environment (JME)*, Vol. 14, No. 4, 2023, 1295-1305. DOI: 10.22044/jme.2023.12611.2291
15. An efficient and clean utilization technique for red mud based on fluidized bed carbon monoxide reduction. **Yaxiong An, Jianwen Yu, Nan Hu, Peng Gao, Yanjun Li, Yuexin Han**. *Advanced Powder Technology*, Volume 33, Issue 11, November 2022, 103828. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103828>
16. Efficient improvement for the direct reduction of high-iron red mud by co-reduction with high-manganese iron ore. **Junying Wan, Tiejun Chen, Xianlin Zhou, Yanhong Luo, Wei Liu, Qicai Lu**. *Minerals Engineering*, Volume 174, 1 December 2021, 107024. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.10>
17. **Zahra Karimi & Ahmad Rahbar-Kelisham**. Efficient utilization of red mud waste via stepwise leaching to obtain α -hematite and mesoporous γ -alumina. *Scientific Reports*, volume 13, Article number: 8527 (2023) Cite this article <https://www.nature.com/articles/s41598-023-35753-w>

18. A selective hydrometallurgical method for scandium recovery from a real red mud leachate: A comparative study. **Salman, A.D., Juzsakova, T., Jalhoom, M.G., ... Nadda, A.K., Nguyen, D.D.** Environmental Pollution, Vol. 308, 1 September 2022, 119596. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119596>
19. Valorization of Bayer Red Mud in a Circular Economy Process: Valuable Metals Recovery and Further Brick Manufacture. **Leiva, C., Arroyo-Torralvo, F., Luna-Galiano, Y., ... Vilches, L.F., Fernández Pereira, C.** Processes, 2022, 10, 2367. <https://doi.org/10.3390/pr10112367>
20. Experimental study and mathematical modelling of red mud leaching: application of Bayesian techniques. **Viegas, B.M., Magalhães, E.M., Orlande, H.R.B., Estumano, D.C., Macêdo, E.N.** International Journal of Environmental Science and Technology, 2023, 20 (5), pp. 5533–5546. DOI: 10.3390/pr10112367 <https://www.researchgate.net/publication/365318991>
21. Red mud recycling by Fe and Al recovery through the hydrometallurgy method: a collaborative strategy for aluminum and iron industry. **Liu, X., Zou, Y., Geng, R., Li, B., Zhu, T.** Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30 (15), pp. 43377–43386.

Рукопис подано до редакції 29.03.24

УДК 669.162

Д.О. КАССИМ, д-р техн. наук, проф., Є.В. ЧУПРИНОВ, канд. техн. наук, доц.,
І. А. ЛЯХОВА, канд. техн. наук, доц., М.Г. КОРЕНКО, канд. техн. наук, доц.
Державний університет економіки і технологій

УЗАГАЛЬНЕННЯ МЕТОДИЧНИХ ПІДХОДІВ ДО РОЗРАХУНКУ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ГАЗОВОГО ПОТОКУ В ГОРНІ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ ПРИ ВДУВАННІ КОМБІНОВАНОГО ДУТТЯ

Мета. Головною метою даної роботи є вдосконалення контролю зміни енергетичних параметрів газового потоку в горні доменних печей та розподілу газового потоку за радіусом на підставі адаптації методики визначення комплексних показників оцінки потоків комбінованого дуття та горнового газу, з урахуванням технологічних особливостей доменної плавки при вдуванні комбінованого дуття.

Методи дослідження. У роботі використано сучасні методи дослідження, у тому числі математичне моделювання, методи математичної статистики для дослідження впливу запропонованих комплексних параметрів на перебіг доменної плавки при різних технологічних режимах роботи доменної печі корисним об'ємом 5000 м³.

Наукова новизна. Розроблено методичні рекомендації щодо розрахунку повної енергії потоку горнового газу при вдуванні природного газу та пилувугільного палива в горні доменних печей.

Практична значимість. Отримані авторами даної роботи результати дозволяють контролювати як середні значення потоку горнового газу при вдуванні природного газу та пилувугільного палива в горні доменних печей, так і його значення по окремим фурмам доменної печі, що дає можливість контролювати та регулювати глибину проникнення потоку горнового газу до центру печі від кожної фурми, а, отже, дозволяє покращувати газодинамічні та відновлювальні умови доменної плавки.

Результати. У даній роботі авторами, на підставі аналізу результатів впровадження технології вдування пилувугільного палива на доменній печі корисним об'ємом 5000 м³, були запропоновані напрямки вдосконалення газодинамічних та відновлювальних умов доменної плавки на підставі контролю зміни розмірів зон горіння перед фурмами печі та розподілу газового потоку за радіусом її горна. З цією метою були узагальнені методичні підходи щодо визначення комплексних енергетичних показників оцінки потоків комбінованого дуття і горнового газу при впровадженні технології доменної плавки з вдуванням природного газу та пилувугільного палива.

Ключові слова: доменна плавка, пилувугільне паливо, горновий газ, комбіноване дуття, зона горіння, кінетична енергія, повна енергія, фурма, горн.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-45-50

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Висока ціна природного газу та його дефіцит обумовили перехід металургійних підприємств України від технології роботи з природним газом до технології доменної плавки з використанням альтернативних видів палива, зокрема з вдуванням пилувугільного палива (ПВП). При цьому доменники зіштовхнулися з рядом складних аспектів даної технології, як організаційних (якість та стабільність постачання шихтових матеріалів, технологічних параметрів роботи печей), так і технічних (зменшення ресурсу роботи доменної печі, холодильного обладнання, фурм та іншого допоміжного обладнання), які знижують ефективність застосування технології ПВП в Україні порівняно із зарубіжною практикою. В цих умовах вдосконалення контролю та регулювання газоди-

намічних умов роботи горну доменних печей при зміні параметрів дуттьового режиму плавки є актуальним практичним завданням.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У 2016 році в рамках проведення міжнародної науково-виробничої конференції доменників “Досвід впровадження та шляхи вирішення проблем освоєння технології вдування ПВП у доменному виробництві” був проаналізований досвід впровадження цієї технології на печах багатьох металургійних комбінатів, у тому числі і на доменній печі об’ємом 5000 м³ підприємства “АрселорМіттал Кривий Ріг”. Авторами [1], на підставі вивчення представленої інформації, було зроблено висновок, що нерівномірний розподіл дуття та пиловугільного пилу по фурмам, який мав місце, призвів до значної нерівності теоретичної температури горіння, виходу горнового газу, повної енергії потоку комбінованого дуття на зрізі фурми, що відповідає за зміну розмірів зони горіння перед кожною фурмою та повної енергії потоку горнового газу, яка в свою чергу, впливає на глибину проникнення газового потоку до центру горна, а отже і на газодинамічні умови роботи доменної печі.

Вивченню впливу комплексних показники потоків повітряного та комбінованого дуття і горнового газу на розміри зон горіння та глибину проникнення газового потоку до центру горна, а також для управління газодинамікою горна та ходом доменної плавки присвячені чисельні роботи професора Лялюка В.П. із співавторами [2-6].

Постановка задачі. З огляду на це, метою даної роботи є вдосконалення контролю зміни розмірів зон горіння перед фурмами печі та розподілу газового потоку за радіусом її горна. Для досягнення поставленої мети поставлене завдання адаптації методики визначення комплексних показників оцінки потоків комбінованого дуття та горнового газу з урахуванням технологічних особливостей доменної плавки при вдуванні природного газу та пиловугільного палива.

Викладення матеріалу та результати. Тривалий час, для судження про зміни довжини зони горіння у повітряних фурм доменних печей, використовували поняття кінетичної енергії дуття. Проте, чисельні дослідження [3, 7] показали, що кінетична потужність дуттьового потоку слабо пов’язана з довжиною зони горіння і зовсім не характеризує глибину проникнення газового потоку до центру горна, оскільки становить лише невелику частину від повної енергії потоку, що включає і енергію тиску, частина якої також витрачається на утворення зони горіння і проштовхування газу до центру горна.

Тому, перш ніж перейти до методики розрахунку повної механічної енергії потоку горнового газу при вдуванні природного газу та ПВП, розглянемо рівняння визначення повних енергій потоку повітряного дуття [3].

Запас повної механічної енергії потоку атмосферного дуття на зрізі носка фурми доменної печі визначають за допомогою рівняння (1), Дж/с

$$E_{nm\delta} = 371,2 \frac{Q_{od} \cdot T_{\delta}}{n} + 68877,6 \frac{\rho_{od} \cdot Q_{od}^3 \cdot T_{\delta}^2}{n^3 \cdot S_{\phi}^2 \cdot P_{\delta}^2}, \quad (1)$$

де Q_{od} – нормальна об’ємна витрата дуття, виміряна приладами на печі, нм³/с; T_{δ} – температура дуття; K , n – кількість повітряних фурм, шт; ρ_{od} – щільність повітряного дуття, приведена до нормальних умов, кг/м³; S_{ϕ} – площа перерізу фурм, м², P_{δ} – тиск дуття, Па.

Перший доданок рівняння (1) характеризує запас енергії тиску, а другий – величину кінетичної енергії потоку нагрітого атмосферного дуття на зрізі носка фурми доменної печі.

Для визначення запасу повної механічної енергії потоку комбінованого дуття $E_{nm\kappa\delta}$ (при вдуванні природного газу) на зрізі фурми доменної печі необхідно в рівнянні (1) замість витрати дуття використовувати приведену до нормальних умов витрату газоповітряної суміші Q_{oc} (нм³/с), що утворюється у зв’язку з частковим горінням природного газу в порожнині фурми, замість температури дуття – температуру цієї суміші T_c (К), замість нормальної щільності дуття – щільність суміші за нормальних умов – ρ_{oc} (кг/м³). Методика визначення даних параметрів наведена в [8].

Скориставшись розробленою методикою, можна розрахувати запас повної механічної енергії комбінованого дуття на зрізі доменної фурми печі за рівнянням (2), Дж/с

$$E_{nm\kappa\delta} = 371,2 \cdot \frac{Q_{oc} \cdot T_c}{n} + 68877,6 \cdot \frac{\rho_{oc} \cdot Q_{oc}^3 \cdot T_c^2}{n^3 \cdot S_{\phi}^2 \cdot P_{\delta}^2} \quad (2)$$

Струмінь дуття, що вийшов з фурми, утворює вільну розпушену порожнину з інтенсивним рухом газів і кусків коксу. На цій ділянці в струмінь підводиться енергія, пов’язана з виділенням

енергії від горіння коксу і природного газу. В результаті цього склад, маса, температура, щільність і теплоємність потоку горнового газу змінюються не тільки по відношенню до параметрів потоку повітряного або комбінованого дуття на зрізі фурми, але і по радіусу горна доменної печі.

Підведення енергії в потік горнового газу різко збільшує величину енергії тиску при інтенсивній витраті кінетичної енергії потоку дуття в зоні горіння (окислення). Тому, для визначення величини повної механічної енергії потоку горнового газу $E_{нм\ \varepsilon\varepsilon}$ в осередку горіння, в рівняння (1) потрібно внести наступні зміни, Дж/с

$$E_{нм\ \varepsilon\varepsilon} = 371,2 \frac{Q_{огг} \cdot T_m}{n} + 68877,6 \frac{\rho_{oc} \cdot Q_{oc}^3 \cdot T_c^2}{n^3 \cdot S_{\phi}^2 \cdot P_{\delta}^2}, \quad (3)$$

де $Q_{огг}$ – вихід горнових газів, приведений до нормальних умов, м³/с; T_m – температура у зоні горіння (теоретична температура горіння), К.

Вихід горнового газу можна знайти з виразу (4), м³/с

$$Q_{огг} = Q_{од} \cdot [2O_2 + (1 - O_2) + 1,5 \cdot \phi] + k_{нп} \cdot Q_{ог}, \quad (4)$$

де ϕ – вологість дуття, м³/м³; $k_{нп}$ – середній вихід водню при розкладанні вуглеводнів природного газу, який змінюється в діапазоні 1,95-2,05 в залежності від складу газу; $Q_{ог}$ – приведена до нормальних умов витрата природного газу, м³/с.

При поєднанні технологій вдування пиловугільного палива та природного газу, у струмись дуття, що вийшов із фурми в зону горіння, підводиться енергія, пов'язана з горінням коксу, природного газу і ПВП. В результаті цього склад, маса, температура, щільність і теплоємність потоку горнового газу змінюються. Тому для розрахунку повної механічної енергії потоку горнового газу з вдуванням ПВП в фурми доменної печі скористаємося рівнянням (3), підставивши у формулу позначення виходу горнового газу і теоретичної температури при вдуванні ПВП, Дж/с

$$E_{нм\ \varepsilon\varepsilon} = 371,2 \frac{Q_{огг\ нпн} \cdot T_{м\ нпн}}{n} + 68877,6 \frac{\rho_{oc} \cdot Q_{oc}^3 \cdot T_c^2}{n^3 \cdot S_{\phi}^2 \cdot P_{\delta}^2}, \quad (5)$$

де $Q_{огг\ нпн}$ – вихід горнових газів, приведений до нормальних умов при вдуванні ПВП спільно з природним газом, м³/с; $T_{м\ нпн}$ – температура в зоні горіння при вдуванні ПВП (теоретична температура горіння ПВП спільно з природним газом), К.

Виведення комплексних формул для розрахунку теоретичної температури і виходу горнового газу при спільному використанні ПВП і природного газу дозволяє визначати їх значення і при окремому їх використанні.

Розрахувати теоретичну температуру горіння у фурм можна за будь-якою з відомих формул, але найбільш доцільно при цьому використовувати оперативну інформацію, яку фіксують прилади або обчислювальні машини, встановлені на пульті управління доменною піччю

При цьому необхідно враховувати, що поряд з горновим газом, який утворюється при горінні вуглецю і вуглеводнів палива в горні доменної печі та дисоціації води дуття, до загального об'єму горнового газу приєднуються леткі речовини ПВП і азот, що виконує функції носія вугілля. Середня ізобарна теплоємність суміші газоподібних сполук, що виділяються в горні з ПВП в інтервалі температури 800-1227 °С становить 2,252 кДж/м³·град [9].

З урахуванням теплоємності летких речовин вугілля, газу-носія ПВП і теплоти, що витрачається на утворення шлаку із золи ПВП, загальне рівняння для розрахунку теоретичної температури горіння при сумісному вдуванні в горні доменної печі природного газу та ПВП, може бути представлено в наступному вигляді, К [9]

$$T_m = 273 + \frac{1700 \cdot Q_{ог} + 10521,9 \cdot \left[Q_{од} - Q_{ог} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] O_2 + 1,4 \cdot Q_{од} \cdot t_{\delta} + \dots}{1,5 \cdot \left\{ \left(3 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) Q_{ог} + \left(2 + \frac{1 - O_2}{O_2} \right) \cdot \left[Q_{од} - Q_{ог} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) \right] O_2 + 1,5 \cdot Q_{од} \cdot \phi \right\} + \dots} + \frac{2340 \cdot O_2 \left[Q_{од} - Q_{ог} \left(0,5 + \frac{1 - O_2}{2O_2} \right) - 0,67 \cdot m_{нпн} \right] - 10806 \cdot Q_{од} \cdot \phi - C_{шл} \cdot A_{нпн} \cdot m_{нпн}}{(1,42 \cdot Q_{N_2} + 2,252 \cdot V^c) \cdot m_{нпн}}, \quad (6)$$

де $C_{шл}$ – теплоємність шлаку, що утворюється при плавленні золи ПВП, кДж/(кг·град) (у розрахунках можна прийняти $C_{шл} = 1700$ кДж/(кг·град)); $A_{нпн}$ – вміст золи в ПВП, д.од.; $m_{нпн}$ – витрата

ПВП, кг/с; 1,42 – середня теплоємність азоту в інтервалі температур 100-1227 °С, кДж/нм³·град; Q_{N_2} – питома витрата азоту-носія, м³/кг ПВП; 2,252 – середня теплоємність сухого коксового газу в інтервалі температур 800-1227 °С, кДж/нм³·град, що визначається за складом газу та середніми теплоємностями компонентів; V^c – вихід летючих речовин вугілля у перерахунку на суху масу, д.од.

Загальне рівняння для розрахунку виходу горнового газу при горінні природного газу та ПВП можна знайти з виразу, аналогічного (4), але доповненого доданком, що враховує вихід водню з ПВП ($k_{H_2} = 0,42 \div 0,48$ м³/кг) та об'єм азоту-носія, що вдувається в піч – Q_{N_2} , м³/с

$$Q_{O_2} = Q_{O_2} \cdot [2O_2 + (1 - O_2) + 1,5 \cdot \varphi] + k_{N_2} \cdot Q_{O_2} + (k_{H_2} + Q_{N_2}) \cdot m_{H_2} \quad (7)$$

За допомогою представлених рівнянь (2-6) були розраховані енергетичні показники газового потоку для двох періодів роботи доменної печі корисним об'ємом 5000 м³ при приблизно однакової інтенсивності доменної плавки: перший період – при вдуванні природного газу (ПГ) та завантаженні кускового антрацити (А) (жовтень 2006 р), другий період – при вдуванні ПВП [10]. Техніко-економічні показники роботи та отримані розрахункові результати наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Техніко-економічні показники роботи доменної печі об'ємом 5000 м ³ при роботі на ПГ и ПВП		
Техніко-економічні показники та результати розрахунків	Варіант технології	
	ПГ+А	ПВП
Тривалість періоду, днів	31	31
Продуктивність, т/добу	9826	9340
Приведена продуктивність, т/добу	9826	11479
Витрата коксу (К), кг/т	426,8	451,7
Приведена витрата коксу, кг/т	426,8	409,8
Витрата антрацити (А), кг/т	56	0,0
Витрата ПВП, кг/т	0,0	71,4
Інтенсивність (К+А+ПВП), кг/м ³ · добу	948,8	977,1
Дуття: витрата, м ³ /хв	7812	7953
тиск, кПа	337	328
температура, °С	1090	990
Витрата природного газу (ПГ), м ³ /т	87,1	11,0
Вміст кисню в дутті, %	30,5	24,3
Колошниковий газ: тиск, кПа	139	148
температура, °С	93	120
вміст %: CO/CO ₂	30,0/18,4	24,1/20,7
H ₂	6,2	4,5
Аналіз чавуну, %: Si	0,84	0,63
Mn	0,30	0,19
S	0,019	0,012
Рудне навантаження на кокс, т/т	4,07	3,78
Виніс колошникового пилу, кг/т чавуну	3,2	11,2
в т.ч. вловлен, кг/т чавуну	2,8	4,7
Поточні простой/тихий хід, %	0,83/0,03	9,55/0,08
Вихід шлаку, кг/т чавуну	402	429,7
Вміст Fe во всій шихті, %	54,9	55,81
Витратні коефіцієнти, кг/т чавуну: агломерат АЦ №1	134,4	51,6
агломерат АЦ №2	1192	1331,0
окаатиші	300,3	259,0
шлак збагачений	56,4	55,0
скрап металевий	51,3	8,8
вапняк	28,0	0,0
Основність шлаку, од.	1,22	1,15
Якість коксу, %: волога	3,73	3,6
зола	11,2	10,4
сірка	0,63	0,5
M ₂₅	87,6	88,2
M ₁₀	7,0	6,6
+80 мм	7,9	6,6
-25 мм	3,6	3,4
CSR	54,9	59,9
CRI	31,3	29,6
Фракція -5 мм, %: агломерат АЦ №1	17,96	13,61
агломерат АЦ №2	4,8	7,89
окаатиші	3,98	6,18
Середньозважена фракція -5 мм, %	5,74	7,8
Повна механічна енергія комбінованого дуття, кДж/с	2034,8	1555,7
Повна механічна енергія горнового газу, кДж/с	5113,7	3928,6

Порівняння отриманих результатів розрахунків повних механічних енергій комбінованого дуття і горнового газу, наведених у таблиці, вказують на зменшення значень енергетичних показників, а отже і довжини зони горіння і глибини проникнення горнового газу до центру горна при переході з вдування природного газу на вдування пиловугільного палива.

Таким чином, при однаковій інтенсивності доменної плавки, вдування ПВП, в порівнянні з вдуванням природного газу, сприяє зменшенню довжини зони горіння і розвитку периферійного потоку газу в доменній печі. Для забезпечення оптимального газорозподілу в нижній частині печі необхідно при будь-яких змінах технології доменної плавки контролювати величини повних механічних енергій дуття і горнового газу, що вказують на зміну довжини зони горіння і глибини проникнення горнового газу до центру печі. Важливо не допускати зміну цих енергетичних показників нижче значень, отриманих в періоди рівної високопродуктивної роботи доменної печі з низькою витратою коксу. При цьому важливо враховувати, що нерівномірні витрати дуття і ПВП по фурмам доменної печі призводять до значної нерівномірності повних енергій потоків горнового газу і відповідно глибини проникнення газового потоку до центру горна від чого залежить вся робота доменної печі і, тим паче, при вдуванні ПВП.

Висновки та напрямок подальших досліджень. В роботі узагальнені методичні рекомендації щодо розрахунку повної енергії потоку горнового газу при різних варіантах технології доменної плавки, зокрема при вдуванні природного газу та пиловугільного палива. Наведені рівняння, які дозволяють контролювати як середні значення даного комплексного показника, так і його значення за фурмами доменної печі, що дає можливість контролювати та регулювати глибину проникнення потоку горнового газу до центру печі, для кожної фурми, а, отже, дозволяють покращувати газодинамічні та відновлювальні умови доменної плавки.

На підставі виконаних розрахунків встановлено, що при однаковій інтенсивності доменної плавки, вдування ПВП, в порівнянні з вдуванням природного газу, сприяє зменшенню довжини зони горіння і розвитку периферійного потоку газу в нижній частині доменної печі, що буде використано у подальших дослідженнях.

Список літератури

1. Проблемы технологии с вдуванием пылеугольного топлива на доменной печи объемом 5000 м³ / **Лялюк В.П., Тараканов А.К., Кассим Д.А.** и др. // Сталь. 2017. №10. С. 4-10.1. Лялюк В.П. Современные проблемы технологии доменной плавки. – Днепропетровск: Пороги, 1999. – 164 с.
2. **Лялюк В.П., Товаровский И.Г.** Выбор режимов доменной плавки на комбинированном дутье с оценкой параметров фурменной зоны // Черные металлы. 2003. №11. С. 13-16.
3. **Лялюк В.П.** Механизм образования и влияние процессов в фурменных очагах на ход доменной плавки / Монография: Коллективный труд. Познание процессов доменной плавки / Под редакцией В.И. Большакова и И.Г. Товаровского // Днепропетровск: Пороги, 2006. 439 с.
4. **Tovarovskiy I.G., Gordon Y.M., Lyalyuk V.P.** Optimization of Tuyere Parameters for Natural Gas Injection and Control of Heterogeneity of Blast Furnace Operation // The Iron & Steel Society's International Technology Conference 2003, Indiana Convention Center, Indianapolis, Indiana, USA. 2003. April 27-30. Str. 805-816.
5. Application of the First Law of Thermodynamics to Analyze Raceway Phenomena and Optimize the Tuyere Parameters / **V. Shvedov, Y. Gordon, I. Tovarovskiy, V. Lyalyuk** // Proceedings 6th European Coke and Ironmaking Congress (ECIC-186). Modelling in coke and ironmaking Session 18. Düsseldorf. 2011. 27 June – 1 July. P. 1-7.
6. Лялюк В.П. Уравнение Клапейрона-Менделеева и изменение перепада статического давления газа в доменной печи // **Сталь. 2016. №2. С. 2-8.**
7. **Лялюк В.П., Кассим Д.А., Онопа В.Н., Донсков Е.Е.** Теоретические и экспериментальные исследования доменной плавки. – Кривой Рог: Дионат, 2016. – 621 с.
8. **Лялюк В.П., Тараканов А.К., Кассим Д.А.** Методика расчета полной энергии горнового газа при вдувании пылеугольного топлива // **Сталь. – 2017. – №3. – С. 2-8.**
9. Определение теоретической температуры горения при вдувании в горн доменной печи природного газа и пылеугольного топлива / **Д.А.Кассим, В.П. Лялюк, А.К. Тараканов** и др. // **Металлургическая и горнорудная промышленность. 2016. №2. С. 38-43.**
10. Опыт внедрения и пути решения проблем освоения технологии вдувания ПУТ на доменной печи объемом 5000 м³ / **Д.В. Пинчук, П.И. Огорвин, А.В. Романчук** и др. // **Актуальні проблеми розвитку металургійної науки та освіти: всеукраїнська науково-технічна конференція 4-5 квітня 2017 р.: Збірник доповідей. – Дніпропетровськ. – С. 122-129**

Рукопис подано до редакції 20.03.24

Р.О. ТІМЧЕНКО, д-р техн., наук., проф.,
Д.А. КРІШКО, О.Б. НАСТИЧ, кандидати техн., наук, доценти,
Н.С. ГАЛЕЧАН, В.С. МОРИКОНЬ, Ю.Ю.МІНЬКО, магістранти
Криворізький національний університет

ОСОБЛИВОСТІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ БУРОНАБИВНИХ ПАЛЬ

Мета. Розкриття послідовності влаштування буронабивних паль і взаємодія їх із ґрунтовим масивом у процесі їх виготовлення.

Методи дослідження. Нині спосіб розрахунку несучої здатності палі за нормативними регламентами дає недостатньо точні результати (знижує несучу здатність за певних інженерно-геологічних умов). Крім того, аналітичний метод розрахунку має суттєве обмеження, оскільки розроблений для паль глибиною занурення до 40 м, що не дає змоги врахувати підвищення опору по бічній поверхні та під вістрям паль, розташованих на більшій глибині.

Наукова новизна. Виконано оцінку впливу взаємодії паль, що виготовляються в ґрунті, з ґрунтовим масивом у період їх виготовлення на несучу здатність по ґрунті для точного розрахунку.

Практична значимість. Наведено послідовність влаштування, сферу застосування деяких технологій виготовлення буронабивних паль у ґрунті, висвітлено їхні переваги та недоліки з економічної та технічної точки зору. Виконано оцінку впливу взаємодії паль, що виготовляються в ґрунті, з ґрунтовим масивом у період їхнього виготовлення на несучу здатність паль для точного розрахунку та ефективність застосування паль.

Результати. Представлено графіки розрахункових опорів ґрунтів на бічній поверхні палі і їхнім нижнім кінцем залежно від глибини розташування шару та показника плинності. Показано, що в процесі виготовлення паль на слабких ґрунтах збільшення периметра палі сягнуло 114% під дією тиску бетону під час бетонування і, як наслідок, на слабких ґрунтах можлива перевитрата бетону до 130%. Зроблено оцінку несучої здатності бурових паль, що виготовляються в ґрунті, з урахуванням технології виготовлення та їхнього розташування за глибиною в ґрунтах. Отримано та проаналізовано результати нелінійної екстраполяції опорів ґрунтів залежно від фізичних властивостей ґрунтів на бічній поверхні та під п'ятою бурових паль, що виготовляються в ґрунті.

Ключові слова: ґрунти, основа, технологія виготовлення паль.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-50-56

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В даний час напрямки розвитку у великих і малих містах характеризуються висотними будівлями і спорудами з розвиненим підземним простором. Ці споруди передають значні навантаження на ґрунти основи, тому необхідно заглиблювати палі на велику глибину в надійних ґрунтах. Унаслідок тривалих геологічних процесів, що відбувалися тисячі років тому, слабкі ґрунти вкрай нерівномірно розподілені за глибиною і площею залягання. Оцінка несучої здатності паль залишається одним зі складних розділів у геотехнічних розрахунках за винятком простих розрахункових схем, відображених у технічних регламентах. Найбільш надійною теоретичною базою для кількісної оцінки несучої здатності паль на вертикальне навантаження є статичний польовий метод. Таким чином, підвищення точності та достовірності розрахунків несучої здатності паль, що виготовляються в ґрунті, в інженерно-геологічних умовах дає змогу визначити підходящу технологію виготовлення паль і оптимальні розміри (діаметр, довжина) з метою підвищення надійності, зниження їх ресурсоемності, витрат на будівництво, тому тема дослідження є актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій. Питанням вивчення несучої здатності паль приділяли велику увагу такі дослідники: С. Я. Боженков, І. П. Бойко, О. О. Бірюков, О. Л. Готман, Н. З. Готман, В. М. Голубков, Б. І. Далматов, Б. І. Дідух, В. В. Знаменський, О. А. Луга, Л. С. Лапідус, Ф. К. Лапшин, Р. А. Мангушев, Н. С. Нікітіна, О. І. Осокін, В. Н. Парамонов, О. Б. Пономарьов, Ю. В. Россіхін, О. В. Самородов, О. А. Сахаров, С. М. Сотніков, З. Г. Тер-Мартиросян, А. З. Тер-Мартиросян, Р. О. Тімченко, В. М. Улицький, В. С. Уткін, О. Б. Фадєєв, В. Г. Шаповал, А. Г. Шашкін, В. Б. Швець, М. Т. Davisson, Е. Е. Debeer, J. V. Hansen, F. K. Chin та інші [1-15].

Постановка задачі. Розкриття послідовності влаштування буронабивних паль і взаємодія їх із ґрунтовим масивом у процесі їх виготовлення.

Викладення матеріалу та результати. Рішення з використанням паль, що виготовляються в ґрунті, стає дедалі популярнішим і широко застосовується у світі та в Україні зокрема. Палі, що виготовляються в ґрунті, дають змогу передати значні навантаження на основу (до 2 МПа) від

висотних будівель і важких споруд. Ці палі широко використовуються в цивільному і промислово-будівництві, оскільки, можуть застосовуватися в будь-яких інженерно-геологічних умовах, в тому числі в нестійких і водонасичених пилювато-глинистих ґрунтах, відсутність динамічних впливів на конструкції наявних будівель і споруд, розташованих поруч із будівельним майданчиком, що дуже ефективно в умовах обмеженої міської забудови для великих і малих міст. У практиці будівництва відомі приклади влаштування палей, що виготовляються в ґрунті, в районах із поширенням слабких ґрунтів глибиною до 110 м діаметром 3,8 м (міст Jiashao в Китаї).

Визначення несучої здатності палей виконується за технічними регламентами з визначенням несучої здатності палей довжиною до 40 м. Однак нині тенденції розвитку сучасного висотного будівництва вимагають використання палей зі значно більшою глибиною закладення на міцних ґрунтах, що ніяк не відображено в нормах.

Сучасні технічні регламенти і принципи проектування обмежені опорами ґрунтів по бічній поверхні і під вістрям палей до 40 м. Тим часом будівництво висотних будівель і підземних споруд вимагає застосування палей глибшого закладення. Прийнята методика розрахунку несучої здатності палей з максимальною глибиною закладення п'яти палей до 40 м від поверхні планування не дає змоги враховувати підвищення опору по п'яті та бічній поверхні палей на великих глибинах. Значення опорів ґрунтів по бічній поверхні палей і під їхнім нижнім кінцем отримано на основі опрацювання результатів випробувань, виконаних за різноманітними методиками, для палей, занурених у різні ґрунти.

На опір ґрунту по бічній поверхні палей і під її нижнім кінцем впливають характеристики ґрунту (показник плинності I_L , коефіцієнт пористості e), глибини розташування палей від поверхні планування, швидкості бетонування, а також технологія виготовлення палей в ґрунті.

На рис. 1, 2 представлено графіки розрахункових опорів ґрунтів на бічній поверхні палей і їхнім нижнім кінцем залежно від глибини розташування шару Z і показника плинності I_L .

Характер зміни граничного опору ґрунтів на бічній поверхні (рис. 1) і під вістрям палей (рис. 2) залежно від глибини закладення до 40 м і фізичних властивостей ґрунтів і що не дає змоги враховувати підвищення опору на боковій поверхні палей та під її вістрям після 40 м, є актуальним питанням.

Нині існує безліч різних технологій і типів обладнання для влаштування палей. Згідно з нормативами [16-18], буронабивні палей за способом влаштування поділяють на такі типи:

Набивні палей:

набивні, що влаштовуються шляхом занурення (забиванням, вдавленням або загвинчуванням);

набивні віброштамповані;

бурові палей:

бурові суцільного перерізу з розширенням і без них;

бурові за допомогою технології безперервного повного шнека (CFA);

барети (barrette);

бурові з камуфлетною п'ятою;

буроін'єкційні діаметром 0,15...0,35 м;

палей-стовпи;

буроопускні палей з камуфлетною п'ятою.

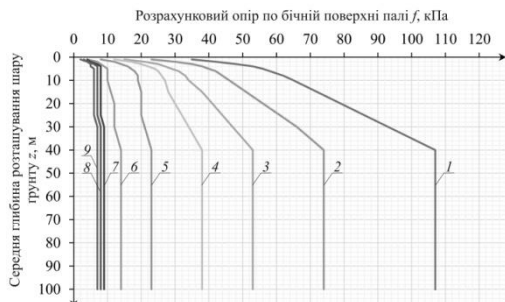


Рис. 1. Залежність розрахункового опору ґрунтів по бічній поверхні палей від глибини розташування шару Z і показника плинності I_L

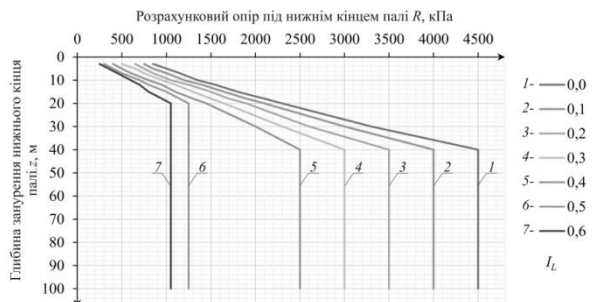


Рис. 2. Залежність розрахункового опору ґрунтів під нижнім кінцем палей від глибини розташування шару Z і показника плинності I_L

У будівельній практиці переважно використовують такі вітчизняні технології виготовлення буронабивних паль: технологія прохідного шнека; технологія глинистого розчину; технологія обсадної труби; технологія "DDS".

У табл. 1 наведені деякі геометричні параметри паль, значення навантажень під час випробувань і ґрунти розташовані під вістрям паль.

Таблиця 1

Геометричні параметри паль, значення навантажень під час випробувань і ґрунти розташовані під вістрям паль

Найменування технології	Діаметр паль D , м	Довжина паль L , м	Максимальне навантаження під час випробуваннях N , кН	Ґрунти розташовані під вістрям паль
Технологія прохідного шнека	до 0,67	до 30	до 3000	глини тверді піски середньої крупності, великі та гравелісти, щільні
Технологія глинистого розчину	до 0,62	до 35	до 3500	
Технологія обсадної труби	до 2,00	до 85	до 136000	
Технологія DDS	до 0,62	до 30	до 4000	суглинки тугопластичні і напівтверді; супіски та глини тверді піски пилюваті та гравелісти, щільні

Технологія прохідного порожнистого шнека (CFA – Continuous Flight Auger) проявила себе з позитивного боку під час застосування в середньодеформованих ґрунтах.

Неврахування тискотропного зменшення водонасичених пилюватоглинистих ґрунтів, що виникає в навколосвайному масиві ґрунту під час влаштування паль за цією технологією, за умови послідовного виготовлення паль без "відпочинку" призводить до істотної перевитрати бетонної суміші (у 2-7 разів). Підвищена витрата бетонної суміші, як правило, має місце, коли в інженерно-геологічному розрізі майданчика присутні значні за товщиною шари плинних, текучепластичних суглинків і супісків із низькими характеристиками міцності.

До переваг цієї технології належать:

- високу продуктивність, яка значно вища за технології влаштування паль з обсадною трубою або під захистом глинистого розчину;
- відносну економічність порівняно з іншими технологіями бурових паль.

До недоліків можна віднести:

- під час роботи в слабких водонасичених ґрунтах на поверхню може вилучатися об'єм ґрунту, що значно перевищує геометричний об'єм свердловини (ефект налипання ґрунту на шнек);
- висока ймовірність утворення дефектів у тілі паль у водонасичених пилюватоглинистих ґрунтах, що сильно деформуються.

Рекомендації щодо влаштування бурових паль за допомогою прохідного шнека:

- технологія влаштування бурових паль може активно використовуватися на невеликих будівельних майданчиках у міських умовах обмежених просторів;

- вона ефективна на складних ґрунтах;

- добре зарекомендувала себе як засіб для посилення основ і фундаментів у разі їхньої перевантаженості або збільшення поверховості споруди;

- у разі точкової забудови, якщо новий об'єкт зводиться на невеликій відстані від уже наявних будівель;

- у випадках, коли потрібно провести реконструкцію старих, зокрема аварійних споруд, що дає змогу уникнути динамічних навантажень, здатних призвести до деформації та руйнування фундаменту;

На рис. 3 представлено технологічну схему влаштування паль за допомогою прохідного шнека.

Технологія обсадної труби полягає в зануренні інвентарної труби з одночасним обертанням і вдавненням. Як правило, товщина стінки труби становить до 40 мм. Колона обсадної труби складається з жорстко закріплених між собою окремих секцій. Ця технологія влаштування паль може бути застосована в ґрунтах, що мають низькі фізико-механічні показники, а також у во-

донасичених ґрунтах. Обсадна труба запобігає неминучому обваленню стінок пробурюваної свердловини, тим самим формуючи чіткі межі майбутньої палі.

До переваг цієї технології можна віднести:

можливість влаштування палі великих геометричних параметрів: довжини і діаметра;

високу несучу здатність палі по ґрунту і за матеріалом порівняно з порожнистим шнеком і глинистим розчином.

До недоліків технології належать:

можливість перебору ґрунту зі свердловини внаслідок ефекту "підсмоктування" слабого водонасиченого ґрунту;

висока вартість порівняно з іншими технологіями бурових палей.

На рис. 4 представлено технологічну схему влаштування палей під захистом обсадної труби.

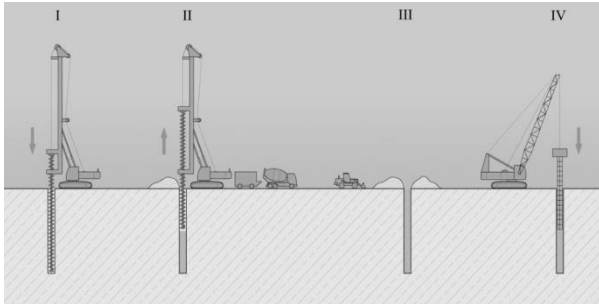


Рис. 3. Технологічна схема влаштування палей прохідним шнеком: I – буріння ґрунту колоною порожнистих шнеків; II – заповнення свердловини бетоном через колону шнеків за допомогою бетононасоса; III – прибирання вибуреного ґрунту з гирла свердловини; IV – установка армокаркаса в свердловину за допомогою віброзанурювача

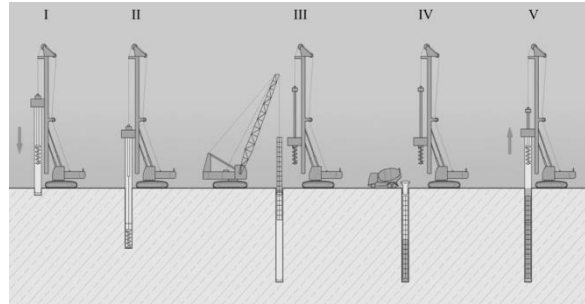


Рис. 4. Технологічна схема влаштування палей під захистом обсадної труби: I – занурення колони обсадних труб у ґрунт; II – витяг ґрунту з обсадної колони; III – занурення армокаркаса в свердловину; IV – заповнення свердловини бетоном; V – вилучення обсадних труб

Технологія виготовлення палей під захистом глинистого розчину широко використовувалася в п'ятдесяті роки минулого століття. Цей метод теоретично обґрунтований у роботах Н. М. Герсванова.

Технологія виготовлення палей під захистом глинистого розчину максимально ефективна в нестійких і водонасичених ґрунтах.

У пробурену свердловину відбувається безперервна подача глинистого розчину, який запобігає обваленню стінок свердловини завдяки великій об'ємній вазі, яку має розчин. За допомогою глинистого розчину створюється надлишковий тиск на будь-якій глибині, внаслідок чого ґрунтовий масив утримується на стінках свердловини.

Щільність глинистого розчину перебуває в діапазоні від 1,15 до 1,30 г/см³.

За такого значення густини глинистий розчин утримує стінки свердловини, додатково створюючи тонкий, але досить стійкий шар. Під час циркуляції потік розчину вимиває розпушені породи на поверхню. Бетонування палей проводиться методом вертикально переміщуваної труби (ВПТ). Під час заповнення свердловини бетонною сумішшю глинистий розчин витісняється висхідною бетонною сумішшю. У процесі бетонування глинистий розчин витісняється по затрубному простору в зону гирла свердловини, після чого відводиться у відстійник по напрямних лотках для очищення і вторинного використання.

До переваг цієї технології можна віднести:

мінімальний вплив виконання робіт на навколишні будівлі в умовах обмеженої міської забудови.

До недоліків технології належать:

необхідність влаштування на будівельному майданчику міні-заводу зі зберіганням, обробкою і подачею бентонітової глини;

забрудненість майданчика бентонітовим шламом;

порівняно висока вартість порівняно з технологією виготовлення палей порожнистим шнеком.

На рис. 5 представлено технологічну схему влаштування палей під захистом глинистого розчину.

Таким чином, вибір технології виготовлення бурових палей слід виконувати залежно від ін-

женерно-геологічних умов і розташування об'єкта відносно навколишньої забудови, водночас необхідно враховувати особливості кожної технології для забезпечення достовірності та достатності обраного варіанта.

Технологія влаштування буронабивних паль ущільнення типу "DDS" (Drilling Displacement System), заснована на принципі розкочування свердловин. Палі влаштовуються без виїмки ґрунту, з ущільненням стінок свердловини, із застосуванням розкачувача.

На рис. 6 представлена технологічна схема влаштування паль типу "DDS".

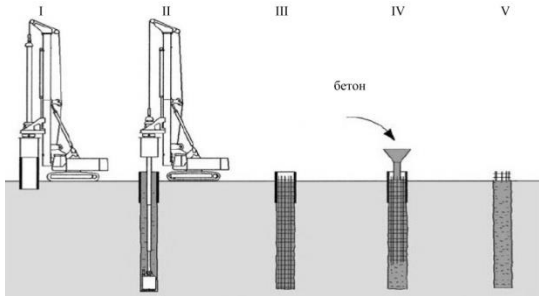


Рис. 5. Технологічна схема влаштування паль під захистом глинистого розчину: I – встановлення кондуктора на контрольну точку; II – буріння під захистом глинистого розчину; III – встановлення арматурного каркаса після очищення свердловини; IV – бетонування палі способом вертикально переміщеної труби (ВІТ); V – витяг кондуктора, готова палі

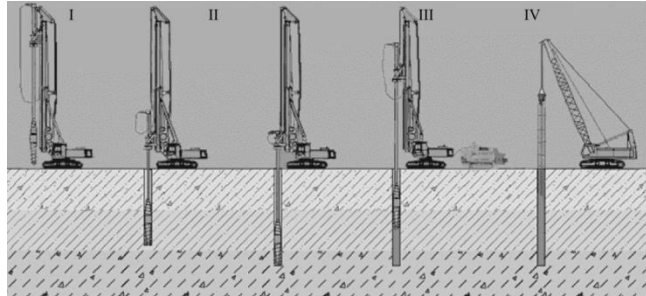


Рис. 6. Технологічна схема влаштування паль DDS: I – установка бурового верстата на точку; II – занурення бурового інструменту із системою ущільнення до проєктної позначки; III – витяг бурового інструменту з одночасним закачуванням бетону; IV - занурення армокаркаса віброзанурювачем за допомогою крана

До переваг цієї технології можна віднести:

- збільшення несучої здатності по бічній поверхні за рахунок ущільнення стінок свердловини (приблизно на 30%);
- високу продуктивність (від 200 до 1200 погонних метрів за зміну);
- відсутність вібрації і шламу під час буріння;
- відсутність перевитрати бетону, оскільки ущільнені стінки свердловини перешкоджають розтіканню бетону.

До недоліків технології належать:

- максимальна довжина обмежена 30 м;
- обмеження під час роботи в щільних ґрунтах.

На рис. 7 представлено графік зміни коефіцієнта переходу бетонної суміші та коефіцієнта питомого збільшення периметра палі залежно від модуля деформації ґрунту.

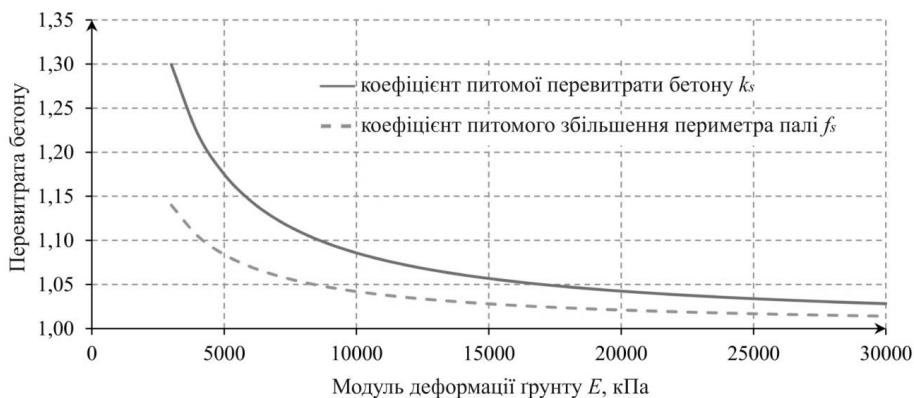


Рис. 7. Графік розподілу коефіцієнтів перевитрати бетону та коефіцієнта питомого збільшення периметра палі залежно від модуля деформації ґрунту

Процес влаштування бурових паль призводить до порушення і руйнування структурних зв'язків у ґрунті, що оточує свердловину, тому витрата бетонної суміші має нерівномірний розподіл по глибині палі. Визначено, що можливе збільшення витрати бетонної суміші до 130%. Це призводить до ущільнення ґрунту навколо свердловини, тому збільшується тертя по бічній

поверхні палі. У процесі влаштування палі здійснювався контроль витрати бетонної суміші в процесі бетонування. Паспорт бетонування палі БНП діаметром 1200 мм наведено на рис. 8.

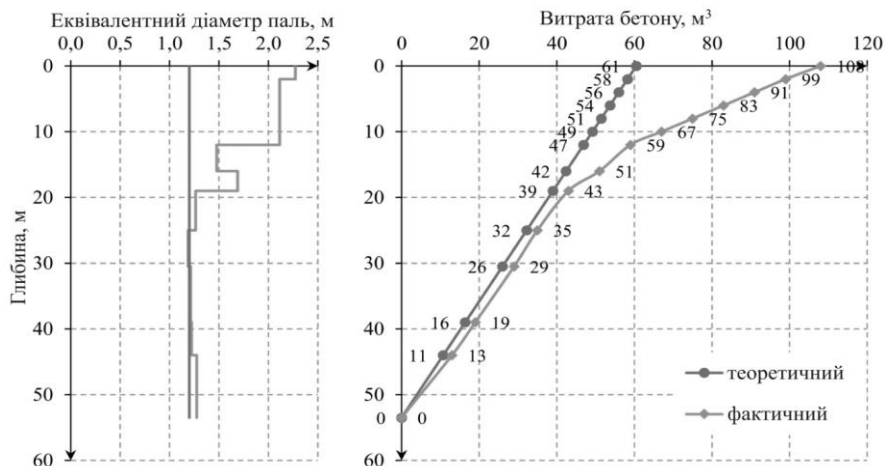


Рис. 8. Графік зміни еквівалентного діаметра палі за глибиною і витрати бетону під час влаштування бурової палі діаметром 1200 мм

Таким чином, обсяг укладеного бетону в захоплення склав: 108 м³. Перевитрата склала 78,58%. Факт значного збільшення витрати бетонної суміші під час бетонування стовбура палі та можливий його нерівномірний і складніший розподіл по глибині палі.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Нині спосіб розрахунку несучої здатності палі за нормативними регламентами дає недостатньо точні результати (занижує несучу здатність за певних інженерно-геологічних умов). Крім того, аналітичний метод розрахунку має суттєве обмеження, оскільки розроблений для палі глибиною занурення до 40 м, що не дає змоги врахувати підвищення опору бічною поверхнею і під вістрям палі, розташованих на більшій глибині. Наведено та проаналізовано послідовність робіт за кожною технологією виготовлення палі, що виготовляються в ґрунті, відображено їхні переваги та недоліки з економічної та технічної точки зору. Показано, що в процесі виготовлення палі на слабких ґрунтах збільшення периметра палі сягнуло 114% під дією тиску бетону під час бетонування і, як наслідок, на слабких ґрунтах можлива перевитрата бетону до 130%. Зроблено оцінку несучої здатності бурових палі, що виготовляються в ґрунті, з урахуванням технології виготовлення та їхнього розташування за глибиною в ґрунтах. Отримано та проаналізовано результати нелінійної екстраполяції опорів ґрунтів залежно від фізичних властивостей ґрунтів на бічній поверхні та під п'ятою бурових палі, що виготовляються в ґрунті.

Напрямок подальших досліджень спрямований з охопленням нових технологій влаштування палі в складних інженерно-геологічних умовах.

Список літератури

1. Взаємодія фундаментних конструкцій і нерівномірно-деформованої основи / Р. О. Тімченко, Д. А. Кришко, Т. А. Марінова, В. А. Ганженко // Вісник КНУ – Кривий Ріг, 2023. – Вип. 56. – С. 174-180.
2. Напружено-деформований стан плитно-пального фундаменту / Р. О. Тімченко, Д. А. Кришко, В. О. Савенко, О. А. Белков, А. І. Гаркуша, А. В. Кокович // Вісник КНУ – Кривий Ріг, 2023. – Вип. 57. – С. 37-42.
3. Применение геоинформационных систем в инженерно-геологических изысканиях / Р. А. Тимченко, Д. А. Кришко, С. О. Попов, М. О. Кравченко, Ю. В. Чугай // 36. науч. ст. "Галузеве машинобудування, будівництво". – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 3 (38). – Т.2. – С. 359-367.
4. Тимченко Р. А., Кришко Д. А. Особенности совместного расчета системы «основание – фундамент – верхнее строение» высотных зданий // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг: КНУ, 2014. – Вип. 36. – С. 117-122.
5. Применение математического моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния системы „основание – фундамент – верхнее строение” в сложных инженерно-геологических условиях / Р. А. Тимченко, Д. А. Кришко, С. О. Попов, А. П. Сухан // 36. науч. ст. "Строительство. Материаловедение. Машиностроение". Серия: Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении. – Дн-ск: ПГАСА, 2014. – Вып. 78. – С. 263-269.
6. Application of new constructive solutions of high buildings' zero cycle during building in difficult engineering and geological conditions / R.A. Timchenko, D.A. Krishko, S.I. Holovko, R. Goodary, A. Aniskin // E3S Web of Conferences. The 3rd International Conference on Sustainable Futures: environmental, technological, social and economic matters Series:

Earth and Environmental Science (ICSF 2022) Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine May 24-27, 2022 – Vol. 1049 (2022) 012032 – DOI:10.1088/1755-1315/1049/1/012032.

7. **Бойко І.П., Сахаров В.О., Сахаров С.О.** Дослідження динамічних властивостей конструкцій системи «основа – фундамент – надземні конструкції» // Основи і фундаменти: Міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2006. – Вип. 30. – С. 147-152.

8. **Boyko I., Sakharov O., Nemchynov Yu.** The peculiarities of stress-strain state at interaction of high-rise buildings and structures with the base // Proc. of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2005. – vol. 2 – pp. 1447-1449.

9. **Романенко О. В., Борзяк О. С., Лютий В. А.** Інженерно-геологічні дослідження для будівництва: навч. посібник. – 2022. – 100 с.

10. **Климчук Л.М., Блінов П.В., Величко В.Ф.** Сучасні інженерно-геологічні умови України як складова безпеки життєдіяльності. – 2008. – 224 с.

11. **Coduto Donald P.** Foundation Design: Principles and Practices. – New Jersey: Prentice Hall, 2001. – 883 p.

12. **Frank R.** Some aspects of soil-structure interaction according to Eurocode 7 «Geotechnical design» // Engenharia Civil. – Vol. 25, 2006. – pp. 5–16.

13. **Tomlinson, M. J., Boorman R.** Foundation design and construction. – Edinburgh: Prentice Hall, 2001. – 583 p.

14. **Hanisch J., Katzenbach R., König G.** Kombinierte Pfahl-Plattengrundungen. Ernst&Sohn. – 2002. – 222 p.

15. **Katzenbach, R., Leppla S.** Combined Pile-Raft Foundations (CPRF) in theory and engineering practice Current developments – 2016. – 64 p.

16. **ДБН В.1.1-45:2017.** Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення – К.: Мінрегіонбуд, 2017. – 35 с.

17. **ДБН В.2.1-10:2018.** Основи і фундаменти будівель та споруд. – К.: Мінрегіонбуд, 2018. – 40 с.

18. **Eurocode 7.** Geotechnical design in european engineering practice. – 1996. – 123 p.

Рукопис подано до редакції 29.03.24

УДК [622.34:622.232]:622.012

І.П. КУШНЕРЬОВ, Ю.Ю. КРИВЕНКО, І.І. МАКСИМОВ,

О.Л. ШЕПЕЛЬ, кандидати техн. наук, доценти, **В.О. КАЛІНІЧЕНКО,** д-р техн.наук, проф,

С.О. ФЕДОРЕНКО, ст. викладач

Криворізький національний університет

ВІДПРАЦОВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНО ЗБЛИЖЕНИХ ПОКЛАДІВ КОРИСНИХ КОПАЛИН

Метою роботи є дослідження та розробка інноваційної технології відпрацювання паралельно зближених покладів, яка забезпечує ефективність очисного виймання корисних копалин, стійкість конструктивних елементів системи розробки та збереженість денної поверхні.

Методи досліджень. Аналіз та узагальнення існуючих технологій виймання зближених плаstopодібних покладів. Конструктивне моделювання елементів системи розробки зближених пластів та порядку їх відпрацювання. Аналітичні дослідження процесу склепінутворення в міжпластовій товщі порід при виїмці нижнього покладу. Для обробки даних та прийняття значень гірничо-геометричних параметрів, які характерні для умов підземної розробки корисних копалин, застосовувались методи математичної статистики.

Наукова новизна полягає в розробці технологічної схеми відпрацювання зближених покладів з зміцненням міжпластової товщі слабких порід шляхом стійкого склепінутворення. Встановлено нові залежності параметрів виймання пластів від товщі порід міжпласта та їх властивостей, розмірів склепінутворення і штучних стрічкових ціликів з породного масиву.

Практична значимість полягає в залученні додаткових запасів до виймання з зближених пластів, підвищенні ефективності і безпеки добування корисних копалин та збереженні об'єктів, що підробляються. Впровадження запропонованої технології дає можливість значно покращити показники вилучення корисних копалин з зближених покладів, зберігати об'єкти інфраструктури та не відчувати родючі землі.

Результати. Виконано аналіз сучасного стану відпрацювання паралельно зближених покладів корисних копалин підземним способом. Досліджені процеси склепінутворення в породах міжпластової товщі. Запропонована оригінальна гофроподібна просторова конструкція з порід міжпласта та штучних ціликів. Розроблена інноваційна технологія відпрацювання паралельно зближених пластів, яка забезпечує ефективність очисного виймання корисних копалин, стійкість конструктивних елементів системи та збереженість денної поверхні. Запропонований порядок визначення параметрів створення гофроподібної просторової підтримуючої конструкції з оточуючих порід в залежності від гірничо-геологічних умов щодо потужностей пластів, товщі порід між ними та їх властивостей, а також технічних характеристик гірничого обладнання, що застосовується. Впровадження результатів досліджень дозволяють вести безпечно та ефективно відпрацювання зближених покладів корисних копалин, збереження денної інфраструктури та невідчуження родючих земель.

Ключові слова: зближені поклади, схема відпрацювання, склепіутворення, гофроподібна підтримуюча конструкція, стійкість.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-56-63

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Зближені поклади корисних копалин при відпрацюванні потерпають значні деформаційні процеси з негативними наслідками щодо стійкості конструктивних елементів системи розробки. Аналогічні фізичні процеси мають місце і при вийманні дуже потужних покладів корисних копалин, які включають прошарки пустих порід великою потужності. Ефективне відпрацювання таких покладів, особливо з незначною потужністю міжпласта та слабкими оточуючими породами, є проблематичним. Мають місце втрати запасів корисних копалин, погіршуються показники вилучення та виникає необхідність відчуження родючих земель і руйнування наземних об'єктів внаслідок активного розвитку деформаційних процесів безпосередньо в покладах та оточуючих породах особливо при незначній потужності порід міжпласта. Тому необхідно розробляти нову надійну та ефективну технологію відпрацювання паралельно зближених пластів з забезпеченням стійкості міжпластової товщі та налягаючих порід на основі досліджень геомеханічних процесів в оточуючому покладі середовищі.

Аналіз досліджень і публікацій. Пошуку та удосконаленню систем розробки вказаних вище родовищ присвячена значна кількість досліджень [1-6]. Вони, як правило, направлені на розробку нових технологічних схем відпрацювання пологих та похилих зближених пластів, удосконаленню існуючих технологій та визначенню ефективних параметрів процесів очисного виймання корисних копалин. Деякі автори робіт [1-4] при незначній товщі порід у міжпласті розглядають паралельно зближені поклади як потужні родовища що містять включення пустих порід. При цьому пропонується технологія щодо їх ефективного способу (селективного чи валового) та порядку виймання запасів у межах поверху чи ярусу. Розглядаються також питання створення штучних споруд для забезпечення стійкості проміжної товщі порід. Але така технологія потребує значного удосконалення щодо виймання запасів за потужністю покладу та взаємопов'язання при цьому його параметрів з технологічною схемою відпрацювання шарів корисних копалин та забезпеченням стійкості оточуючих порід. Виникає велика проблема щодо розташування пустих порід при селективному вийманні дільниць покладу. При валовому відпрацюванні значно погіршуються показники вилучення корисних копалин і в цілому ефективність добування. При цьому незначна кількість літературних джерел присвячена дослідженням розробки саме горизонтальних та похилих покладів. Відома технологічна схема розробки пологих та похилих пластів з нестійкими оточуючими породами [5]. Сутність її полягає у відпрацюванні зближених пластів у взаємно перпендикулярному напрямку і зміцненні масиву оточуючих порід в'язким розчином і ціликів стяжними штангами. Недоліком способу є те, що створення штучних стрічкових ціликів на значну висоту більше міжпластової товщі порід є дуже витратним та не завжди забезпечує їх стійкість, особливо з можливим реологічним деформуванням основної покрівлі до денної поверхні. Необхідно додатково проводити роботи по зміцненню масиву корисних копалин стяжними штангами. Крім цього при деформуванні порід міжпласта не враховується процес склепіутворення.

Відомий також спосіб виймання зближених пластів з нестійкими міжпластовими породами [6]. Технологія включає проведення підготовчих виробок і випереджальне очисне виймання верхнього пласта по відношенню до нижнього з наступним ін'єктуванням породного масиву твердіючими сім'ями. Недоліком є те, що необхідно створювати при виймці верхнього пласта штучні цілики з порід покрівлі шляхом відрізання блоків, що є дуже витратним та небезпечним. Крім цього, неврахування процесу деформування міжпластових порід з утворенням склепіння не дає можливості приймати параметри очисного виймання корисних копалин, які взаємопов'язані з геометричними розмірами міжпластової товщі та властивостями порід. До того ж, створення ціликів шляхом ін'єктування порід без попереднього штучного тріщиноутворення не є ефективним. В роботі [7] розглядаються зближені пласти та наведена послідовна і сумісна технологія відпрацювання вказаних покладів. Але в ній не досліджується геомеханічний процес склепіутворення в товщі порід міжпласта та конструкції підтримки елементів системи розробки для запобігання деформування денної поверхні.

Таким чином існують технологічні схеми відпрацювання складноструктурних та зближених покладів корисних копалин і розроблені пропозиції щодо їх ефективного впровадження. Але відомі технології передбачають великі витрати на вилучення пустих порід та їх транспортування поза межі очисних виймальних одиниць, якщо такий процес передбачено. При збереженні товщі порід між покладами (виймальними одиницями потужного покладу) виникають труднощі по забезпеченню безпечного відпрацювання підробляємих або надробляємих пластів. Крім того дослідження виконані, в основному, стосовно кругоспадних родовищ. При відпрацюванні вказаних родовищ дуже важливим є збереження об'єктів, що підробляються, та невідчуження родючих земель на денній поверхні.

Постановка завдання. Виконаний аналіз та узагальнення наукових робіт показує, що мало досліджень виконано щодо відпрацювання паралельно зближених покладів корисних копалин з різноманітними властивостями порід міжпластової товщі. Дуже мала кількість літературних джерел, які присвячені створенню просторових підземних конструкцій як для підвищення ефективності розробки родовищ, так і по збереженню наземних споруд при їх підробці підземними гірничими роботами. Майже немає досліджень процесів склепінутворення в породах між покладами в результаті їх підробки або, навпаки, надробки. Практика відпрацювання запасів шахтових полів показує, що, особливо на глибоких горизонтах, мають місце великі втрати корисних копалин та зубоження добутої сировини за рахунок примішення пустих порід. В той же час на ринку збуту товарної продукції стали жорсткішими вимоги з її якості. Тому виникає необхідність виконання досліджень та розроблення нової ефективної технології відпрацювання паралельно зближених пластів корисних копалин з забезпеченням стійкості міжпластової товщі та налягаючих порід, що є актуальним в цій галузі.

Для цього в роботі розглядаються наступні задачі досліджень:

аналіз існуючих технологій відпрацювання паралельно зближених пластів та покладів складної будови;

дослідження та розробка ефективної технологічної схеми виймання вказаних покладів;

дослідження та обґрунтування параметрів утворення гофроподібної просторової конструкції підтримки стійкого стану оточуючих пласти порід.

Викладення матеріалів та результати. Поставлені задачі вирішуються за рахунок того, що нова технологія виймання зближених пластів під об'єктами, що зберігаються, включає відпрацювання зближених пластів у взаємо перпендикулярному напрямку з випередженням верхнього по відношенню до нижнього з підготовкою нестійкої міжпластової товщі порід шляхом стійкого склепінутворення. Розміри конструктивних елементів створеної просторової конструкції визначаються параметрами відпрацювання пластів, міжпластовою товщею порід, їх властивостями та створенням штучних стрічкових ціликів, їх омоноличуванням та породного масиву.

Технологія передбачає наступне. На верхньому пласті попереду очисного вибою проходяться розрізні виробки, вибурюються з них низхідні похилі свердловини у проєктні контури формування на нижньому пласті стрічкових ціликів визначеної висоти і відстані між ними. Останні утворюються шляхом ін'єктування з вказаних свердловин трішиноспотвореного масиву порід його торпедуванням розосередженими зарядами свердловин з підготовчих виробок нижнього пласта. У межах міжпластової товщі порід над проєктними контурами склепінь створюється стійка гофроподібна просторова конструкція додатковим насиченням під тиском з свердловин верхнього пласта твердіючих сумішів. Вказане підвищує запас стійкості конструктивних елементів системи. Виконується відпрацювання верхнього пласта з наступним утворенням штучних ціликів з розрізних виробок шляхом їх заповнення закладним матеріалом з формуванням стійких склепінутворень в породах безпосередньої покрівлі. З відставанням перпендикулярно до верхнього відпрацьовується нижній пласт з утворенням стійких склепінь у міжпластовій товщі порід до контурів гофроподібної просторової конструкції. При цьому відпрацювання нижнього пласта виконується взаємопов'язано з висотою стійкого склепіння з урахуванням потужності міжпластової товщі порід, їх властивостей та створених стрічкових ціликів.

Технічний результат від реалізації вказаної технологічної схеми полягає у тому, що враховується процес деформування міжпластових порід з утворенням склепіння, та забезпечується

можливість визначення параметрів технології видобутку корисних копалин з урахуванням геометричних розмірів міжпластової товщі та властивостей гірських порід.

Спосіб ілюструється схемами, де на рис. 1а представлений вертикальний розріз по I-I зближених покладів корисних копалин з їх відпрацюванням, керованим утворенням ціликів та склепів, свердловинами для насичення масиву порід для створення гофropодібної просторової конструкції; на рис. 1б – розріз по II-II у площині нижнього пласта з підготовчими виробками, стрічковими ціликами та проєкціями свердловин для нагнітання твердіючих розчинів; на рис. 1в – розріз по III-III з штучними ціликами та свердловинами для омонолічування масиву порід міжпласта; на рис. 1г – розріз по IV-IV з підготовчими виробками та свердловинами для торпедування масиву.

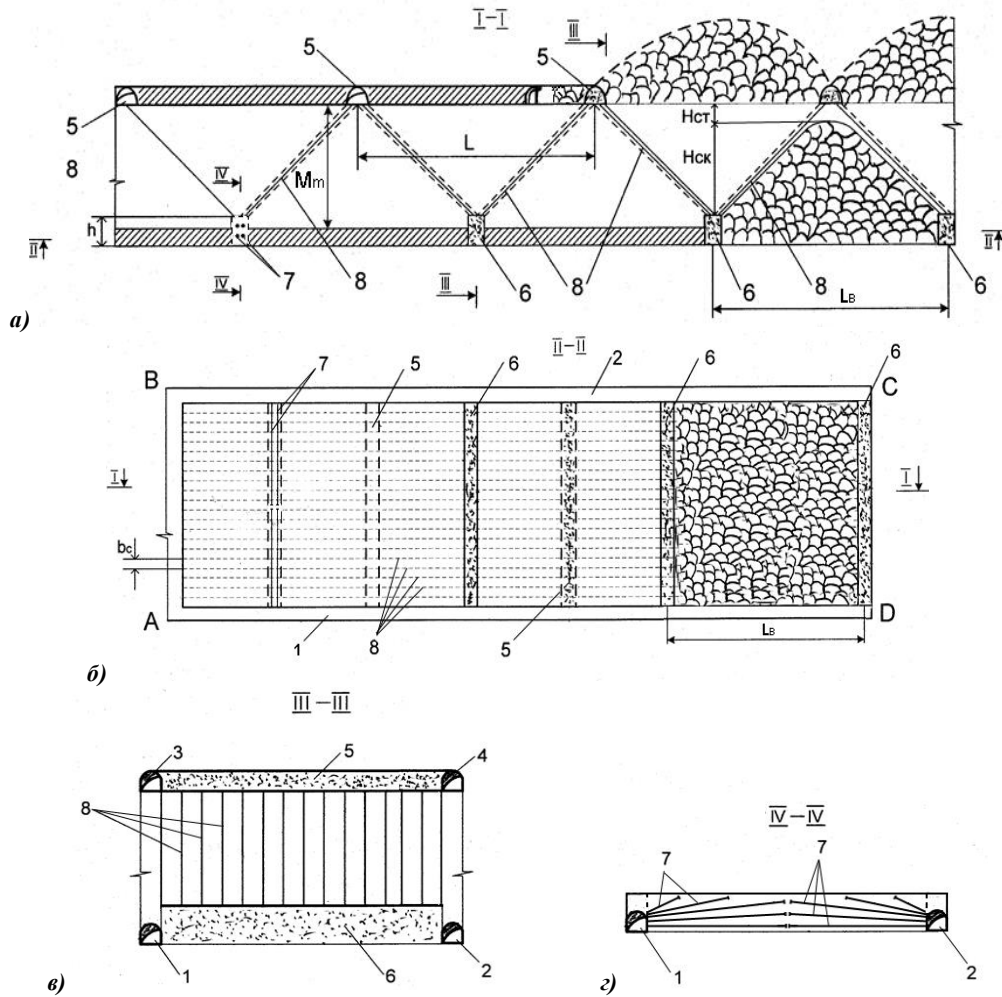


Рис. 1. Технологічна схема відпрацювання зближених пластів корисних копалин: а - вертикальний розріз по I-I з порядком відпрацювання пластів, утворенням ціликів та склепів, свердловинами для насичення масиву порід для створення гофropодібної просторової конструкції; б - розріз по II-II у площині нижнього пласта з підготовчими виробками, стрічковими ціликами та проєкціями свердловин для нагнітання твердіючих розчинів; в - розріз по III-III з штучними ціликами та свердловинами для омонолічування масиву порід міжпласта; г - розріз по IV-IV з підготовчими виробками та свердловинами для торпедування масиву; 1, 2 – відповідно транспортний та вентиляційний штреки на нижньому пласті; 3, 4 – те ж на верхньому; 5 – технологічні виробки; 6 – штучні стрічкові цілики; 7 – свердловини для торпедування масиву; 8 – свердловини для омонолічування породного масиву

Технологічна схема розробки зближених покладів передбачає таку послідовність. Зближені пласти відпрацьовуються у взаємно перпендикулярному напрямку з випередженням верхнього по відношенню до нижнього. Родовище поділяють на виїмкові поля ABCD (рис. 1б) за протяганням розмірами в залежності від технологічних параметрів його відпрацювання. Для підготовки виїмкового поля проводять транспортний 1 та вентиляційний 2 штреки на нижньому пласті та відповідно 3, 4 – на верхньому (рис. 1б, 1в), технологічні штреки 5 на верхньому, інші основні та допоміжні виробки (на схемах не вказані). Очисне виїмання запасів корисних копа-

лин виконується стовповими системами розробки з керуванням покрівлею порід повним обваленням. Причому, воно виконується у контурах стійкого склепу між виробками 5 (в подальшому штучних ціликів в цих виробках) на верхньому пласті та регламентованим обваленням у межах стійкого склепіння на нижньому. Його можливо визначити з урахуванням параметрів відпрацювання нижнього пласта, міжпластової товщі порід, їх властивостей та створених стрічкових ціликів та згідно теоретичних положень, які приведені в роботі [8], м

$$H_{\text{ск}} \leq M_m - H_{\text{ст}}; \quad (1)$$

$$H_{\text{ск}} = \left[L_b / 2 + h \cdot \text{ctg}(45^\circ + \varphi/2) \right] / \text{tg} \varphi, \quad (2)$$

де M_m – потужність порід міжпласта, м; $H_{\text{ст}}$ – потужність довготривалої стелини, м; L_b – ширина виймання (довжина лави) на нижньому пласті, м; h – висота штучного стрічкового цілика, м; φ – кут внутрішнього тертя, град.; $\text{tg} \varphi = (R_{\text{cm}} - R_p) / (R_{\text{cm}} + R_p)$, де R_{cm} , R_p відповідно міцність порід на стиск та розтягування, МПа.

Розміри стрічкових ціликів 6 впливають на висоту склепіння і визначаються в залежності від потужності міжпластової товщі порід та взаємопов'язані з очисною виїмкою на нижньому пласті. У контурах цих ціликів з виробок 1 та 2 вибураються свердловини 7 та розосередженими запобіжними зарядами вибухових речовин проводиться торпедування масиву порід для наступного його ін'єктування.

При відпрацюванні верхнього пласта з технологічних виробок 5 у контури стрічкових ціликів 6 вибураються похилі свердловини 8 та через них з вказаних виробок нагнітаються твердіючі суміші. Через визначений час над проєктним контуром майбутнього склепіння під тиском омонолічується приконтурний до свердловин 8 породний масив міжпласта.

Відстань b_c між свердловинами 8 (рис. 1б) визначається можливістю насичення порід. Технологічні виробки 5 по мірі відпрацювання верхнього пласта заповнюють твердіючим матеріалом. Відстань між ними L приймається за умов створення у межах безпосередньої покрівлі порід верхнього пласта склепіння стійкої рівноваги. Таким чином організовується стійка гофроподібна просторова конструкція з стійкого склепіння, штучних ціликів, омоноліченого приконтурного до склепу масиву та стійкої стелини, що надає можливість безпечному вийманню зближених пластів та збереженню денної поверхні. З відставанням у часі та просторі по мірі набуття конструктивними елементами просторовою спорудою необхідних по стійкості властивостей відпрацьовується нижній пласт з попередньо встановленими параметрами виймання (довжина лави, ширина смуги). Це важливо для запроєктованих параметрів вказаної несучої конструкції у міжпластовій товщі порід. Ширина смуги очисного виймання нижнього пласта L_b у взаємоперпендикулярному напрямку по відношенню до верхнього пласта приймається згідно розрахунків таким чином, щоб стійке склепіння порід міжпласта при цьому локалізувалось у межах створеної просторової несучої споруди.

Виконаємо дослідження щодо параметрів представленої технологічної схеми відпрацювання паралельно зближених пластів та утворення гофроподібної несучої просторової конструкції в проміжній товщі порід. Щодо перебігу статистичних гірничо-геологічних даних при виконанні математичних розрахунків користувались методами, які приведені в роботі [9].

Висота стійкого склепіння $H_{\text{ст}}$ не може перевищувати потужність порід між пластами M_m з урахуванням довгостійкої стелини $H_{\text{ст}}$. Вона залежить від ширини смуги (довжини лави) очисного виймання нижнього пласта L_b , висоти стрічкового цілика h та властивостей товщі порід між покладами. Дослідженнями [8,10,11] встановлено, що для скельних та напівскельних порід кут внутрішнього тертя φ дорівнює 35° - 41° ; для вапняків, кристалічних сланців, кварцових напівзернистих пісків $\varphi = 30 - 35^\circ$; для глин і суглинків $\varphi = 25 - 30^\circ$; для піщано-слядяних та каолінових жирних глин $\varphi = 15 - 25^\circ$. Для розрахунків приймаємо найбільш презентабельні для розглядаємих умов значення $\varphi = 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ$. Тоді коефіцієнт внутрішнього тертя $\text{tg} \varphi$ дорівнює відповідно 0,36; 0,58; 0,84, а $\text{ctg}(45^\circ + \varphi/2)$ - відповідно 0,70; 0,58; 0,47. Аналізом встановлено, що значення $\text{tg} \varphi$ з ростом кута збільшується в 2,3 рази, а $\text{ctg}(45^\circ + \varphi/2)$, навпа-

ки, зменшується в 1,5 рази. Великий розбіг значень коефіцієнтів вказує на можливий значний вплив кута внутрішнього тертя порід на висоту стійкого склепіння згідно формули (2). Виникає необхідність у виконанні досліджень щодо визначення впливу і інших важливих складових технологічного ланцюга безпечного відпрацювання паралельно зближених покладів з утворенням підтримуючої конструкції.

Для зручного виконання розрахунків перетворимо формулу (2) у вирази (3) та (4), м

$$H_{\text{ск}} = (1/2 \cdot \text{tg } \varphi) \cdot L_{\text{в}} + [\text{ctg}(45^\circ + \varphi/2) / \text{tg } \varphi] \cdot h; \quad (3)$$

$$H_{\text{ск}} = (1/2 \cdot \text{tg } \varphi) \cdot L_{\text{в}} + (1/\sin \varphi - 1) \cdot h. \quad (4)$$

В наших дослідженнях при прийнятті конструктивних елементів системи розробки на стадії проектування необхідно виконувати диференційний підхід з урахуванням потужності порід міжпласта, їх властивостей, параметрів виймання нижнього пласта та висоти штучного цілика.

Проаналізуємо взаємозв'язок між шириною відпрацювання нижнього пласта та висотою штучного стрічкового цілика при заданому $H_{\text{ск}} = \text{const}$.

Перетворимо вираз (3) у вигляд, м

$$L_{\text{в}} = 2 \cdot \text{tg } \varphi \cdot H_{\text{ск}} - 2 \cdot \text{ctg}(45^\circ + \varphi/2) \cdot h. \quad (5)$$

Проаналізуємо рівняння (5) та виконаємо дослідження по визначенню параметра очисного вибою з урахуванням діапазону складових коефіцієнтів внутрішнього тертя порід міжпластової товщі та висоти стрічкового цілика. При цьому для прикладу візьмемо потужність товщі порід $M_{\text{т}}$ складає 30м, потужність стелини $H_{\text{ст}}$ -5м, а висота склепіння $H_{\text{ск}}$ -25м. Результати представимо у графічному вигляді на рис. 2.

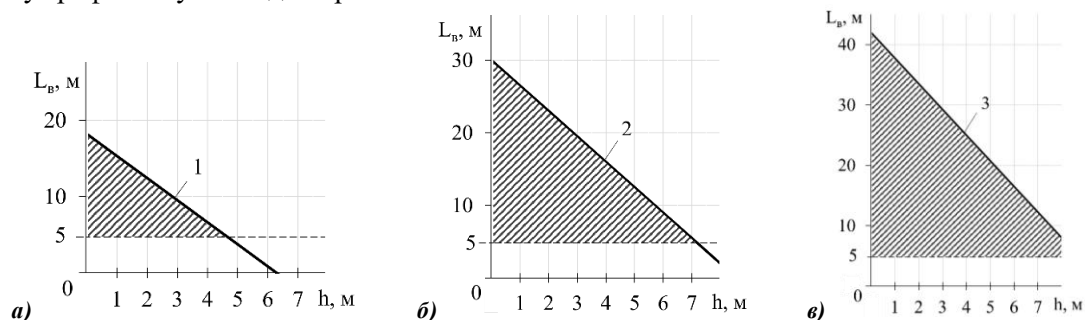


Рис. 2. Залежність ширини очисного виймання на нижньому пласті від висоти штучного стрічкового цілика при різних властивостях порід міжпласта та області можливих значень технологічних параметрів $L_{\text{в}}$ та h : 1,2,3 – відповідно при $\varphi = 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ$

Проаналізуємо результати досліджень. Графіки залежності ширини виймання смуг (довжини очисного вибою - лави) від висоти цілика наведені при різних кутах внутрішнього тертя для вказаного вище прикладу. Встановлено, що з збільшенням висоти штучних ціликів необхідно зменшувати ширину очисного вибою для досягнення заданих параметрів стійкого склепіння. Причому його розміри, в свою чергу, регламентуються потужностями міжпластової товщі порід та стелини і стійкістю порід. Штучні цілики є одним із конструктивних елементів гофроподібної підтримуючої конструкції і служать для «опирання» на них контурів склепу, який створюється. З графіків також видно, що при меншій стійкості порід виникає необхідність корегувати параметри очисного виймання в сторону їх зменшення. Наприклад, при висоті цілика висотою 2м при $\varphi = 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ$ необхідно приймати ширину вибою на нижньому пласті величиною відповідно 12, 22 та 33м. Згідно рис. 2в (пряма 3) ширина смуги виймання $L_{\text{в}}$ не може перевищувати 42 м і зменшується до 7,6 м при збільшенні висоти цілика до 8 м.

На наш погляд, треба також враховувати той факт, що висоту цілика не слід приймати меншою потужності пласта, що виймається. Таким чином, у відповідності з гірничо-геологічними даними щодо потужностей пластів, товщі порід між ними та їх властивостей, а також технічних характеристик гірничого обладнання, що застосовується, виконані дослідження дозволяють вести безпечно та ефективно відпрацювання покладів корисних копалин.

З приведених графіків також видно, що для $\varphi = 30^\circ$ при інших рівних умовах L_B не може перевищувати 29 м. Якщо задати обмеження, що ширина виймання смуг (визначається параметрами технології виймання та конструкцією забезпечення стійкого стану елементів системи) не може бути меншою, наприклад, 20 м, то висота цілика при цьому не може перевищувати 3 м. Ще більші обмеження стосуються для $\varphi = 20^\circ$. В цьому випадку L_B не може перевищувати 18,2 м і значно зменшується при $h = 6,3$ м. Наведені на рис. 2 графіки можуть визначати області можливих значень технологічних параметрів L_B та h , для яких висота стійкого склепіння не може перевищувати 25 м (заштриховані області на рис. 2а, 2б, 2в відповідно для $\varphi = 20^\circ; 30^\circ; 40^\circ$). Вони визначаються системою нерівностей

$$\begin{cases} L_B \leq 2 \cdot \operatorname{tg} \varphi \cdot H_{\text{ск}} - 2 \cdot \operatorname{ctg} (45^\circ - \varphi/2) \cdot h \\ L_B \geq L_{\min} \\ h \geq 0 \end{cases}, \quad (6)$$

де L_{\min} – мінімально можлива ширина виймання смуг для технології, що застосовується.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Зближені поклади корисних копалин при відпрацюванні та оточуючі їх породи активно набувають значних деформаційних процесів з негативними наслідками щодо стійкості конструктивних елементів системи розробки. Для запобігання цим явищам нами розроблена інноваційна технологія відпрацювання паралельно зближених пластів, яка забезпечує ефективність очисного виймання корисних копалин, стійкість конструктивних елементів системи та збереженість денної поверхні. Це можливо за рахунок створеної гофроподібної просторової підтримуючої конструкції з оточуючих порід міжпластя. Досліджено та запропоновано порядок визначення параметрів в залежності від гірничо-геологічних даних щодо потужностей пластів, товщі порід між ними та їх властивостей, а також технічних характеристик гірничого обладнання, що застосовується. Впровадження результатів досліджень дозволяють вести безпечно та ефективно відпрацювання зближених покладів корисних копалин, збереження денної інфраструктури та невідчуження родючих земель. Подальші дослідження направлені на удосконалення технологічних схем відпрацювання запасів паралельно зближених покладів корисних копалин на глибоких горизонтах шахт, встановлення раціональних співвідношень геометричних розмірів конструктивних елементів системи розробки з типорозмірами виймальної техніки та проявами гірського тиску.

Список літератури

1. Дослідження стійкості оголень камерних систем розробки при відпрацюванні складноструктурних покладів залізних руд Криворізького басейну/ Маланчук З.Р., Ступнік М.І., Федько М.Б., Письменний С.В., Колосов В.О., Курносов С.А. // Вісник національного університету водного господарства та природокристування. – 2018. – Вип. 3(83). – С. 162-172.
2. Повышение качества горной массы при отработке сложноструктурных залежей Криворожского бассейна подземным способом / Ступник Н.И., Письменный С.В. // Качество минерального сырья. Сборник научных трудов. – Кривой Рог, 2014. – С. 22-26.
3. Спосіб розробки крутоспадних рудних тіл, що містять включення пустих порід : пат. 37982А Україна. МПК: E21C 41/16; опубл. 15.05.2001, Бюл. №4. 6 с.
4. Спосіб селективного відпрацювання крутоспадних рудних покладів, що містять включення пустих порід : пат. на кор. мод. 152010U Україна. МПК: E21C 41/00; опубл. 12.10.2022, Бюл. №41. 4 с.
5. Спосіб розробки пологих та похилих зближених пластів корисних копалин з нестійкими оточуючими породами : пат. 52164А Україна. МПК: E21C 41/18; опубл. 16.12.2002, Бюл. №12. 3 с.
6. Спосіб виймання зближених пластів з нестійкими міжпластовими породами : пат. 52198А Україна. МПК: E21C 41/00; опубл. 16.12.2002, Бюл. №12. 2 с.
7. Дорохов Д.В., Сивошін В.І., Подтикалов О.С. Технологія підземної розробки пластових родовищ корисних копалин: Підручник для ВНЗ. Частина II / Під заг. ред. Д.В. Дорохова. – 2-е вид., перероб., доповн. та перекл. – Донецьк: ДонНТУ, 2004. – 266 с.: іл.
8. Шехурдин А.К. Задачник по горным работам, проведению и креплению горных выработок: Учебное пособие для техникумов. – М.: Недра, 1985. – 240 с.
9. Рыжов П.А. Математическая статистика в горном деле. – М.: Высшая школа, 1973. – 287 стр.
10. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород. – М.: Недра, 1978. – 390 с.
11. Мельников Н.В. Краткий справочник по открытым горным работам. – М.: Недра, 1982. – 414 с.

Рукопис подано до редакції 18.03.24

ПОШУК ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ ДЛЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЗІ КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЄЮ РОЗРАХУНКІВ У ТАБЛИЧНОМУ ПРОЦЕСОРІ

Мета роботи полягає у розробці універсального шаблону в табличному процесорі для пошуку оптимального розмірного налаштування металорізального верстата для мінімізації кількості виробничого браку у партії деталей.

Методи дослідження. Вибірка зі ста розмірів навання вибраних деталей із партії отримана емпірично шляхом проведення технічних вимірювань. Обчислення оптимального зміщення верстата виконано аналітичним способом зі застосуванням функцій та цифрових інструментів табличного процесору із метою комп'ютеризації та автоматизації розрахунків. Використані елементи математичної теорії оптимізації для складання цільової функції і формул для розрахунку оптимального зміщення.

Наукова новизна полягає у пошуку, визначенні, тестуванні та налагодженні роботи функцій та цифрових засобів візуалізації розрахунку табличного процесора з метою розробки універсальної таблиці для автоматизованого розрахунку оптимального розмірного зміщення металорізального обладнання, кількості виправного та невиправного виробничого браку і витрат на його усунення.

Практична значимість. В основі інженерної діяльності лежить процес оптимізації, як основний інструмент створення нових і вдосконалення вже розроблених технічних систем. Проблема полягає у відсутності комплексного підходу до вирішення оптимізаційних задач і демонстрації прикладів застосування теоретичного матеріалу у виробничому процесі. Висока практична значимість створеного шаблону полягає у значному скороченні часу на усунення виправного браку за рахунок його скорочення, зменшенні виробничих витрат, високому ступеню автоматизації розрахунків, відсутності необхідності придбання спеціалізованого програмного забезпечення та найму висококваліфікованого персоналу.

Формалізація та структуризація такого підходу до вирішення оптимізаційних завдань дозволить використовувати створені алгоритми для широкого спектра різних галузей виробництва, що посприє зміцненню економіки держави.

Результати. Отримана таблиця, яка після заповнення вибірки, граничних розмірів деталі за кресленням і витрат на 1% виправного і невиправного браку автоматично розраховує величину оптимального зміщення центру угруповання вибірки від центру поля допуску, кількість виробничого браку і вартість на його усунення.

Ключові слова. Оптимізація, виробничий брак, налаштування верстата, витрати, автоматизація розрахунків, прибутковість виробництва, машинобудування, технологічний процес.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-63-68

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Основною метою кожного ремонтного або виробничого підприємства є отримання максимального прибутку з одночасною мінімізацією витрат на виготовлення продукції, що в свою чергу дозволить підвищити конкурентоспроможність за рахунок підвищення якості готової продукції, своєчасного оновлення металорізального обладнання та верстатного оснащення, ріжучого та вимірювального інструменту, підвищення кваліфікації працівників і покращення умов праці, впровадження інноваційних технологій у виробничий процес.

Ключова проблема полягає у відсутності комплексного формалізованого підходу до пошуку оптимальних технічних рішень для підвищення прибутковості підприємства в умовах невизначеності виробничого процесу. Розв'язок вищезазначеної проблеми можливий за рахунок застосування математичної теорії оптимізації. Формалізація та структуризація такого підходу дозволить використовувати створені алгоритми для широкого спектра різних галузей виробництва, що посприє зміцненню економіки держави.

Також важливо знайти способи максимальної комп'ютеризації процесу розрахунків за рахунок використання інформаційних технологій. Це дозволить виключити людський фактор з окремих ланок розробки і реалізації технологічного процесу (ТП), збільшити потужність і прибутковість виробництва. Отже, наступна проблема полягає у пошуку загально доступного програмного забезпечення (ПЗ) для реалізації запропонованого у даній роботі підходу.

Процес оптимізації лежить в основі всієї інженерної діяльності, оскільки існує необхідність проектування нових інноваційних технічних систем (ТС) і одночасного покращення якості вже існуючих.

Одним з найбільш доцільних способів зниження витрат є зменшення виробничого браку. Але розрахувати заздалегідь, який відсоток бракованих деталей очікується, неможливо через невизначеність ТС. Цей показник є випадковим і залежить від різних факторів, деякі з яких не піддаються прогнозуванню (людський фактор, коливання температури, пружні віджимання елементів системи ВПД, інші випадкові похибки). Тому інженерам-технологам приходится приймати конкретні технічні рішення в умовах невизначеності, що вимагає створення структурованого підходу до вирішення поставлених завдань.

Аналіз досліджень і публікацій. Дана праця є продовженням роботи [1] над реалізацією практичного застосування створеного шаблону для розрахунку статистики емпіричної вибірки із ста розмірів навмання вибраних деталей із партії.

В роботі [2] проведено оптимізацію витрат за рахунок пошуку раціональної стратегії керування обмеженими виробничими ресурсами на прикладі ТП виготовлення відцентрових насосів. Запропоновано два методи лінійного програмування – матричний та графічний. Для комп'ютеризації розрахунків використано спеціальне інженерне математичне ПЗ MathCAD.

Дослідження з пошуку шляхів оптимізації технічних систем у інженерних галузях проводяться за багатьма напрямками. У роботах [3, 4] комплексно аналізуються ланцюги поставки з оцінкою всього життєвого циклу виробів. У якості технічної системи розглядається підприємство загалом, а не окремі його складові.

Розглядається скорочення кількості використовуваних ресурсів за рахунок оптимізації топології виробів [5, 6], технології виготовлення матеріалів [7], технологічного процесу механічної обробки деталей [8]. Широко досліджуються можливості застосування імітаційного моделювання [9] та штучного інтелекту [10].

Загальною проблемою є те, що в наявній технічній літературі задачі оптимізації технічних систем носять спеціальний характер. Майже відсутні сучасні літературні джерела, які викладають теорію та практику оптимізації на системній основі та показують область доцільного використання різних підходів вирішення поставлених оптимізаційних завдань.

Постановка задачі. Є певним чином налаштований верстат, який оброблює певну поверхню деталі. Відомо тип оброблюваної поверхні, розмір із допуском по кресленню. Дано вибірку зі ста розмірів L_i знятих із випадкових деталей партії, собівартість доопрацювання 1% деталей із виправним браком ϕ_1 , собівартість 1% деталей невивиправно бракованих деталей ϕ_2 . Необхідно оптимізувати витрати на брак за рахунок переналаштування верстата, знайти величину ϵ , на яку зміщується середнє значення вибірки від середини інтервалу допуску.

Викладення матеріалу та результати. Проектування технічних систем – багатоетапний та багаторівневий процес, що вимагає обробки великої кількості даних. Систематична розробка технічних рішень можлива за рахунок використання математичної теорії оптимізації.

У широкому розумінні теорія оптимізації являє собою сукупність математичних методів, спрямованих на пошук найкращих (оптимальних) результатів з множини можливих варіантів. В першу чергу необхідно визначитись з видом та складовими елементами технічної системи.

Технічна система – це сукупність елементів та взаємозв'язків між ними, які створюють цілісну структуру об'єкту. У якості технічної системи в даній роботі розглядається технологічний процес виготовлення партії деталей, як основна частина виробничого процесу. Основні складові елементи технічної системи зображено на рис. 1.



Рис. 1. Складові технічної системи

Всі технологічні операції характеризуються техніко-економічними показниками, екологічністю, енергетичними витратами. Скорочення виробничих витрат можливо за рахунок ретельного аналізу кожної складової технічної системи з метою пошуку оптимальних технічних рішень. Деякі складові можна змінювати в певному діапазоні через наявні обмеження за тех-

нічними вимогами до виготовлюваної деталі (точність розмірів та якість поверхневого шару, механічні характеристики матеріалу, конфігурація, умови роботи тощо), наявними фінансовими, матеріальними та часовими ресурсами, рівнем технічної підготовки виробництва.

Наступним кроком необхідно скласти цільову функцію. Особливостями складання цільової функції для задачі пошуку оптимуму в умовах невизначеності у порівнянні зі складанням цільової функції для задачі із повністю визначеними даними є те, що у реальних умовах заздалегідь не завжди можна визначити значення кількісних показників, часто вони є випадковими. Тому цільова функція складається з використанням теорії ймовірності та методів математичної статистики, такими як математичне очікування, дисперсія, середньоквадратичне відхилення, закони розподілу випадкових величин тощо.

В загальному випадку вірогідність отримання браку обчислюється за формулою (1)

$$P = \frac{m}{n}, \quad (1)$$

де m – кількість бракованих деталей, n – загальна кількість отриманих деталей в партії.

Сформулюємо задачу у вигляді цільової функції. Нехай необхідно знайти таку величину зміщення групування розмірів від середини поля допуску, при якій технологічна собівартість операції буде мінімальна (2)

$$C = \varphi_1 p_1 + \varphi_2 p_2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

де $\varphi_1 p_1$ – вартість виправлення і ймовірність виправного браку відповідно, $\varphi_2 p_2$ – витрати і ймовірність невиправного браку відповідно.

Ймовірність отримання браку P визначається як площа заштрихованої фігури, обмеженої кривою нормального розподілу та прямими, що визначають межі допуску розміру (рис. 2).

Загальна формула для знаходження ймовірності браку (3)

$$P_i = \Phi(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t e^{-\frac{t_i^2}{2}} dt_i, \quad (3)$$

де t – нормований параметр розподілу (коефіцієнт ризику).

Коефіцієнт ризику виправного і невиправного браку для зовнішніх поверхонь визначається за формулами (4, 5) відповідно

$$t_1 = \frac{0,5T + \varepsilon}{\sigma}, \quad (4)$$

$$t_2 = \frac{0,5T - \varepsilon}{\sigma}, \quad (5)$$

де ε – зміщення центра угруповання вибірки від середини інтервалу допуску, T – допуск розміру за кресленням.

Тоді цільова функція приймає наступний вид

$$C = \Phi\left(\frac{0,5T + \varepsilon}{\sigma}\right) \varphi_1 + \Phi\left(\frac{0,5T - \varepsilon}{\sigma}\right) \varphi_2,$$

де $0 \leq \varepsilon \leq \frac{T}{2}$.

Визначимо похідну цільової функції, яку необхідно прирівняти до нуля

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = \frac{d\Phi\left(\frac{0,5T + \varepsilon}{\sigma}\right)}{d\varepsilon} \varphi_1 + \frac{d\Phi\left(\frac{0,5T - \varepsilon}{\sigma}\right)}{d\varepsilon} \varphi_2 = 0.$$

Так як

$$\frac{d\Phi(t)}{d\varepsilon} = \frac{d\Phi(t)}{dt} \frac{dt}{d\varepsilon},$$

то отримуємо

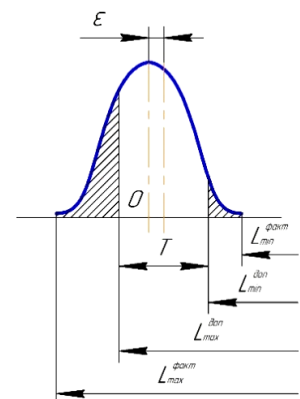


Рис. 2. Крива нормального розподілу Гауса при несиметричному розташуванні поля допуску

$$\frac{dF}{d\varepsilon} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left(\exp\left(\frac{(0,5T + \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right) \varphi_1 - \exp\left(\frac{(0,5T - \varepsilon)^2}{2\sigma^2}\right) \varphi_2 \right) = 0,$$

$$\ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{(0,5T + \varepsilon)^2 - (0,5T - \varepsilon)^2}{2\sigma^2},$$

$$\ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1} = \frac{2\varepsilon T}{2\sigma^2}.$$

Отже, оптимальне зміщення для зовнішніх та внутрішніх поверхонь розраховується за формулами (6, 7) відповідно

$$\varepsilon_{\text{опт.зовн.}} = \frac{\sigma^2}{T} \ln \frac{\varphi_2}{\varphi_1}, \quad (6)$$

$$\varepsilon_{\text{опт.внутр.}} = \frac{\sigma^2}{T} \ln \frac{\varphi_1}{\varphi_2}, \quad (7)$$

Розробимо шаблон документа у табличному редакторі для комп'ютеризації розрахунків (рис. 3, 4).

Фактичне зміщення $\varepsilon = 0,88$ мкм відрізняється від оптимального $\varepsilon_{\text{опт}} = -1,54$ мкм і загальні витрати на брак складають 820,2 грн. На розраховану величину необхідно налаштувати верстат, після чого повторно обробити партію деталей зі 100 шт. з вимірюванням розміру кожної.

Зовнішній діаметр деталі по кресленню		
Вибірка	Статистичні дані вибірки	Вимоги до деталі по кресленню
11.996	Мінімум вибірки	Мінімальний розмір
11.996	11.996	11.995
11.996	Максимум вибірки	Максимальний розмір
11.996	12.006	12.006
11.997	Розмах вибірки	Допуск
11.997	0,01	0,011
11.997	Кількість елементів вибірки	
11.997	100	
11.997	Середнє арифметичне	Середній розмір
11.998	12.00138	12.00050
11.998	Відхилення σ	Зміщення ε , мкм
11.998	0,003	0.88000
11.998	Сер.арифм.-3 σ	Собівартість 1% виправлення деталей
11.998	11,993	20
11.998	Ліворуч значення вибірки вкладаються у -3 σ	Собівартість 1% невиправних деталей
11.998	Сер.арифм.+3 σ	170
11.999	12.010	
11.999	Праворуч значення вибірки вкладаються у +3 σ	Оптимальне зміщення ε , мкм
11.999		-1,504
11.999	Кількість інтервалів	
11.999	9	
11.999	Ширини інтервалів	
11.999	0,002	

а

A	B	C
1 Зовнішній діаметр деталі по кресленню		
2	Вибірка	Статистичні дані вибірки
3	11.996	Мінімум вибірки
4	11.996	=MIN(A3:A102)
5	11.996	Максимум вибірки
6	11.996	=MAX(A3:A102)
7	11.997	Розмах вибірки
8	11.997	=B6-B4
9	11.997	Кількість елементів вибірки
10	11.997	=COUNT(A3:A102)
11	11.997	Середнє арифметичне
12	11.998	=AVERAGE(A3:A102)
13	11.998	Відхилення σ
14	11.998	=STDEV(A3:A102)
15	11.998	Сер.арифм.-3 σ
16	11.998	=B12-B14*3
17	11.998	Ліворуч значення вибірки вкладаються у -3 σ
18	11.998	=IF(B4>B16,"вкладаються у -3 σ ","")
19	11.998	Сер.арифм.+3 σ
20	11.999	=B12+B14*3
21	11.999	Праворуч значення вибірки вкладаються у +3 σ
22	11.999	=IF(B6<B20,"вкладаються у +3 σ ","")
23	11.999	Кількість інтервалів
24	11.999	9
25	11.999	Ширини інтервалів
26	11.999	=(B20-B16)/B24

б

Рис. 3. Фрагмент шаблону з результатом розрахунку (а) і з формулами (б) для розрахунку оптимального зміщення

Імовірність розміру у допуску
0,941
виправного браку
0,011
невиправного браку
0,047
Витрати на невиправний, грн
798,5
Витрати на виправний, грн
21,8
820,2

а

L	
1	
Імовірність розміру у допуску	
2	
3	=NORMDIST(SC\$6;SBS12;SBS14;1)-NORMDIST(SC\$4;SBS12;SBS14;1)
4	виправного браку
5	=NORMDIST(SC\$4;SBS12;SBS14;1)
6	невиправного браку
7	=NORMDIST(SBS20;SBS12;SBS14;1)-NORMDIST(SC\$6;SBS12;SBS14;1)
8	Витрати на невиправний, грн
9	=L7*100*C20
10	Витрати на виправний, грн
11	=L5*C17*100
12	=L9+L11

б

Рис. 4. Фрагмент шаблону з результатом розрахунку (а) і з формулами (б) для розрахунку виробничого браку

Результати розрахунку виробничих витрат при оптимальному зміщенні центру групування наведено на рис. 5, зміна виду кривої нормального розподілу – на рис. 6.

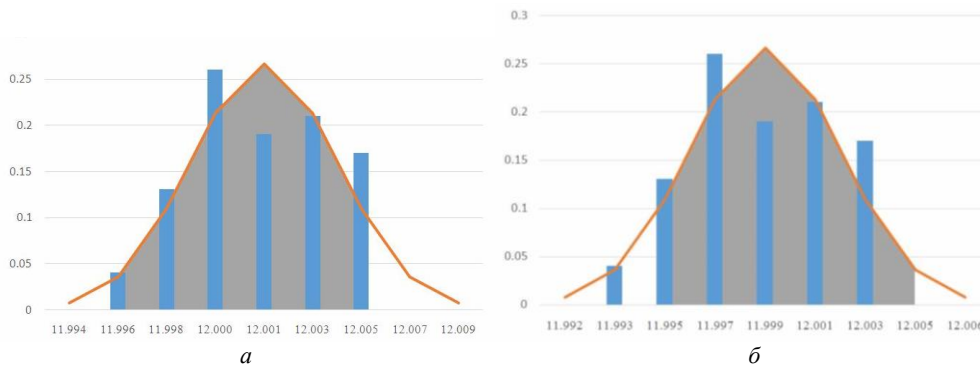
Вибірка	Статистичні дані вибірки	Вимоги до деталей по кресленню
11.994	Мінімум вибірки	Мінімальний розмір
11.994	11,994	11,995
11.994	Максимум вибірки	Максимальний розмір
11.994	12,004	12,006
11.995	Розмах вибірки	Допуск
11.995	0,01	0,011
11.995	Кількість елементів вибірки	
11.995	100	
11.995	Середнє арифметичне	Середній розмір
11.996	11,99900	12,00050
11.996	Відхилення σ	Зміщення ϵ , мкм
11.996	0,003	-1,50445
11.996	Сер.арифм.-3 σ	Собівартість 1% виправлення деталей
11.996	11,991	20
11.996	Ліворуч значення вибірки вкладаються у -3 σ	Собівартість 1% невірних деталей
11.996	Сер.арифм.+3 σ	170
11.997	12,007	Оптимальне зміщення ϵ , мкм
11.997	Праворуч значення вибірки вкладаються у +3 σ	-1,504
11.997	Кількість інтервалів	
11.997	9	
11.997	Ширини інтервалів	
11.997	0,002	

а

Імовірність розміру у допуску	
	0,919
виправного браку	0,075
невиправного браку	0,005
Витрати на невірний, грн	77,1
Витрати на виправний, грн	150,8
	227,9

б

Рис. 5. Результат розрахунку оптимального зміщення (а) і витрат (б) на виробничий брак після розмірного налаштування верста



а

б

Рис. 6. Порівняння кривих нормального розподілу неоптимізованої (а) та оптимізованої (б) технічної системи

Висновки та напрямок подальших досліджень. Завдяки розробці універсального шаблону у табличному процесорі для розрахунку оптимального зміщення та виробничого браку вдалось скоротити витрати з 820 грн до 228 грн, тобто у 3,6 разів. Знайдене технічне рішення не потребує значних часових і матеріальних затрат, високої кваліфікації працівників, є майже повністю автоматизованим (вимагає тільки введення вибірки, максимального та мінімального граничного розміру, витрат на брак), простим в користуванні та сумісним з багатьма пристроями.

У подальшій роботі планується продовжити пошук оптимальних технічних рішень, що дозволять підвищити ефективність машинобудівної галузі України.

Список літератури

1. Кравцова Д.Ю., Зюган У.І. Статистична обробка інженерних вимірювань зі комп'ютеризацією розрахунків у табличному процесорі. Гірничий вісник. 2023. № 111. С. 22–26. URL: <http://ds.knu.edu.ua/jspui/handle/123456789/5162>
2. Цивінда Н.І., Зюган У.І., Зуєв І. О. Підвищення надійності роботи обладнання оптимізацією витрат ремонтних ресурсів / Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем Матеріали XII Міжнародної науково-практичної конференції, 26 - 27 травня 2022 р. м. Чернігів, Том 1, с.159-162
3. Garcia D. J., You F. Supply chain design and optimization: Challenges and opportunities. Computers & Chemical Engineering. 2015. Vol. 81. P. 153–170. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.03.015> (date of access: 25.03.2024).
4. Sustainable supply chain network design: An optimization-oriented review / M. Eskandarpour et al. Omega. 2015. Vol. 54. P. 11–32. URL: <https://doi.org/10.1016/j.omega.2015.01.006>
5. Do B., Zhang R. Multi-fidelity Bayesian optimization in engineering design. 2023. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.13050>
6. Upare P., Kalatkar A., Shelke R. Review on study of design optimization for additive manufacturing of various mechanical/machine components. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2022. Vol. 1259, no. 1. P. 012039. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1259/1/012039>
7. Invited review: Machine learning for materials developments in metals additive manufacturing / N. S. Johnson et al. Additive Manufacturing. 2020. Vol. 36. P. 101641. URL: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101641>

8. Progress Toward Modeling and Optimization of Sustainable Machining Processes / **I. S. Jawahir** et al. Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2020. Vol. 142, no. 11. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4047926>

9. Simulation optimization: a review of algorithms and applications / **S. Amaran** et al. Annals of Operations Research. 2015. Vol. 240, no. 1. P. 351–380. URL: <https://doi.org/10.1007/s10479-015-2019-x>

10. Engineering Applications of Artificial Intelligence in Mechanical Design and Optimization / **J. Jenis** et al. Machines. 2023. Vol. 11, no. 6. P. 577. URL: <https://doi.org/10.3390/machines11060577>

Рукопис подано до редакції 28.03.24

УДК: 528.4:332.3

Ю. Б. РАДЗІНСЬКА, канд.техн.наук, доц., М. Л. БАГІН, здобувач,
В. В. ГОЙ, канд.ekon.наук, докторант, В. О. ФРОЛОВ, канд.техн.наук, асистент
Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова

МІСТОБУДІВНІ ЧИННИКИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНВЕСТИЦІЙНОЇ ПРИВАБЛИВОСТІ ЗЕМЕЛЬ РЕГІОНІВ: СТАН ТА НАПРЯМИ ТРАНСФОРМАЦІЙ

Метою статті є виокремлення містобудівних чинників щодо забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання: проаналізувати стан та тенденції змін містобудівних чинників; охарактеризувати містобудівні чинники забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Отже, представлена тема щодо визначення аналізу стану та трансформаційних процесів забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів є актуальною і має своєчасний характер.

Методи дослідження. У роботі застосовані загальнонаукові і спеціальні методи: систематизації, наукового обґрунтування, системного аналізу, виокремлення містобудівних чинників, оцінки.

Наукова новизна. Удосконалено теоретико-методичні підходи щодо визначення інвестиційної привабливості земель регіонів шляхом виокремлення відповідних чинників, зокрема містобудівних. Дістали подальшого розвитку результати оцінки містобудівних чинників для забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Практична значимість полягає у розробці та застосуванні кількісної основи щодо прийняття рішень для забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів та визначенні містобудівних чинників, які впливають на формування регіональної політики в сфері земельних відносин. Практична цінність дослідження обумовлена сучасними надзвичайними умовами, які визначаються зниженням ефективності використання земель, розбалансування зв'язків у системі земельних відносин, негативним впливом чинників, проведенням військових дій, обумовлюють формування напрямів та виокремлення особливостей забезпечення інвестиційної привабливості земель. Важливого значення набуває виокремлення чинників, що впливають на забезпечення інвестиційної привабливості, зокрема, у контексті формування та використання містобудівних факторів.

У результаті дослідження виокремлені містобудівні чинники, що впливають на інвестиційну привабливість земель регіонів. Встановлено, що за останні роки відбувається зниження основних показників функціонування будівельної сфери, що негативно впливають на забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів. Слід вказати на такий чинник як забудовані землі, який характеризується тенденціями до зниження у більшості регіонів. Містобудівні чинники формують багаторівневу систему показників для розробки та реалізації кількісної основи методу до оцінки рівня забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Ключові слова. Використання земель, інвестиційна привабливість земель, регіони, містобудівні чинники.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-68-73

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Сучасні надзвичайні умови, які визначаються зниженням ефективності використання земель, розбалансування зв'язків у системі земельних відносин, негативним впливом чинників, проведенням військових дій, обумовлюють формування напрямів та виокремлення особливостей забезпечення інвестиційної привабливості земель. Крім того, на недостатньому рівні здійснюється формування та застосування закордонних інвестицій, залучення вітчизняних інвесторів, що призводить до регіонального розвитку. Крім того, важливого значення набуває виокремлення чинників, що впливають на забезпечення інвестиційної привабливості, зокрема, у контексті формування та використання містобудівних факторів.

Аналіз досліджень і публікацій. Вирішенням питань щодо забезпечення інвестиційної привабливості земель займають вчені [1–6]. У контексті визначення інвестиційної привабливо-

сті запропоновані функціональні заходи її підвищення у розрізі відповідних груп чинників, що впливають на цей процес [7].

Розвиваючи функціональний підхід, деякі вчені характеризують інвестиційну привабливість як всі види вкладень, що забезпечують досягнення відповідних результатів [8–9]. Рейтингові характеристики інвестиційної привабливості виокремлюються у розробці [10].

Крім того, особливостями земельної ділянки для забезпечення інвестиційної привабливості є: розміри та форма ділянки; наявність обмежень природного характеру (заболоченість території, структура ґрунтів, рельєф та інше); наявність штучних об'єктів на території та можливість їх перенесення (лінії електропередач, трубопроводи та інше); під'їзні шляхи до території; небезпечні геологічні процеси та можливість їх попередження; доступність фасаду території до магістралей містоформуючого значення [11].

Для провадження інвестиційної діяльності характеризуються ризики, що впливають на формування та здійснення відповідних напрямів, враховуючи особливості земельних відносин: економічні; політичні; соціальні; екологічні; кримінальні [12].

У рамках системного підходу інвестиційна привабливість визначається як сукупна характеристика окремих територій країни з погляду інвестиційного клімату, рівня розвитку інвестиційної інфраструктури, можливостей залучення фінансових ресурсів, що істотно впливають на формування прибутковості засобів, що вкладаються, і інвестиційних ризиків [13].

У результаті дослідження сформовано категоріальний апарат щодо визначення інвестиційної привабливості земель регіонів, який базується на сукупності взаємопов'язаних просторових, економічних, містобудівних, екологічних, інноваційних, безпекових, нормативно-правових чинників та сучасному інструментарію геоінформаційних систем, методів, моделей, що дозволило побудувати кількісну основу розробки прийняття обґрунтованих рішень відносно залучення інвестицій у сферу земельних відносин на регіональному рівні.

Постановка задачі. Метою дослідження є виокремлення містобудівних чинників щодо забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання: проаналізувати стан та тенденції змін містобудівних чинників; охарактеризувати містобудівні чинники забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Викладення матеріалу та результати. На інвестиційну привабливість земель регіонів впливають чинники містобудівного забезпечення. Формування представленого забезпечення визначається елементами, а саме рівні: фінансування робіт з планування територій; планування територій на державному рівні; розроблення та затвердження схем планування окремих частин територій; планування територій на регіональному рівні; розроблення та затвердження схем планування території Автономної Республіки Крим, областей та районів; реалізація схем планування території Автономної Республіки Крим, областей та районів; програма комплексного відновлення області; програма комплексного відновлення території територіальної громади (її частини); планування територій на місцевому рівні; комплексний план просторового розвитку території територіальної громади; генеральний план населеного пункту; план зонування територій; детальний план території; архітектурно-містобудівні ради; громадське обговорення проєктів містобудівної документації на місцевому рівні; містобудівний кадастр; єдина державна електронна система у сфері будівництва; реєстр будівельної діяльності; електронний кабінет; портал електронної системи; містобудівний моніторинг; особливості регулювання земельних відносин при здійсненні містобудівної діяльності; регулювання забудови територій; особливості ліцензування будівельної діяльності; знесення самочинно збудованих об'єктів; прийняття в експлуатацію закінчених будівництвом об'єктів; технічна інвентаризація об'єкту нерухомого майна; державний архітектурно-будівельний контроль.

У контексті визначення інвестиційної привабливості земель оцінюється рівень забудови територій за регіонами (рис. 1).

У результаті дослідження визначено низький рівень забудови територій на регіональному рівні. Найбільшими показниками характеризуються: Дніпропетровський регіон; Київський;

Львівський. На низькому рівні визначаються регіони: Житомирський; Запорізький; Івано-Франківський; Луганський; Рівненський; Херсонський.

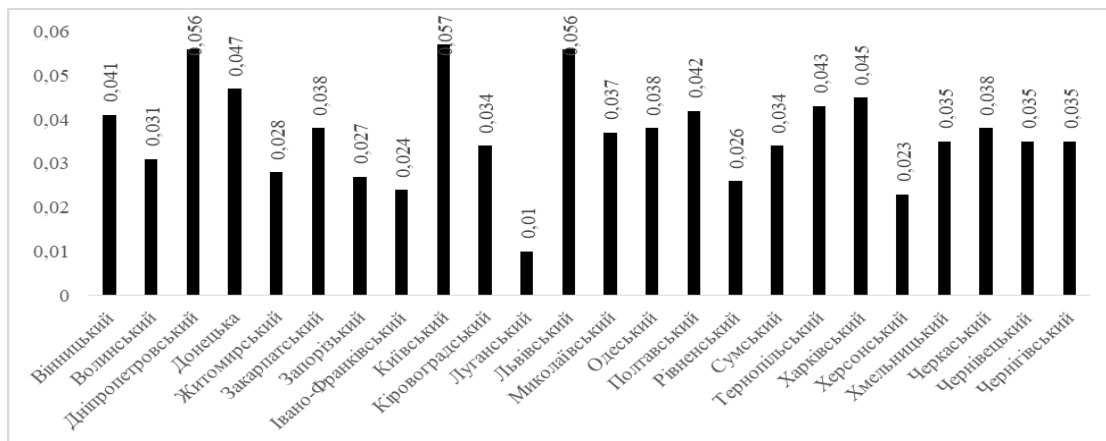


Рис. 1. Рівень забудови територій за регіонами, відн. од.

Для формування інвестиційної привабливості земель на регіональному рівні характеризуються містобудівні чинники, які визначаються показниками функціонування будівельної сфери. Зокрема, індекс будівельної продукції за регіонами має хвилеподібні тенденції, де періоди зростання змінюються на падіння. За будівлями індекси будівельної продукції визначались зниженнями цього показника. Причому поглиблювали ці тенденції зниження індексу будівельної продукції за нежитловими будівлями. Поряд з цим, індекси будівельної продукції по інженерним спорудам у більшості регіонів характеризуються зростанням.

За досліджений період у більшості регіонів спостерігається найбільша питома вага у нове будівництво. Поряд з цим, слід вказати на зростання значення реконструкції та технічного переоснащення. У деяких регіонах збільшується питома вага капітального та поточного ремонту. Представлені структурні трансформації свідчать про зміни у структурі розподілу обсягів виробленої продукції. Це обумовлено зростанням кризових явищ, де будівельні підприємства зосереджуються більше уваги на капітальному й поточному ремонті, реконструкції та технічному переоснащенні порівняно із новим будівництвом.

Індекс змін загальної площі житлових будівель на початок будівництва свідчить про її зниження. Тенденціями зростання визначались Волинський та Рівненський регіони. Поряд з цим, на недостатньому або, взагалі, низькому рівні сформовано інформаційно-аналітичне забезпечення за регіонами по будинкам одноквартирним та гуртожиткам. По будинкам з двома та більше квартирами за досліджений період тенденціями зростання характеризувались зміни у Волинському та Рівненському регіонах.

За досліджений період спостерігається загальної площі нежитлових будівель на початок будівництва за видами за всіма регіонами, окрім Івано-Франківського. Слід вказати на низький рівень інформаційно-аналітичного забезпечення будівництва готелей, ресторанів та подібних будівель, будівель офісних, будівель транспорту та засобів зв'язку, будівель для публічних виступів, закладів освітнього, медичного та оздоровчого призначення.

Індекс змін кількості квартир у житлових будинках на початок будівництва за видами по регіонам представлено у табл. 1.

У всіх регіонах відбувається скорочення кількості квартир в одноквартирних будинках. На низькому рівні визначалось формування інформаційно-аналітичне забезпечення щодо змін загальної площі житлових будівель з двома або більше квартирами та у гуртожитках.

Значення індексу змін загальної площі нежитлових будівель, прийнятих в експлуатацію, за видами свідчить про негативні тенденції у цій сфері у більшості регіонів, окрім Рівненського. На низькому рівні формування інформаційно-аналітичного забезпечення щодо загальної площі нежитлових будівель визначались тенденції у більшості регіонах у готелях, ресторанах та подібних будівлях, будівлях транспорту та засобів зв'язку, будівлях для публічних виступів, закладів освітнього, медичного та оздоровчого призначення. Крім того, зниженням загальної площі, прийнятої в експлуатацію характеризувались офісні будівлі у регіонах: Вінницький; Волинський; Дніпропетровський; Одеський; Полтавський; Хмельницький.

Індекс змін кількості квартир у житлових будинках на початок будівництва за видами по регіонах, відн. од. [14]

Регіони	Усього	У тому числі	
		будинки одноквартирні	будинки з двома та більше квартирами
Україна	0,58	0,50	0,59
Вінницький	0,76	0,50	0,89
Волинський	1,47	0,72	2,03
Дніпропетровський	0,23	0,39	0,211
Донецький	0,03	0,09	-
Житомирський	0,64	0,62	0,65
Закарпатський	0,55	0,63	0,50
Запорізький	0,37	-	-
Івано-Франківський	0,80	0,66	0,87
Київський	0,71	0,44	0,77
Кіровоградський	0,21	-	-
Луганський	0,09	-	-
Львівський	1,02	0,63	1,10
Миколаївський	0,03	0,23	-
Одеський	0,26	0,33	0,25
Полтавський	0,31	0,42	0,29
Рівненський	1,30	0,72	1,72
Сумський	0,54	0,19	0,64
Тернопільський	0,72	0,58	0,74
Харківський	0,29	0,15	0,31
Херсонський	0,15	-	-
Хмельницький	0,67	0,74	0,66
Черкаський	0,79	0,55	0,83
Чернівецький	0,28	0,54	0,16
Чернігівський	0,55	0,34	0,58

Подібними тенденціями визначались торгівельні будівлі за регіонами: Вінницький; Волинський; Дніпропетровський; Житомирський; Закарпатський; Запорізький; Івано-Франківський; Київський; Одеський; Тернопільський; Хмельницький; Черкаський; Чернівецький.

Гальмували цей процес зростання загальної площі торгівельних будівель прийнятої в експлуатацію за: Львівським; Полтавським; Рівненським; Чернігівським регіонами.

У більшості регіонів спостерігається також зниження загальної площі промислових будівель і складів, прийнятої в експлуатацію. Скорочення загальної площі інших нежитлових будівель відбувалось у регіонах: Вінницький; Волинський; Житомирський; Закарпатський; Запорізький; Київський; Львівський; Сумський; Тернопільський; Хмельницький; Черкаський; Чернівецький; Чернігівський.

Індекс змін кількості квартир, прийнятих в експлуатацію за видами по регіонах представлено у табл. 2.

У більшості регіонів відбувається скорочення кількості квартир, прийнятих у експлуатацію за більшістю регіонів, що свідчить про зниження можливостей будівництва та напрямів формування інвестиційної привабливості земель регіонів.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином, у результаті дослідження виокремлені містобудівні чинники, що впливають на інвестиційну привабливість земель регіонів. Встановлено, що за останні роки відбувається зниження основних показників функціонування будівельної сфери, що негативно впливають на забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів. Слід вказати на забудовані землі, які визначаються їх використанням від 1 до 5,7%, що характеризується тенденціями до зниження у більшості регіонів. Містобудівні чинники формують багаторівневу систему показників для розробки та реалізації кількісної основи методу до оцінки рівня забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Індекс змін кількості квартир, прийнятих в експлуатацію за видами по регіонах, відн. од. [14]

Регіони	Кількість квартир			Загальна площа		
	усього	у тому числі		усього	у тому числі / including	
		будинки одноквартирні	будинки з двома та більше квартирами		будинки одноквартирні	будинки з дво- ма та більше квартирами
Україна	0,61	0,65	0,60	0,62	0,64	0,61
Вінницький	1,23	0,68	1,45	-	-	-
Волинський	0,92	0,77	1,07	-	-	-
Дніпропетровський	0,47	0,60	0,44	-	-	-
Донецький	0,09	-	-	0,08	-	-
Житомирський	0,60	0,80	0,51	0,60	0,75	0,44
Закарпатський	0,79	0,71	0,88	0,74	0,71	0,86
Запорізький	0,31	-	-	-	-	-
Івано- Франківський	0,97	0,74	1,06	0,97	0,70	1,32
Київський	0,75	0,66	0,78	-	-	-
Кіровоградський	0,55	-	-	0,62	-	-
Луганський	0,06	0,06	-	0,11	0,11	-
Львівський	0,59	0,66	0,57	-	-	-
Миколаївський	0,60	0,20	0,77	0,60	0,17	1,00
Одеський	0,65	0,77	0,64	0,67	0,74	0,65
Полтавський	1,62	0,74	2,10	-	-	-
Рівненський	0,91	0,86	0,96	0,90	0,85	1,05
Сумський	0,31	0,53	0,25	0,35	0,56	0,23
Тернопільський	0,26	0,64	0,20	0,35	0,69	0,20
Харківський	0,04	-	-	-	-	-
Херсонський	0,07	0,14	-	0,08	0,11	-
Хмельницький	0,91	0,75	0,94	-	-	-
Черкаський	0,48	0,63	0,43	0,53	0,66	0,44
Чернівецький	0,63	0,63	0,63	0,59	0,60	0,56
Чернігівський	1,02	0,79	1,07	1,07	0,86	1,17

Список літератури

1. Гайдуцький А. П. Методологічні аспекти інвестиційної привабливості економіки. Регіональна економіка. 2004. № 4. С. 81–86.
2. Земельна реформа: Обіг замість Ринку. Концепція. URL: <http://agroua.net>.
3. Ситник О. В. Економічна сутність інвестиційної привабливості підприємства та її характеристики. Інвестиції: практика та досвід. 2015. № 23. С. 127–130.
4. Карпова І. В. Ринок землі в Україні як чинник розвитку іпотечного кредитування аграрного сектору економіки. Молодий вчений. 2017. № 3 (43). С. 664–667.
5. Вишняк Г. О. Формування системи моніторингу інвестиційного розвитку сільськогосподарських підприємств. Вісник Бердянського університету менеджменту і бізнесу. 2015. № 1. С. 58–62.
6. Гуляєва Н. М., Рябченко Н. К. Сутнісні ознаки інвестиційної привабливості підприємства: факторна природа формування. Вісник Запорізького національного університету. 2012. № 1(13). С. 22–28. URL: <https://web.znu.edu.ua/herald/issues/2012/eco-1-2012/022-28.pdf>.
7. Козяр Н. О. Інвестиційний потенціал аграрного виробництва в умовах глобалізації: дис... канд. екон. наук: 08.00.03. Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, 2021. 282 с.
8. Алібекова К. В. Інвестиційна привабливість підприємства. Управління розвитком. 2014. № 13. С. 6–9.
9. Бланк І. О. Інвестиційний менеджмент: підручник. К.: Київ. нац. торг-еко. ун-т, 2003. 398 с.
10. Інвестиційна привабливість регіонів. Підготовлено Київським міжнародним інститутом соціології у партнерстві з Інститутом економічних досліджень та політичних консультацій на замовлення Державного агентства з інвестицій та управління національними проектами України. URL: <http://www.ier.com.ua/files/Projects/2012/Рейтинг%20інвестиційної%20привабливості%20регіонів%202014.pdf>.

11. Хром'як Й. Я., Доскач О. Б., Лисяк Н. М. Організаційно-економічний механізм інвестиційної діяльності органів місцевого самоврядування. Соціально-економічні проблеми сучасного періоду України. 2014. Вип. 5(109). С. 119–130.
12. Данилишин Б. Земельні відносини як чинник розвитку. Урядовий кур'єр. 2006. № 91. С. 6.
13. Борсук О. М. Чинники формування інвестиційної привабливості аграрних підприємств. БНАУ. Червень 2010. С. 29.
14. Офіційний сайт Державної служби статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua>.

Рукопис подано до редакції 28.04.24

УДК 691.32

Н. В. АСТАХОВА, В. І. АСТАХОВ, кандидати техн. наук, доценти
Криворізький національний університет

ЗАХИСНІ ВЛАСТИВОСТІ ШЛАКОПЕМЗОБЕТОНУ ТА ШЛАКОБЕТОНУ ПО ВІДНОШЕННЮ ДО СТАЛЕВОЇ АРМАТУРИ

До умов, які забезпечують експлуатаційну надійність бетону конструкцій даху, відносять комплекс технологічних заходів, спрямованих на раціональний вибір вихідних матеріалів, застосування оптимальних режимів формування та твердіння, що сприяють отриманню структури бетону підвищеної щільності, низької капілярної пористості, з замкнутим характером пор.

Мета. Отримання модифікованих шлакобетону і шлакопемзобетону для конструкцій даху з безрулонною покриттям і теплим горищем, які мають захисні властивості відносно укладеної в них сталеві арматури.

Методи дослідження. У якості основних методів досліджень була використана методика оцінки пасивності сталеві арматури, яка була розроблена в центральній лабораторії корозії науково-дослідного інституту залізобетону. Також використовувалась стандартна методика поперемінного зволоження-висушування пропарених зразків.

Наукова новизна. Розроблені шлакопемзобетон та шлакобетон раціонального модифікованого складу, які мають захисні властивості відносно укладеної в них сталеві арматури.

Практичне значення. Отримані шлакопемзобетон та шлакобетон раціональних модифікацій, які мають захисні властивості щодо укладеної в них сталеві арматури. Ці властивості є дуже важливими для бетону на шлакових матеріалах теплоізоляційно-конструктивного призначення, який використовується в конструкціях даху з безрулонною кровлею та теплим горищем.

Результати. Встановлено, що шлакопемзобетон і шлакобетон наведених раціональних модифікацій після теплологічної обробки забезпечують пасивацію арматури. Щільність струму при потенціалі +300 мВ не перевищує 9 мкА/см², тобто – менше верхньої межі, що відповідає пасивному стану сталі – 10 мкА/см².

Після трьох місяців тимчасового зволоження - висушування зразків кожного з трьох досліджуваних видів бетону слідів корозійного ураження сталі в них не виявлено; щільність струму при потенціалі +300 мВ для зразків шлакопемзобетону ШП 12; ШП 22 та шлакобетону ГШП, відповідно, складала 6,8, 6 та 7 мкА/см², що виключає кородування сталі в бетоні.

Ключові слова: відходи ГЗК, мелений гранульований шлак, шлакопемзобетон, шлакобетон, сталеві арматура.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-73-77

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Захисна здатність по відношенню до сталеві арматури бетону на шлакових матеріалах теплоізоляційно-конструктивного призначення поступається бетону на щільних заповнювачах. Останнє має місце через зниження лужності порової рідини бетону за рахунок зв'язування гідроксиду кальцію гідралічно активними пористими заповнювачами, підвищеної проникності розчинної частини і заповнювача і наявності сполук сірки в продуктах переробки доменних шлаків [1, 2].

Необхідною умовою для забезпечення пасивного стану арматури в бетоні на пористих заповнювачах є достатня щільність розчинної частини останнього поряд з призначенням необхідної товщини захисного шару бетону.

На підставі аналізу літературних даних, а також за результатами власних досліджень автором [1] зроблено висновок про те, що прискорююча корозію арматури дія сполук сірки шлакових матеріалів проявляється тільки в малоцільному бетоні.

Аналіз досліджень і публікацій. Гірничодобувна та металургійна галузі України потерпають від значних труднощів через високі ціни на енергоресурси, значне скорочення ринків збу-

ту, зниження цін на промислову продукцію, брак сучасної техніки, відтік кваліфікованої робочої сили та вплив інших чинників [3].

Для оцінки потенційної можливості використання «хвостів» збагачення залізних руд для створення будівельних матеріалів, авторами [4] були досліджені склади в'яжучих, приготовлені шляхом додавання активізуючих добавок до «хвостів» збагачення залізних руд Криворізького залізорудного басейну [4].

В роботі [5] відзначається, що на території нашого міста і прилеглих територіях знаходиться велика кількість відходів, пов'язаних з діяльністю гірничодобувних підприємств. Проблеми утилізації відходів є однією з найважливіших для нашого регіону [5].

Під час видобування й перероблення залізних руд, руд кольорових металів, хімічної сировини, нерудних матеріалів отримують побічні продукти двох типів: у вигляді розкритих та інших видобутих порожніх порід, при веденні гірських робіт та відходів гірничозбагачувальних комбінатів. Більшість з них пов'язана з видобутком і переробкою залізних руд [5].

На залізорудних підприємствах країни обсяг порожніх порід досягає 400 млн т, у тому числі скельних порід більше 70 %. Крім того, відходи після збагачення руди становлять понад 200 млн т [6] [3].

В роботі [7] відзначається, що зараз видобуток залістистих кварцитів здійснюється відкритим способом на глибині до 400-450 м, а експлуатація кар'єрів глибиною понад 500 м економічно невиправдана. Обсяги заскладованих шламів становлять приблизно 6-7 млрд. тонн [8] [7].

Крім того, до відходів належить так звана некондиційна частина окислених руд високої якості. Вміст заліза в цих рудах становить 52-55% [9] [7].

Утилізація вторинних матеріалів виробництва призначена для збереження природних ресурсів і скорочення обсягу відходів, які необхідно утилізувати в спеціальних місцях поховання [10].

Утилізація дуже заохочується багатьма країнами Європейського Союзу, в якому є відповідні положення у всіх директивах, що стосуються управління відходами [10]. Ключовим елементом у заохоченні до переробки відходів є принцип «забруднювач платить», який був включений до всіх директив Співтовариства щодо поводження з безпечними та небезпечними відходами. З метою заохочення до переробки багато держав-членів прийняли специфічне екологічне законодавство, зокрема, сплату податку за утилізацію відходів [10].

За останні роки намітилася чітка тенденція до забезпечення підприємств будівельної індустрії матеріалами з відходів гірничорудної промисловості [11]. Економне використання природних сировинних ресурсів вимагає нових методів їх переробки, упровадження безвідходних технологій і комплексного використання всіх відходів виробництва. При сучасному технічному рівні розвитку світової промисловості можна повністю переробити всі попутні мінеральні продукти й відходи виробництва, близько 85% яких можуть бути використані в будівництві. Цей напрямок є перспективою розвитку національної промисловості. Відходи збагачених залізних руд посідають перше місце серед відходів гірничовидобувної промисловості, та їх обсяг зі збільшенням видобутку корисних копалин буде зростати [11].

В результаті проведених досліджень в роботі [11], було відзначено, що опір розтягнення бетону на заповнювачі з відходів ГЗК на 30 % більший, ніж бетону на заповнювачі з піску. Крім того, бетон на відходах має краще (у середньому 15-20%) зчеплення з арматурою [12, 13] [11].

За підсумками аналізу досліджень основних фізико-механічних характеристик бетонів на дрібних відходах ГЗК, можна відзначити, що стосовно міцності й деформативних властивостей зазначені бетони не поступалися, а за деякими параметрами й перевищували традиційні бетони на кварцовому піску [11].

В роботі [14] відзначається, що для отримання функціонального бетону, в якості складових потрібно застосовувати активні дрібнозернисті мінеральні наповнювачі, такі як метакаолін, мікрокремнезем та високоефективні суперпластифікатори. Оптимальне співвідношення цих компонентів дозволяє модифікувати структуру цементного каменю на мікрорівні. Це дозволяє покращити такі властивості бетону, як міцність, довговічність, корозійну стійкість та ін. [14].

Важливо зазначити, що ці властивості досягаються за допомогою високої рухливості та сумішей, що самоущільнюються, із зниженими витратами цементу [14]. Натепер використовуються такі найпоширеніші добавки-модифікатори, як мікрокремнезем та метакаолін. Однак зазначені добавки мають певні недоліки, які заважають їх широкому використанню. До таких недоліків мікрокремнезему слід віднести те, що він є відходом виробництва, а отже, не має стабі-

льності властивостей. Недоліком метакаоліну є його висока вартість через досить великі витрати енергії на його приготування [14].

Тому в якості одного з реакційно-здатних порошоків в роботі [14] використовували мелений до питомої поверхні $(300 \pm 25) \text{ м}^2/\text{кг}$ доменний гранульований шлак.

Постановка завдання. Метою дослідження є отримання модифікованих шлакобетону і шлакопемзобетону для конструкцій даху з безрулонною покрівлею і теплим горищем, які мають захисні властивості відносно укладеної в них сталевій арматури.

Викладення матеріалу та результати. Дослідженнями [15] встановлена задовільна захисна здатність по відношенню до сталевій арматури конструкційного шлакопемзобетону С25 – після двох років нормального твердіння слідів корозії арматури в бетоні не виявлено.

У роботі [16] викладено дослідження стану арматури в керамзитобетоні та шлакопемзобетоні при товщині захисного шару 20 мм. Встановлено залежність величини корозійного руйнування сталі від умов зберігання зразків. Зміна відносної вологості повітря з 40-50 % до 80 % зумовлює збільшення площі та глибини ураження арматури. Найкращу захисну дію по відношенню до сталевій арматури має шлакопемзобетон щільної структури з використанням як дрібного заповнювача шлакопемзового піску і гранульованого доменного шлаку. В зразках шлакопемзобетону з піском з гранульованого шлаку при витраті цементу $285 \text{ кг}/\text{м}^3$, що зберігалися в середовищі з відносною вологістю повітря 80 % при температурі 30°C протягом 48 місяців, слідів корозії арматурної сталі не виявлено. В той же час у шлакопемзобетоні на шлакопемзовому піску з витратою цементу $300 \text{ кг}/\text{м}^3$, за інших рівних умов, уражено 15 % площі арматури. Очевидно, що зазначена витрата цементу ($300 \text{ кг}/\text{м}^3$) не забезпечує отримання щільної структури шлакопемзобетону на шлакопемзовому піску.

Згідно з методикою, розробленою в центральній лабораторії корозії науково-дослідного інституту залізобетону, критерієм оцінки пасивності сталевій арматури є анодна поляризованість останньої в бетоні після тепловологісної обробки, а також після закінчення 3 місяців попереминого зволоження-висушування пропарених зразків. При цьому, сталь у бетоні – пасивна, якщо при потенціалі +300 мВ по насиченому каломельному електроду щільність струму не перевищує $10 \text{ мкА}/\text{см}^2$ [17].

Дослідженню були піддані шлакопемзобетон і шлакобетон складів Ш 12; Ш 22; ГШП (табл. 1).

Таблиця 1

Склади бетону на шлакових матеріалах раціональних структур для конструкцій дахів з безрулонною покрівлею та теплим горищем

Шифр складу	Цемент, кг	Мелений граншлак, кг	Шлакова пемза						Граншлак		$\frac{M}{M+K}$	Гранична крупність заповнювача	Вода, л	ГКЖ-11, в перерахунок на суху речовину
			0-5		5-10		10-20		кг	л				
			кг	л	кг	л	кг	л						
Ш-22	300	270	677	608	182	243	261	365	-	-	0,5	20	269	174
Ш-12	300	300	812	729	282	376	-	-	-	-	0,66	10	276	180
ГШП	300	275	-	-	-	-	-	-	1372	1170	1	5	262	173

По осі бетонного зразка розміром $70 \times 70 \times 140$ мм укладався ретельно очищений, знежирений електрод з арматурної сталі діаметром 4 мм довжиною 120 мм (рис. 1). Ущільнення бетонної суміші жорсткістю 30 с здійснювалося на лабораторному вібростолі з привантаженням 3000 Па. Було виготовлено по 6 зразків кожного з досліджуваних видів бетону. Три зразки піддавалися випробуванню після тепловологісної обробки, інші – в тримісячному віці після пропарювання бетону.

Дослідження стану сталі в бетоні проводилося в центральній лабораторії корозії науково-дослідного інституту залізобетону. Встановлено, що шлакопемзобетон і шлакобетон наведених раціональних модифікацій після тепловологісної обробки забезпечують пасивацію арматури. Щільність струму при потенціалі +300 мВ не перевищує $9 \text{ мкА}/\text{см}^2$ (рис. 2), тобто – менше верхньої межі, що відповідає пасивному стану сталі – $10 \text{ мкА}/\text{см}^2$.

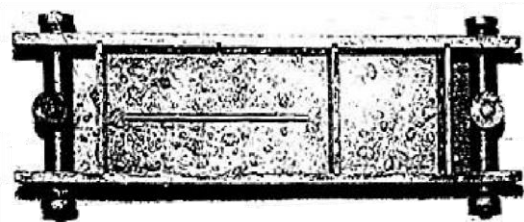


Рис. 1. Виготовлення зразків для оцінки захисних властивостей бетону по відношенню до сталевій арматури

Після трьох місяців тимчасового зволоження - висушування зразків кожного з трьох досліджуваних видів бетону слідів корозійного ураження сталі в них не виявлено; щільність струму при потенціалі +300 мВ для зразків шлакопемзобетону ШП 12; ШП 22 та шлакобетону ГШП, відповідно, склала 6,8, 6 та 7 мкА/см² (рис. 3), що виключає кородування сталі в бетоні.

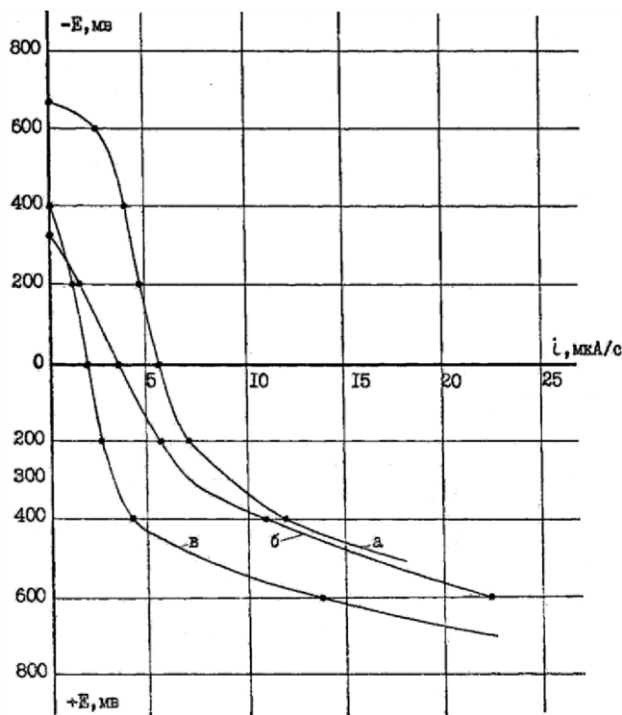


Рис. 2. Дослідження захисних властивостей бетону по відношенню до сталевій арматури. Поляризаційні криві арматурної сталі в бетоні після тепловологісної обробки: а – шлакопемзобетон ГК-10, б – шлакопемзобетон ГК-20, в – шлакобетон

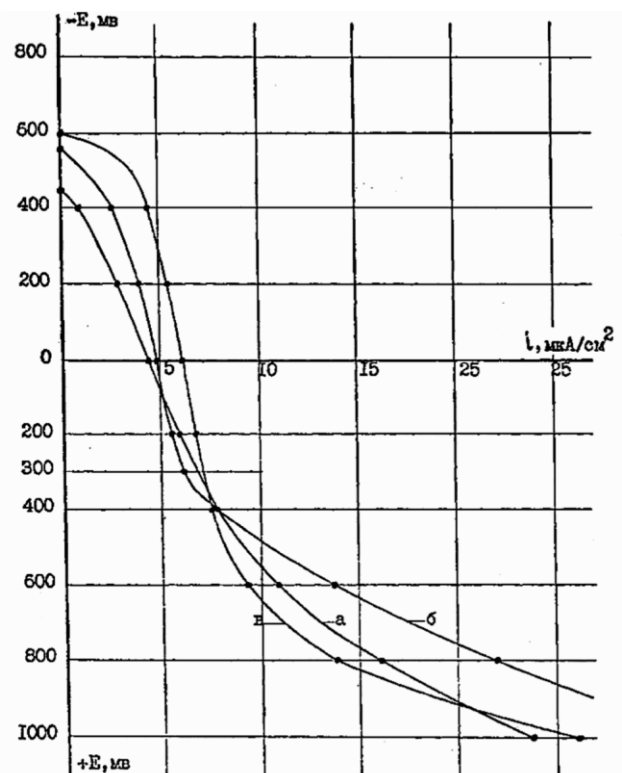


Рис. 3. Дослідження захисних властивостей бетону по відношенню до арматури. Поляризаційні криві арматурної сталі в бетоні у віці 90 діб після пропарювання: а – шлакопемзобетон ГК-10; б – шлакопемзобетон ГК-20; в – шлакобетон

Висновки та напрямки подальших досліджень. Шлакопемзобетон і шлакобетон для конструкцій даху з безрулонною покрівлею і теплим горищем мають пасивну дію відносно укладеної в них сталевій арматури.

Щільність струму при позитивному потенціалі 300 мВ після тепловологісної обробки не перевищує 9 мкА/см², після трьох місяців поперемінного зволоження-висушування – 7 мкА/см² при допустимій 10 мкА/см².

Список літератури

1. Алексеев С. Н. Коррозия и защита арматуры железобетонных конструкций [Текст]: дис... д-ра техн. наук. - М.: 1970. - 310 с.
2. Алексеев С. Н. Коррозия и защита арматуры в бетоне / С. Н. Алексеев // М.: Стройиздат, 1968. - 231 с.
3. Кияшко В. Т., Салій І. В., Яковенко Л. О., Малиновський Ю. О. Перспективні напрями утилізації відходів гірничо-збагачувального виробництва / В. Т. Кияшко, І. В. Салій, Л. О. Яковенко, Ю. О. Малиновський // Екологічні науки. - 2020. - № 4(31). - С. 103-106.
4. Шишкин А. А., Шишкина А. А., Щерба В.В. Особенности использования отходов горнообогатительных комбинатов в производстве строительных материалов / А. А. Шишкин, А. А. Шишкина, В. В. Щерба В.В. // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. - 2013. - № 1(99). - С. 8 - 12.
5. Єфіменко В. І., Єфіменко В. В., Ягодкіна О. О. Аналіз доцільності комплексного використання відходів гірничо-видобувних підприємств на виробництво нерудних будівельних матеріалів / В. І. Єфіменко, В. В. Єфіменко, О. О. Ягодкіна // Вісник Криворізького національного університету. - 2014. Вип. 36. - С. 159-165.
6. Окороков С.Д. Расчет портландцементной сырьевой шихты / С.Д. Окороков // М.: Стройиздат, 1975. - 329 с.
7. Скурковський В. В., Костін Д. Ю. Використання відходів гірничо-збагачувальних комбінатів в дорожньому будівництві / В. В. Скурковський, Д. Ю. Костін // Збірник наукових праць 85-ї міжнародної наукової конференції студентів університету, ХНАДУ. - 2023. С.104-106.
8. Перспективи залучення в експлуатацію техногенних родовищ (на прикладі України і Грузії) / Копач П. І. та ін. // Екологія і природокористування. - 2013. Вип. 16. - С. 210-218.

9. Перегудов В. В., Григор'єв І. Є., Григор'єв Ю. І. Дослідження взаємозв'язків параметрів техногенних родовищ насапного типу / В. В. Перегудов, І. Є. Григор'єв, Ю. І. Григор'єв // Гірничий вісник. - 2019. Вип. 105. - С. 29-34.

10. Соколов О. В., Желтобрюх А. Д., Копинець І. В., Каськів В. І. Використання відходів промисловості в дорожньому будівництві / О. В. Соколов, А. Д. Желтобрюх, І. В. Копинець, В. І. Каськів // Дороги і мости. – 2020. Вип. 21. – С. 110-119.

11. Валовой О. І., Астахов В. І., Афанасьєв В. В., Валовой М. О., Єременко О. Ю. Використання відходів гірничорудної промисловості у промисловому, цивільному та транспортному будівництві / О. І. Валовой, В. І. Астахов, В. В. Афанасьєв, М. О. Валовой, О. Ю. Єременко // Гірничий вісник. - 2020. - вип. 107. – С. 142-147.

12. Валовой О. І., Єрьоменко О.Ю., Валовой М.О. «Корозійна стійкість бетонів на заповнювачах з відходів металургійної промисловості» / О. І. Валовой, О. Ю. Єрьоменко, М.О. Валовой // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне, 2016. – Вип. 32. – С.15-22.

13. Валовой М. О. «Технологія виготовлення та аналіз тріщиностійкості дослідних зразків балок на відходах гірничо-збагачувальних комбінатів» / М. О. Валовой // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди : зб. наук. праць. – Рівне. – 2013. – Вип.25. – С. 233–239.

14. Шишкіна О. О., Шишкін О. О. Вплив міцел, наповнених реакційними порошками, на міцність бетону / О.О. Шишкіна, О. О. Шишкін // Нові технології в будівництві. – 2021. Вип. 39. – С. 61 – 68.

15. Геммерлинг Г. В., Важенін Б. В., Климочкіна Э. П. Влияние качества шлаковой пемзы на свойства шлакопемзобетона / Г. В. Геммерлинг, Б. В. Важенін, Э. П. Климочкіна // В кн.: Строительные материалы и изделия из металлургических шлаков. - М.: 1966. - С. 73-77.

16. Алексеев С. Н., Степанова В. Ф. Защита от коррозии арматуры в легких бетонах / С. Н. Алексеев, В. Ф. Степанова // Бетон и железобетон. - 1968, № 5. - С. 26-28.

17. Руководство по обеспечению сохранности арматуры в конструкциях из бетона на пористых заполнителях в агрессивных средах. - М.: НИИЖБ, 1979. - 30 с

Рукопис подано до редакції 29.02.24

УДК 622.271

Ю.І. ГРИГОР'ЄВ, С.О. ЛУЦЕНКО, кандидати техн. наук, доценти,
Д.В. БРОВКО, д-р техн. наук, доц., І.В. БАРАНОВ, канд. техн. наук, с. н. с.,
С.О. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф.
Криворізький національний університет

АДАПТАЦІЯ КІНЦЕВИХ КОНТУРІВ КАР'ЄРІВ №2-БІС ТА №3 ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ» В УМОВАХ ДИНАМІКИ ГІРНИЧО-ГЕОЛОГІЧНИХ ФАКТОРІВ

Основна мета дослідження полягає в науковому обґрунтуванні і подальшій адаптації проектних положень гірничих робіт кар'єрів №2-біс та №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» відповідно до оновлених гірничо-геологічних даних.

Методами дослідження є ретроспективний, компаративний та каузальний аналіз невідповідностей положень гірничих робіт до актуальних гірничо-геологічних даних, а також гірничо-геометричний аналіз фактичного і проектного положень гірничих робіт.

Наукова новизна дослідження полягає в установленні динаміки неузгодженості головних параметрів відкритих гірничих робіт до змін гірничо-геологічних факторів.

Практичне значення полягає у встановленні фактичної невідповідності кутів відкосів неробочих бортів кар'єрів до фізико-механічних властивостей масиву порід з подальшим усуненням даних неузгодженостей шляхом проектування кінцевих контурів гірничих робіт на засадах динамічного проектування.

Результати. В роботі виконано ретроспективний аналіз проектних рішень щодо розвитку відкритих гірничих робіт на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», а також сучасного їх стану. На підставі виконаного авторами аналізу невідповідностей головних параметрів відкритих гірничих робіт фізико-механічним властивостям порід було проведено геомеханічні розрахунки стійкості породного масиву і визначено безпечні кути відкосів уступів і бортів кар'єрів. На базі проведених розрахунків геомеханічної стійкості масивів гірських порід було виявлено можливі зони оптимізації кінцевих контурів гірничих робіт шляхом зменшення ширини берм та збільшення кутів відкосів уступів. В результаті динамічного проектування кінцевих контурів кар'єру №2-біс та №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» було обґрунтовано приращення запасів залізнитих кварцитів на 5,2 млн т і на 22,1 млн т відповідно при зменшенні середнього коефіцієнту розкриву.

Таким чином, було науково обґрунтовано перспективи подальшого сталого розвитку гірничо-видобувного підприємства із безпечним розвитком мінерально-сировинної бази за рахунок впровадження підходів динамічного проектування головних параметрів кар'єрів.

Ключові слова: кар'єр, кут відкосу борта кар'єру, запаси корисних копалин, динамічне проектування.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. В сучасних умовах складного економічного становища вітчизняних добувних підприємств особливо гостро стоїть проблема не тільки збереження їх конкурентних позицій на світовому ринку мінеральної сировини, а й можливості подальшого функціонування взагалі. В цьому аспекті не менш важливим стратегічним питанням є і відновлення мінерально-сировинної бази у кризовий післявоєнний період [1, 2].

Однак в ході експлуатації родовища змін зазнають не лише зовнішні економічні фактори [3-5], а й гірничо-геологічні. До некерованих факторів, що змінюються при поглибленні гірничих робіт, відносяться і фізико-механічні властивості гірського масиву: його загальна тріщинуватість, інтенсивність і орієнтація систем тріщин, заповненість тріщин, міцність порід тощо. Встановлено, що навіть у межах одного кар'єрного поля умови залягання гірських порід є змінними, а у переважній більшості, проектні параметри кар'єрів залишаються незмінними, часто навіть у різних проектах. Завжди існують певні умови при яких може змінитися стійкий стан уступів і бортів кар'єру. При цьому будуть з'являтися потенційно небезпечні ділянки, на яких можуть виникнути ці зміни у вигляді деформацій: зрушень, обвалень, зсувів тощо.

Згідно концепції сталого розвитку, відкрита розробка родовищ корисних копалин має передбачати максимально повне використання надр [6]. З точки зору ринкової економіки, у мінливому конкурентному середовищі кожне видобувне підприємство прагне до посилення своїх конкурентних позицій шляхом адаптації до динаміки зовнішніх факторів [8]. Підвищення ж адаптивного потенціалу гірничо-видобувного підприємства досягається при максимізації прибутку від експлуатації надр. Розглядаючи гірничо-видобувне підприємство як антропогірничий комплекс другого порядку, до інструментів адаптації можна віднести головні параметри відкритих гірничих робіт [8-10].

Виходячи зі зміни цих властивостей, з'являється доцільність перегляду кутів відкосу уступів, а також відкосів бортів кар'єру, що, в свою чергу, може призвести до перегляду запасів корисних копалин, строку відпрацювання родовища і коефіцієнту розкриття.

Аналіз досліджень і публікацій. На даний час Криворізькі залізрудні родовища розробляються у складних гірничо-геологічних умовах, що обумовлено глибиною видобутку корисної копалини понад 400 метрів. В цих умовах дуже гостро набувають значення питання, які пов'язані з економічною доцільністю подальшої розробки залізрудних родовищ відкритим способом. При цьому, невід'ємною умовою є розв'язання проблем, пов'язаних з безпекою відпрацювання залізрудних кар'єрів та веденням гірничих робіт. Досвід роботи великих залізрудних кар'єрів показує, що зі збільшенням їх глибини зростає навантаження на борти та, як наслідок, мають місце прояви послаблення масивів, а в деяких випадках – зсувні явища. Наочним прикладом інженерних викликів, з якими стикаються глибокі залізрудні кар'єри в умовах зміни гірничо-геологічних і економічних факторів, є кар'єри № 2-біс та №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» [11].

Новокриворізьке родовище залістих кварцитів розробляється кар'єром № 2-біс, а Валявкінське родовище – відповідно кар'єром № 3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Кар'єр №2-біс було введено в експлуатацію в 1970 році, а кар'єр №3 – у 1972 році. Проект, за яким було побудовано та введено в експлуатацію кар'єр №2-біс, було розроблено інститутом «Южгіпроруда» в 1968 році. Цим проектом була встановлена річна продуктивність кар'єру за сировою рудою в обсязі 4,0 млн. т сирової руди. В 1984 році виконано проект «Розкриття та підготовки Західної ділянки для підтримки потужності кар'єру № 2-біс НКГЗК». Розробка цього проекту була обумовлена вибуттям виробничих потужностей кар'єру № 2-біс в запроєктованих контурах його відпрацювання та необхідністю розширення кар'єру за рахунок розкриття нових ділянок. Відповідно до проекту 1984 р. продуктивність кар'єру за рудою була збільшена до 10,5 млн. т на рік у зв'язку зі зміною кондицій. З 1988 року до 1990 року робота кар'єру відбувалася на рівні, близькому до проектного. З 1993 року почався період погіршення роботи кар'єру. Так з 1993 року до 2000 року обсяги видобутку руди знизилися в 2-3 рази. При цьому обсяги виймання розкритих порід скоротилися в 6-10 разів. Після випрямлення руслу річки Інгулець гірничі роботи в кар'єрі були зосереджені біля західного борту, складеного рудою. У зв'язку з цим, в період з

1993 до 2000 року було видобуто 36,8 млн т руди при середньому коефіцієнті розкриття 0,23 м³/т [11, 12].

Погіршення роботи кар'єрів та порядок ведення гірничих робіт також призвів до зменшення фронту видобувних і розкривних робіт, ширини робочих площадок, готових до виїмки запасів руди і відставання робіт за розкритвом. У 2007 році ДП «ДП «Кривбаспроект» розроблено проект реконструкції і розвитку кар'єру № 2-біс для підтримки продуктивності з видобутку руди 10 млн т на рік на період до 2010 року. Проектом передбачалося досягнення в 2007 році проектної продуктивності кар'єру № 2-біс у розмірі 10,0 млн. т на рік за рахунок розширення бортів кар'єру та залученням додаткових рудних площ з мінімальним поглибленням. У 2011 році інститутом ТОВ «Южгіпроруда» був виконаний проект «Реконструкція і розвиток кар'єрів № 2-біс і № 3 гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» для підтримки продуктивності з видобутку сирової руди 30 млн тонн на рік на період до 2020 року». У проекті визначено оптимальний напрямок подальшого розвитку гірничих робіт і приведені технічні рішення з реконструкції транспортної схеми кар'єру до 2020 року. З 2016 року до сьогодні, коригування та виконання проектів з подальшої розробки Новокириворізького родовища залізистих кар'єром № 2-біс ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» кварцитів виконувало ПП «КРИВБАСАКАДЕМІНВЕСТ». На теперішній час гірничі роботи в кар'єрі № 2-біс ведуться згідно коригування проекту «Реконструкція та розвиток кар'єрів № 2-біс та № 3 гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» для підтримки продуктивності по видобутку сирової руди 30 млн. тонн в рік на період з 2020 р. – до кінця відпрацювання в Інгулецькому та Центрально- міському районах. Коригування геологічної та гірничої частини проекту», розробленого ТОВ «КАІ» в 2021 р [11, 12].

Проектні параметри бортів кар'єру прийняті відповідно до звіту ТОВ «НОВОТЕК-2» «Рекомендації щодо забезпечення стійкості укосів бортів кар'єрів» і забезпечують вимоги по максимальному вилученню корисних копалин. Проектні показники кар'єрів № 2-біс та №3 наведено в табл. 1.

Згідно актуального стану гірничих робіт, у кар'єрі №2-біс розкрито горизонт -210 м. Фактична глибина кар'єру складає 285 м. Розробка родовища ведеться уступами висотою: по м'яким і змішаним породам – 12 метрів; по скельних породах, що вимагають попереднього розпушення, – 15 метрів. Горизонти, складені наносами і змішаними породами (+78 м, +66 м, +54 м, +42 м, +30 м), в даний час вже відпрацьовані і перебувають на граничному контурі [12].

Таблиця 1

Проектні показники кар'єрів № 2-біс та №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Показник	Кар'єр № 2-біс	Кар'єр № 3
Проектна глибина кар'єру, м	455	500
Розміри кар'єру по верху в плані, м:		
довжина	2100	2200
ширина	1200	1450
Експлуатаційні запаси в проєктному контурі, на 01.01.2023 року, млн т	314 680,6	221 867,7
Промислові втрати, %	2,0	2,0
Засмічення, %	2,0	2,0

За минулий проєктний період гірничі роботи велися без розширення раніше сформованих меж кар'єру по поверхні. Основними напрямками розвитку гірничих робіт є східний, північний і південний борти кар'єру, а також поглиблення дна кар'єру. Фактичне положення гірничих робіт у кар'єрі № 2-біс представлено на рис. 1.

В даний час значну частину робочої зони кар'єру № 2-біс становлять ділянки тимчасово неробочих бортів із здвоєних уступів. Проведений гірничо-геометричний аналіз дозволив зробити висновок про можливість ведення гірничих робіт в кар'єрі № 2-біс із застосування ділянок тимчасово неробочих бортів, що дозволяють при стабільному видобутку руди частину розкривних робіт віднести на більш пізній період, що обумовлено економічною доцільністю. Ширина робочих площадок за рудою складає 33-50 м, а на уступах де виконується підготовка гірничої

маси до виймання (наявність бурових блоків) – ширина площадок сягає 80-100 м. Протяжність уступів з нормальною шириною площадки складає близько 900 метрів [12, 13].

Станом на кінець 2023 року у кар'єрі № 3 розкрито горизонт -315 м. Фактична глибина кар'єру складає 390 м. Фактичне положення гірничих робіт у кар'єрі № 3 представлено на рис. 2. Гірничі роботи зосереджені на нижніх горизонтах, сході, півдні а також на півночі кар'єру. Відповідно до гірничотранспортного обладнання, яке використовується, і фізико-механічних властивостей порід, що розробляються подальша розробка родовища передбачається уступами висотою 12-15 м. Горизонти наносів і змішаних гірських порід мають висоту 12 метрів (горизонти +90 м, +78 м, +66 м, +54 м, +42 м і +30 м). Нижче горизонту +30 м ведеться 15 метровими уступами, з подальшим здвоюванням скельних уступів при підході до кінцевого контуру. В робочій зоні кар'єру є наявність тимчасово неробочих ділянок з погашеними робочими бортами, висотою не більше 30 м, бермами безпеки шириною 10 м і уловлювальними бермами шириною 30 м.

Постановка завдання. З огляду на фактичне положення гірничих робіт в кар'єрах, а також доступні шляхи підвищення ефективності розробки Валяківського і Новокриворізького родовищ залізистих кварцитів завдання адаптації проектних положень гірничих робіт до оновлених гірничо-геологічних даних вбачається актуальною і важливою задачею.

Викладення матеріалу та результати. При розгляданні можливої оптимізації проектних контурів кар'єрів за основу були прийняті виконані геомеханічні розрахунки максимально допустимих кутів нахилу бортів, уступів та груп уступів кар'єру на підставі обґрунтованих фізико-механічних властивостей гірських порід, які складають бортові масиви. Такі розрахунки було проведено при виконанні НДР «Визначення геологічної будови, фізико-механічних властивостей та структурних особливостей масиву та визначення граничних кутів укосу бортів та уступів кар'єрів ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»», виконаної НДГРІ КНУ у 2023 році.

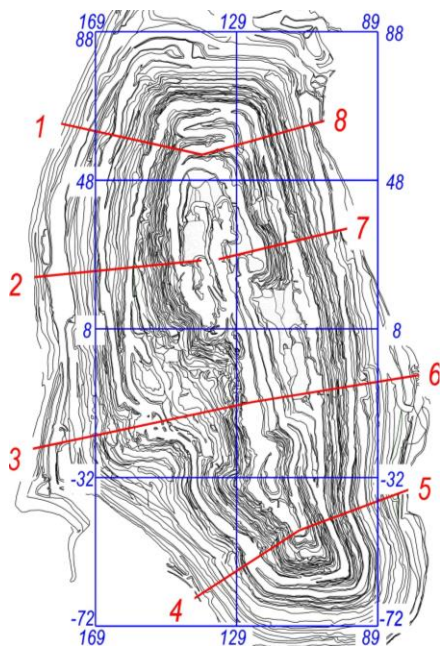


Рис. 1. Фактичне положення гірничих робіт станом на 01.07.2023 в кар'єрі №2-біс ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» із нанесенням розрахункових розрізів

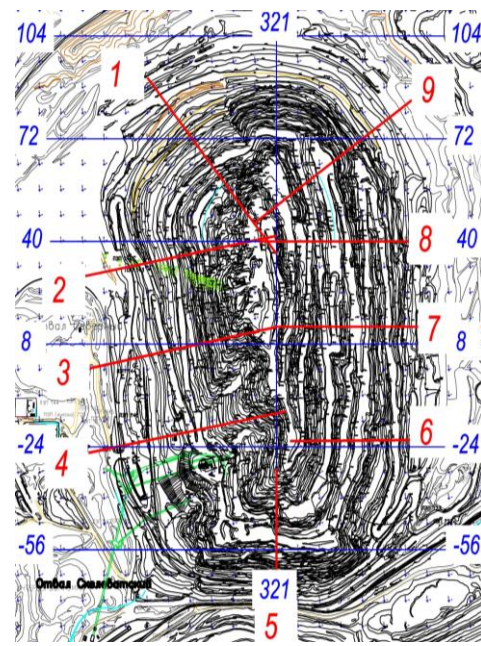


Рис. 2. Фактичне положення гірничих робіт станом на 01.07.2023 в кар'єрі №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» із нанесенням розрахункових розрізів

На підставі виконаних маркшейдерських розрахунків було визначена можливість збільшення кутів нахилу бортів кар'єру в тій їх частині, яка ще не досягла кінцевого проектного положення за розрахунковими розрізами, що для цього були визначені (табл. 2, 3).

Показники груп уступів та бортів кар'єру № 2-біс за розрахунковими розрізами після оптимізації проектного положення

№ розрізу	Розрахункова схема	Оптимізація проектного положення				
		висота борта, м	горизонти, м	кут укосу, град.	КЗС	зміщення нижньої брівки ділянки борта, м
1	V	188	-285 ÷ -97	55,0	1,25	16
2	V	300	-360 ÷ -60	47,0		16
3	V	333	-285 ÷ +45	33,6		18
4	V	269	-210 ÷ +60	35,8		20
5	V	97	-210 ÷ -113	48,0		20
6	V	179	-285 ÷ -106	51,0		17
7	V	270	-360 ÷ -90	53,0		16
8	V	227	-330 ÷ -103	48,0		16

Таблиця 3

Показники груп уступів та бортів кар'єру № 3 за розрахунковими розрізами після оптимізації проектного положення

№ розрізу	Розрахункова схема	Оптимізація проектного положення				
		висота борта, м	горизонти, м	кут укосу, град.	КЗС	зміщення нижньої брівки ділянки борта, м
1	X	246	-405 ÷ -159	53,0	1,25	16
2	X	210	-405 ÷ -195	54,0		17
3	X	140	-405 ÷ -265	48,0		18
4	X	355	-405 ÷ -60	48,5		17
5	V	482	-405 ÷ +75	45,9		16
6	V	320	-405 ÷ -85	48,0		16
7	V	320	-405 ÷ -85	48,0		16
8	V	320	-405 ÷ -85	46,0		16
9	V	278	-405 ÷ -127	44,0		16

Такі кути нахилу бортів кар'єру та груп уступів були визначені на підставі зниження коефіцієнту запасу стійкості до мінімально нормативного значення 1,25 згідно з Нормами технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин [14].

Можливість оптимізації затвердженого проектного положення бортів кар'єру була розглянута з дотриманням умови збереження визначеної, у діючому проекті, транспортної системи з використанням діючого на даний час у кар'єрі гірничого обладнання.

Аналіз положень уступів на затвердженому проектному контурі показав, що існують ділянки бортів, де кут укосу здвоєних уступів менше 70° , а ширина запобіжних берм – більше мінімально нормативної, яка встановлюється відповідно до Норм технологічного проектування та повинна складати не менше $1/3$ висоти уступу [14]. Тобто при висоті здвоєного уступу 30 м мінімально допустима ширина запобіжних берм повинна бути 10 м.

Враховуючи такий стан, оптимізація затвердженого проектного положення бортів кар'єру виконувалась або за рахунок збільшення кута укосу здвоєного уступу до 70° , або за рахунок зменшення ширини запобіжних берм до розміру мінімально нормативної величини, або шляхом використання обох підходів одночасно, якщо для цього існувала така можливість.

При цьому кут нахилу груп уступів та бортів кар'єру №2-біс витримували в тих межах, які були визначені при виконанні геомеханічних розрахунків стійкості та наведені в табл. 2. На підставі цього було визначено, що оптимізацію можливо виконати для частин північно-західного, західного, східного та північного бортів в інтервалі горизонтів з -375 м по -120 м. Якщо спиратися на розрахункові розрізи (рис. 1), то оптимізацію, в інтервалі вище вказаних горизонтів, можна виконати на підставі тільки 1, 2, 7 та 8 розрізів (в м.в. $0 \div 72$). На південному борті хоча і існують умови для оптимізації його затвердженого проектного положення, але це призводить

до збільшення обсягів розкривних порід, які набагато переважають обсяги руди, що, в свою чергу, вплине на збільшення коефіцієнту розкриття в цілому по кар'єру.

Щодо кар'єру №3, було визначено, що оптимізацію можливо виконати для південного, східного північного, західного та частково південно-західного бортів кар'єру в інтервалі горизонтів з -410 м по 0 м. Якщо спиратися на розрахункові розрізи (рис. 2), то оптимізацію, в інтервалі вище вказаних горизонтів, можна виконати на підставі всіх розрізів в маркшейдерських осях -72 ÷ 72. Стосовно горизонтів за якими можливо виконати оптимізацію затвердженого проектного положення бортів кар'єру можна сказати, що горизонти з -410 м по -330 м підлягали оптимізації на всіх бортах на всій їх протяжності. Горизонт -300 м підлягав оптимізації також на всіх бортах кар'єру окрім частини західного борту (цілику) в маркшейдерських осях 8 ÷ 32. Положення групи уступів з відмітки -270 м по -210 м оптимізувалося на північному та північно-західному бортах кар'єру в маркшейдерських осях 72 ÷ 24 та на південному та південно-східному бортах в маркшейдерських осях -56 ÷ -8. Положення групи уступів з відмітки -180 м по -120 м підлягало оптимізації на північному борту в маркшейдерських осях 72 ÷ 48 та південно-західному – в маркшейдерських осях -56 ÷ -64. Положення групи уступів з відмітки -90 м по ±0 м оптимізувалося на невеликій частині південно-західного борту в маркшейдерських осях -56 ÷ -72.

Висновки та напрямок подальших досліджень. В ході виконаних досліджень було проведено гірничо-геометричний аналіз кар'єрів №2-біс та №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». На базі проведених розрахунків геомеханічної стійкості масивів гірських порід було виявлено можливі зони оптимізації кінцевих контурів гірничих робіт. В результаті динамічного проектування кінцевих контурів кар'єру №2-біс було прирощено 5,2 млн. т руди при збільшенні обсягів розкриття на 209,9 тис. м³ при додатковому коефіцієнті розкриття 0,04 м³/т. Збільшення запасів по кар'єру №3 становило 22,1 млн. т руди, обсягів розкриття – 2,1 млн. м³ при додатковому коефіцієнті розкриття 0,1 м³/т.

Таким чином, було виконано адаптацію виробничих систем кар'єрів ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» до оновлених гірничо-геологічних факторів. В подальших наукових дослідженнях планується більш глибока імплементація принципів динамічного проектування із врахуванням економічних факторів.

Список літератури

1. **Hryhoriev Y.** Study of the impact of the open pit productivity on the economic indicators of mining development / Y. Hryhoriev, S. Lutsenko, A. Kuttybayev, A. Ermeckali, V. Shamrai // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science - 2023, vol. 1254, 012050
2. Про затвердження Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року : Закон України // Відомості Верховної Ради України від 17.05.2012. – № 44, стаття 457.
3. **Lutsenko. A. Sergey.** Open pits productivity control along with iron ore products demand variation / Lutsenko. A. Sergey/ Quality – Access to Success. – 2017. – vol. 18(S1) – С. 226-230.
4. **Григор'єв Ю.І.** Системні невідповідності за традиційного проектування залізрудних кар'єрів / С.О. Луценко, С.О. Жуков, Ю.І. Григор'єв, С.О. Федоренко // Гірничий вісник. – Кривий Ріг, 2023. - Вип. 111. – С.11-18.
5. **Луценко С.А.** Исследование влияния производительности карьера на экономические показатели разработки / С.А. Жуков, С.А. Луценко // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць, вип. 47. – Кривий Ріг, 2018. – С. 139-142.
6. **Hryhoriev Y.** Implementation of sustainable development approaches by creating the mining cluster: the case of MPP “Inguletskiy” / Y. Hryhoriev, S. Lutsenko, O. Systierov, A. Kuttybayev, A. Kuttybayeva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science - 2023, vol. 1254, 012055.
7. **Григор'єв Ю.І.** Цифровізація як інструмент адаптації гірничого виробництва у невизначеному динамічному середовищі (на прикладі впровадження K-MINE) / Ю. І. Григор'єв, І. Є. Григор'єв, С. В. Слюсар, В.А. Власенко // Вісник НУВГП. Технічні науки : зб. наук. праць. – Рівне : НУВГП, 2023. - Вип. 2(102). - С. 476-484.
8. **Hryhoriev Y.** Dominant Determinants of Adaptation of the Mining Complex in the Conditions of a Dynamic Environment / Y. Hryhoriev, S. Lutsenko, S. Joukov // «Inżynieria Mineralna». Journal of the Polish Mineral Engineering Society, No 1(51), - Kraków : 2023. - p. 15 – 22.
9. **Григорьев И.Е.** Системный подход к процессу проектирования горных объектов / И.Е. Григорьев, Ю.И. Григорьев // Разраб. рудн. месторожд., 2011. - Вип. №94. - С 40-44.
10. **Панченко В.В.** Анализ состояния и приоритетные направления повышения эффективности открытой разработки железорудных месторождений Украины / В.В. Панченко, А.В. Романенко // Матеріали міжнародної конференції „Форум гірників – 2016”. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2016. – С. 33–43.

11. Визначення геологічної будови, фізико-механічних властивостей та структурних особливостей масиву та визначення граничних кутів укосу бортів та уступів кар'єрів ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»: звіт про НДР / КНУ НДГРІ. – Кривий Ріг, 2023.

12. Пояснювальна записка до виробничої програми гірничого департаменту на 2023 рік. ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» – Кривий Ріг, 2022. – 93 с.

13. **Луценко С.О.** Дослідження впливу продуктивності кар'єру за рудою і параметрів системи розробки на інтенсивність відпрацювання родовища / С.А. Луценко, С.А. Жуков // Збірник наукових праць НГУ. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2019. - №58. - С. 68 - 75.

14. Норми технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин. Частина 2. Відкриті гірничі роботи. СОУ - Н МПП 73.020-078-2: 2008.

Рукопис подано до редакції 27.03.24

УДК 622.342.: 622.276

Г. І. ТКАЧЕНКО, Т. М. КОВАЛЬЧУК, кандидати техн. наук, доцентки,
М. В. МИХАЙЛЕНКО, магістрантка, Криворізький національний університет

ВПЛИВ ЯКОСТІ ПОДРІБНЕНОЇ ГІРНИЧОЇ МАСИ НА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ НА КАР'ЄРАХ КРИВБАСУ

Мета. Метою даної роботи є розроблення методики, яка дозволяє оперативно встановлювати залежність виробничих витрат на основні технологічні процеси гірничо-добувного виробництва від оптимального середнього розміру куска підірваної гірничої маси. Враховуючи те, що інтегральним показником кускуватості або гранулометричного складу є середній розмір куска гірничої маси в розвалі, використання даної методики дозволяє спрогнозувати та підвищити ефективність буро вибухових робіт на кар'єрах шляхом зниження витрат на виконання вантажно-транспортних робіт і додаткового подрібнення.

Методи дослідження. Поставлені в статті завдання базуються на комплексному методі досліджень, що включає: аналіз науково-дослідних робіт по буро вибуховим роботам на залізородних кар'єрах Кривбасу та їх моніторингу; результати інженерно-геологічних вишукувань залізородного родовища, використання емпіричних законів вибухових робіт; комп'ютерні технології й обчислювальні програми; оброблення результатів досліджень.

Наукова новизна дослідження полягає в комплексному підході до розроблення методики, яка дозволяє оперативно встановлювати емпіричні залежності виробничих питомих витрат на основні технологічні процеси в залізородному кар'єрі від оптимального середнього розміру куска підірваної гірничої маси. Доведено, що залежність суми питомих витрат на реалізацію розглянутих технологічних процесів від кускуватості має вигляд параболічної функції, точкою екстремуму якої є оптимальний діаметр середнього розміру куска підірваної гірничої маси.

Практичне значення. Отримані емпіричні залежності питомих витрат на: - буро вибухові роботи; руйнування негабариту; - на екскавацію; - на транспортування від середнього розміру куска підірваної гірничої маси дозволяють доповнити існуючі практичні рекомендації та надають реальні передумови щодо оптимізації технологічних процесів на кар'єрах Кривбасу.

Результати. Розроблено методику оперативного встановлення залежностей витрат на основні технологічні процеси гірничо-добувного виробництва від оптимального середнього розміру куска підірваної гірничої маси, яка спрямована на підвищення ефективності буро вибухових робіт на кар'єрах шляхом зниження витрат на виконання вантажно-транспортних робіт і додаткового подрібнення.

Ключові слова: відкриті гірничі роботи, вибухові роботи, подрібнення негабариту, кускуватість, питомі витрати, середній розмір куска підірваної гірничої маси

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-83-88

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Сучасний етап розвитку видобутку та переробки скельних порід характеризується бажанням підвищити ефективність технологічних процесів за рахунок більш якісного подрібнення гірських порід. Специфічною особливістю вибухових процесів у гірництві є те, що досліджуються процеси техногенного походження. При розробці залізородних родовищ, 80-90% гірничої маси представлено скельними породами, яку необхідно додатково дробити. Якість ведення вибухових робіт у гірництві визначається кускуватістю підірваної гірської породи, яка в значній мірі визначає змінну продуктивність гірничого та дробильного обладнання, обсяги добичі кар'єру, ритмічність роботи гірничо-добувного підприємства, продуктивність праці, собівартість залізної руди. Інтегральним показником кускуватості або гранулометричного складу є середній розмір куска гір-

ничої маси в розвалі. Даним параметром прийнято на практиці визначати техніко-економічні показники екскавації, транспортування та первинного подрібнення гірничої маси на кар'єрах.

Тому, на думку авторок цієї статті, розроблення методики, яка дозволяє оперативно встановлювати залежність витрат на основні технологічні процеси від оптимального середнього розміру куска підірваної гірничої маси, представляє практичний і науковий інтерес.

Аналіз досліджень і публікацій. Незважаючи на те, що питанню вибухових робіт на кар'єрах присвячено багато фундаментальних праць [1, 2] та великий комплекс науково-дослідних і практичних робіт [3 - 9], основною перешкодою на шляху зниження собівартості видобутої залізної руди є нерівномірне подрібнення, яке супроводжується значним виходом крупних кусків гірничої породи, тобто негабариту.

Виконаними дослідженнями встановлено, що найбільш енергоємними в кар'єрах є процеси середнього дроблення, питомі енерговитрати на які досягають 94,2 %. Решта 5,8 % займають: енерговитрати на буріння свердловин 0,4 %; вибухове руйнування масиву 4,9 %; механічне дроблення негабариту 0,5 % [11].

Тому управління якістю подрібнення з метою зниження собівартості залізорудної продукції є однією з найважливіших практичних задач. Найвагоміший внесок у вирішенні цих задач належить відомим криворізьким ученим: В.Ф. Бизову, Ю.П. Капленку, В.О. Колосову, В.В. Мецу Ю.С., В. В. Перегудову, П.Й. Федоренку, О.В. Шапуріну та ін.

У вітчизняних наукових працях багато робіт присвячено пошукам необхідної енергії, заряду для отримання гірничої маси заданої кускуватості під час висадження скельних гірських порід [4 –10]. Обґрунтовані та удосконалені вибухові речовини, розроблені раціональні схеми монтажу сітки свердловинних зарядів, їх конструкції, методи розрахунку параметрів вибухових робіт, але як показано в роботах [8,14] є кар'єри, для яких об'єм кусків, що перевищують кондицію за крупністю, складає 15-20 % від загальних обсягів підірваної гірничої породи.

Практично була доведена можливість регулювання ступеня дроблення порід за допомогою питомої енергії заряду вибухової речовини за будь-якого діаметра заряду. Забезпечення габаритності шматків відбитої породи потребує різноманітних методів ведення вибухових робіт, що визначається технологічною і економічною доцільністю. Так метод свердловинних зарядів при ініціюванні знизу дозволяє зниження виходу негабариту на 6–10 % і на 10–12 % – загальних витрат на проведення бурі вибухових робіт [5,15]. Технологічні фактори мають вплив на результати якості подрібнення відбитої породи, але теорія гірничої справи ще не має однозначного рішення проблеми визначення оптимальних лінійних розмірів кусків висадженої гірничої маси в розвалі.

В роботі [12] наведено ряд емпіричних формул, розроблених автором, які дозволяють спрогнозувати значення лінійних розмірів середніх кусків висадженої гірничої маси в розвалі, але всі вони містять розмір середнього структурного блоку в масиві, який важко визначити з високою точністю натурними вимірюваннями. Для уточнення його розмірів пропонується на різних ділянках кар'єрів регулярно виконувати натурні вимірювання, а при екскавації гірничої маси встановлювати кількість негабаритних кусків на 1000 м³ відвантаженої породи. Результат при цьому виявляється дробовим. В сучасних умовах використання таких методів для оперативного управління технологічними процесами на кар'єрах не зовсім доцільно, так як відсутня можливість врахувати всі фактори, які впливають на оцінку гранулометричного складу гірничої маси після вибуху. В роботі [13] встановлені залежності експлуатаційної продуктивності екскаватора ЕКГ-8І від якості подрібнення при різних коефіцієнтах використання. Одержані залежності питомих витрат на ремонт та утримання екскаваторів від середнього розміру куска в розвалі, а також загальних витрат на екскавацію разом із витратами на утримання обладнання. Авторами зазначено, що «це дозволить у подальшому використовувати більш глибокий аналіз всього технологічного ланцюга видобування руди, включаючи бурові і вибухові роботи, ліквідацію негабариту, транспортування руди».

В останні роки на базі теоретичних і експериментальних досліджень сформувався новий прогресивний напрямок у гірництві – комплексне моделювання з використанням комп'ютерних та інформаційних технологій, які дозволяють враховувати вплив достатньої кількості факторів на якість подрібнення гірничої маси з метою оптимізації параметрів технологічних процесів і зменшення витрат [11]. Різноманітність гірничо-геологічних умов залізрудних кар'єрів, мінливість параметрів бурі вибухових процесів, прийняття рішень в умовах невизначеності обумовлює певні труднощі в створенні чіткої теоретичної моделі, але у вищевказаному аналізі

останніх досліджень і публікацій закладені основи вирішення даної проблеми.

Постановка завдання. Все вищенаведене визначило мету роботи: підвищення ефективності основних технологічних процесів шляхом удосконалення методики визначення залежності оптимального середнього розміру куска підірваної гірничої маси від виробничих витрат.

Для досягнення поставленої мети був виконаний аналіз статистичної інформації щодо даних промислових вибухових робіт і техніко – економічних показників гірничо збагачувальних комбінатів Кривбасу. Кускуватість породи не є постійною величиною на певних етапах розробки, тому змінюється й степінь її впливу на ефективність і техніко - економічні показники окремих технологічних процесів в кар’єрі. Нами було виділено чотири основних види питомих витрат технологічних робіт, кожний з яких має специфічні вимоги до руйнування породи вибухом: буро вибухові роботи $S_{бвр}$; виймально - навантажувальні роботи $S_{секс}$; транспортування гірничої маси до пунктів призначення $S_{тр}$, що часто передбачає механічне подрібнення негабариту $S_{подр}$. Послідовність виконаних завдань наведено на структурній схемі досліджень (рис.1).

Викладення матеріалу та результати. У гірничій практиці розвал висадженої породи найкраще характеризується гранулометричним складом, який для різних гірничо-технологічних умов представляють декількома (від 3 до 7) фракціями крупності. Для відбудови різного роду залежностей вирішено використовувати однозначний показник, а саме - вміст негабариту або середній розмір куска зруйнованої гірничої породи. Останнім показником користуються частіше, оскільки при якісному руйнуванні породи вибухом негабарит не завжди присутній.

Були отримані емпіричні залежності наступних питомих витрат на: буро вибухові роботи; руйнування негабариту; - на екскавацію; - на транспортування від середнього розміру куска підірваної гірничої маси. Для обробки вихідних даних і побудови графіків використовувалась програма Microsoft Excel 2019.

Процес буріння не залежить від якості подрібнення гірничої породи. Його ефективність визначається наступними факторами: фізико-механічними властивостями гірничих порід, тріщинуватістю, підготовкою та технологією буро вибухових робіт. Інтенсивність подрібнення визначається змінними параметрами буро вибухових робіт: сіткою свердловин, питомими витратами вибухової речовини, виходом гірничої маси з одного погонного метра свердловини, питомими витратами буріння на одну тону підірваної гірничої маси і, як наслідок, витратами на обурювання підричних блоків. Залежність питомих витрат на буро вибухові роботи від середнього розміру куска підірваної гірничої маси представлена на рис.2.

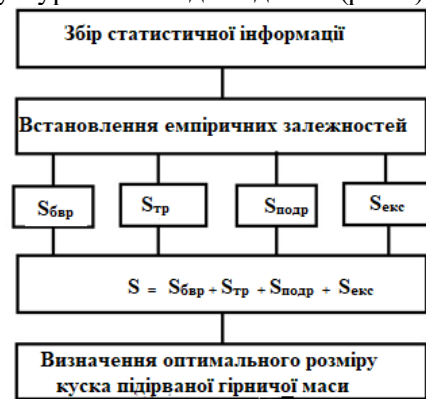


Рис.1. Структурна схема досліджень

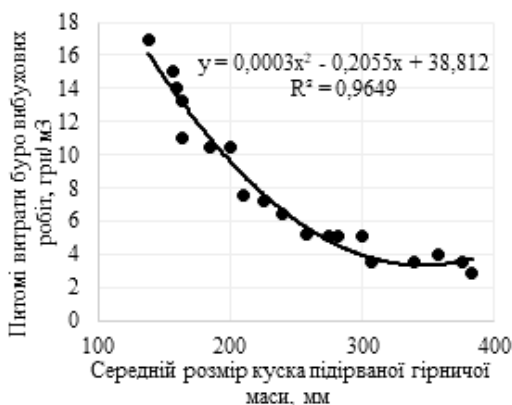


Рис.2. Залежність питомих витрат буро вибухових робіт від середнього розміру куска підірваної гірничої маси

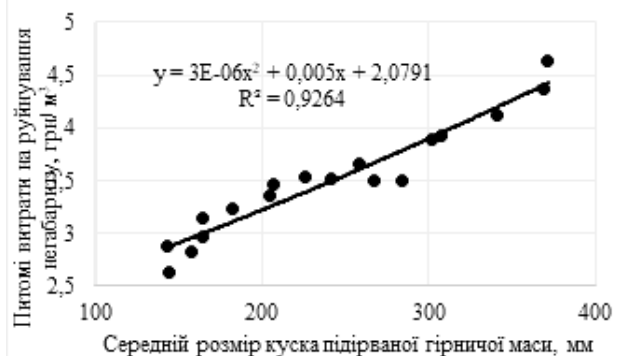


Рис.3. Залежність питомих витрат на руйнування негабариту від середнього розміру куска підірваної гірничої маси

Вимоги до якості подрібнення гірничої породи вибухом формуються на підставі геометричних параметрів використовуваного гірничого обладнання та енергетичних характеристик технологічних процесів [8,12,14] у кар’єрах. Геометричні характеристики обладнання визначають до-

пустимий розмір шматків висадженої породи. В ідеальному випадку негабарит має бути відсутнім, але це малоймовірно, тому при проектуванні буро вибухових робіт розрахунковий вихід негабариту не повинен складати більш 5%. Встановлено, що питомі витрати (зокрема, енергетичні) на подрібнення негабариту залежать не стільки від виходу негабаритних шматків породи, скільки від середнього розміру куска породи в розвалі підірваної гірничої маси (рис.3).

Негативні наслідки неякісного подрібнення і додаткові витрати часу мають місце і в наступних технологічних процесах. Так додаткове подрібнення негабариту у подальшому знижує продуктивність виймально – навантажувального обладнання.

Аналіз отриманих залежностей показує, що негативні наслідки неякісного подрібнення гірничої маси і додаткові витрати часу мають місце у всіх розглянутих технологічних процесах. Так додаткове подрібнення негабариту у подальшому знижує продуктивність виймально-навантажувального обладнання. При поганій якості дроблення збільшується вміст кусків негабариту, ускладнюється процес екскавації, зростає тривалість невиробничих витрат часу на підборку забою і відкидання негабариту. При цьому також зменшується коефіцієнт екскавації і підвищується спрацьовування обладнання. Враховуючи тісний взаємозв'язок всіх вищенаведених технологічних процесів в кар'єрі, вочевидь є те, що зниження продуктивності транспорту залежить від розглянутої продуктивності виймально – навантажувального обладнання. Підвищення питомих витрат на виймально – навантажувальний процес прямо пропорційний збільшенню середнього розміру кусків підірваної гірничої маси, що представлено графіком на рис.4.

Це призводить до збільшення простоїв транспорту під завантаження і зниження їх продуктивності. Залежність питомих витрат на транспортування гірничої породи від середнього розміру куска підірваної гірничої маси представлена на рис.5.

За допомогою спеціально створеної комп'ютерної програми, яка дозволяє оперативно змінювати вихідні дані техніко – економічних показників і задавати межі зміни діаметра середнього куска в розвалі підірваної гірничої маси, була встановлена узагальнена закономірність зміни сумарних витрат. Результати моделювання впливу середнього розміру куска висадженої гірничої породи на загальні питомі витрати та інтерфейс обчислювальної програми наведено на рис.6, 7. Отримана закономірність ґрунтується на комплексному врахуванні взаємозалежних технологічних факторів, які у подальшому впливають на показники подрібнення. Загальний графік уявляє собою параболічну функцію залежності суми питомих витрат на реалізацію розглянутих технологічних процесів від оптимального середнього розміру куска зруйнованої гірничої породи. Точкою екстремуму отриманої параболічної функції є шуканий показник – оптимальний діаметр середнього розміру куска зруйнованої гірничої породи. Мінімальне значення (екстремум функції) знаходиться в точці, що відповідає середньому розміру кусків і оптимальним питомим витратам. Використання цього результату надає більше можливостей для оперативного прийняття конкретних технологічних рішень.

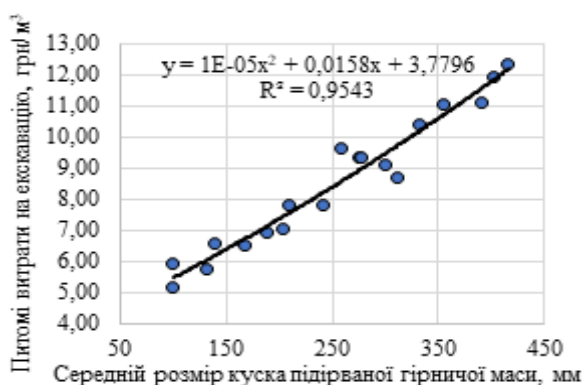


Рис.4. Залежність питомих витрат на екскавацію від середнього розміру куска підірваної гірничої маси

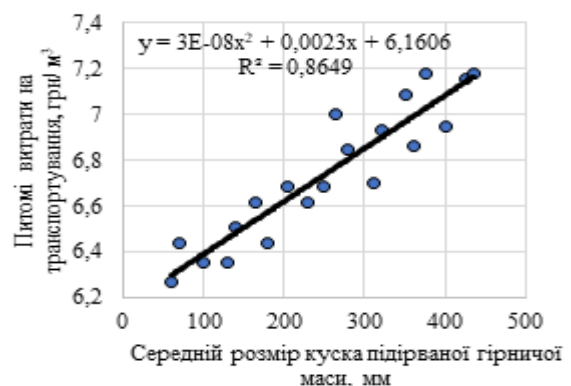


Рис.5. Залежність питомих витрат на транспортування від середнього розміру куска підірваної гірничої маси

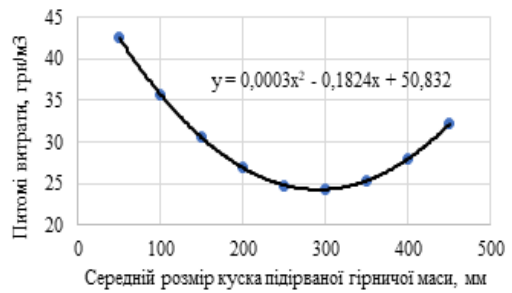


Рис.6. Залежність загальних питомих витрат від середнього розміру куска підірваної гірничої маси

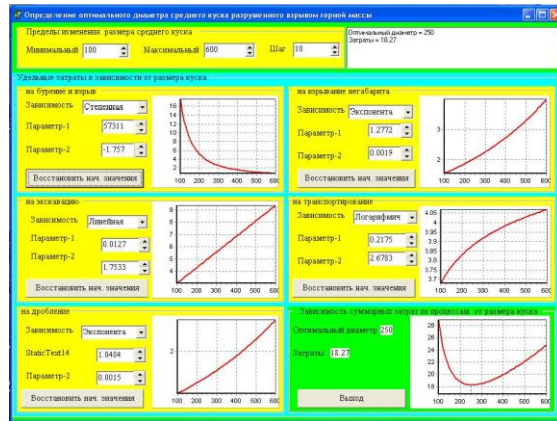


Рис.7. Інтерфейс обчислювальної програми

Висновки та напрямки подальших досліджень. Виконані дослідження по оперативному встановленню залежностей витрат на основні технологічні процеси гірничо- добувального виробництва від оптимального середнього розміру куска висадженої гірничої породи дозволяють підвищити ефективність буровибухових робіт на кар'єрах шляхом зниження витрат на виконання вантажно – транспортних робіт і додаткового подрібнення. В перспективі ці положення мають бути корисними для створення алгоритму оптимального управління комплексом буровибухових робіт на відкритих розробках рудних родовищ Кривбасу.

Список літератури

1. **Перебудов В.В., Жуков С.А.** Пути повышения качества взрывных работ при разрушении горных пород сложной структуры. Монография.- Кривой Рог: Издательский дом, ISBN 966-7388-47-6. 2002.-305 с.
2. **Дриженко А.Ю., Шустов О.О.** Відкриті гірничі роботи: терміни та їх визначення: навч. пос. – Д.: Національний гірничий університет, 2010. – 167 с.
3. **Ткаченко Г.І., Михайленко М.В., Несмашний Є.О.** Оперативне визначення відстані розльоту кусків гірської породи при масових вибухах на кар'єрах Кривбасу. Гірничий вісник : наук.-техн. зб. Кривий Ріг, 2022. Вип. 110. С. 141–145. doi:10.31721/2306-5435-2022-1-110-161-168
4. **Антонов О. В. Нестеренко, Г.І. Ткаченко.** Дія середовища при вибухових навантаженнях гірських порід // Развитие промышленности та суспільства: Міжнар. наук.-техн. конф. (м. Кр. Ріг, 26-28 травня 2021 р.): тези доп. - Кривий Ріг: КНУ, 2021. С. 43.
5. **Левіцький А.П.** Сучасний стан і основні напрями розвитку процесів вибухової руди підготовки на кар'єрах // Вісник ЖДТУ. - Житомир, 2015. - № 1(72). - С. 99-103.
6. Пат.103516 України, МПК F42D 3/04. Спосіб виконання буровибухових робіт / **Скачков А. А., Сергієнко С. Є., Шапурін О. В., Сидоренко В. Д.**; №201110513; опубл. 25.10.2013, Бюл. № 20. – 8 с. – Режим доступу: <http://uapatents.com/8-103516-sposibvikonannya-buro-vibukhovikh-robot.html>. ДП "Український інститут промислової власності".
7. Визначення параметрів вибухових робіт, що забезпечують сейсмічну безпеку об'єктів, які охороняються навколо кар'єра Південного ГЗК з урахуванням використання сучасних вибухових речовин та засобів вибуху // Звіт по НДР/КТУ. - №43/2-05 ГОК/10-742-08; Кер. **Несмашний Є.О.** – Кривий Ріг, 2008. – 47 с.
8. **Стрилець А. П., Пчолкин, Г. Д. Корняшик, С. И.** Исследование влияния дробления скальных горных пород на эффективность работы комплексов циклично-поточной технологии в карьерах Криворожского железорудного бассейна//Український гірничий форум. НГУ, Т.1. 2015. - Режим доступу: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/150525>
9. **Несмашний Є.О., Ткаченко Г.І., Скачков А.А., Перевертайло О.І.** Моніторинг сейсмічної безпеки масових вибухів на залізрудних кар'єрах Кривбасу. // Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. - Кривий Ріг: КТУ. - № 24. - 2009.- С.27 - 32.
10. **Несмашний Є.О., Ткаченко Г.І., Герасимова К.В.** Розроблення фізико-математичної моделі скочування бутів гірської породи з породних відкосів //Гірничий вісник. Науково-технічний збірник Криворізького національного університету. 2020. –Вип.107. – С. 101–106. web-сайт: iomining.in.ua/ua/homeua
11. **Купин А.И., Темченко А.А., Музыка И.О., Шиповский Г.В.** Оптимизация технологических процессов добычи и обогащения железных руд на основе применения комплексного моделирования. // Вісник Криворізького технічного університету. Збірник наукових праць. - Кривий Ріг: КТУ. - № 35. - 2013.- С.142 - 145.
12. **Шапурін А.В.** Взаимосвязи между параметрами расположения зарядов ВВ и кусковатостью горных пород во взрывном развале. Гірничий вісник: наук.-техн. зб. Кривий Ріг, 2019. Вип. 106. С. 48–54. doi: 10.31721/2306-5435-2019-1-106-48-55
13. **Швец С.М., Разкевич Ф.С.** Вплив якості подрібнення гірських порід на виймальне - навантажувальні роботи Развитие промышленности та суспільства: Развитие промышленности та суспільства : матеріали міжнар. наук.-техн. конф. : тези доповідей. Кривий Ріг, 2016. С. 24.

14. Караманов А.Н., Искандаров Ж.Р., Мардонов А. Хайитов О.Г. Оценка влияния качества взрыва на процессы открытых горных работ. VI Международная научно-практическая конференция. «Global science and innovations 2019: Central asia». Нур-Султан – 2019. IX Том. – С.79-82.

15. «Технічні правила ведення вибухових робіт на денній поверхні»: закон України від 05.08.2013р. № 1320/23852- Режим доступу: http://search.ligazakon.ua/l_doc2.nsf/link1/RE23852

Рукопис подано до редакції 26.02.24

УДК 62-192:621.333

І.В. ВОРОНЦОВ, магістрант, О.К. ДАНИЛЕЙКО, Г.В. КОЛОМІЦ, старші викладачі
Криворізький національний університет

РОЗРОБКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ ШТУЧНОГО ОСВІТЛЕННЯ ГОЛОВНОГО КОРПУСУ КРИВОРІЗЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ

Забезпечення якісного освітлення для нормальної роботи в приміщеннях університету є обов'язковим. Ефективне функціонування систем освітлення потребує розробки оптимальної системи керування, яка повинна відповідати потребам навчального закладу. В університеті передбачено фінансування розробки енергоефективного, надійного та якісного освітлення.

Проведено поточний аналіз діючої системи освітлення відповідно до норм і вимог КНУ. Діюча система освітлення Криворізького національного університету є застарілою. Тому було розроблено проект модернізації існуючої системи освітлення, який відповідає нормам.

Для впровадження оптимальної енергоефективної системи управління штучним освітленням був проведений аналіз діючої системи штучного освітлення КНУ.

Мета. Розробка нової енергоефективної системи освітлення головного корпусу КНУ.

Методи дослідження. Провести заміну застарілого фонду світлотехнічного обладнання; провести заміну схем живлення освітлювальних приладів; встановити окремий лічильник на систему живлення штучного освітлення та встановити апарати захисту на відповідні лінії джерел штучного освітлення. Обрання мікрохвильових датчиків присутності на основі ефекту Доплера та рівня освітлення в приміщенні.

Наукова новизна. Впровадження розробленої системи АСУ для систем освітлення КНУ. Дослідження процесів та схеми комутації в системах штучного освітлення, можливості одночасної роботи декількох датчиків присутності у головному корпусі Криворізького національного університету.

Практична значимість. Впровадження нової енергоефективної системи штучного освітлення головного корпусу Криворізького національного університету.

Результати. Зроблено аналіз системи освітлення головного корпусу Криворізького національного університету. В роботі було розглянуто можливість використання мікрохвильових датчиків для можливих варіантів побудови САУ. Досліджено ефективність використання САУ, зі врахуванням існуючих потреб. Розроблено та налагоджено пристрій керування для потреб головного корпусу КНУ. На основі проведених теоретичних та практичних досліджень роботи САУ сформовано рекомендації для модернізації діючої системи освітлення.

Ключові слова. Енергоефективність, система освітлення, схемотехнічні рішення, якість освітлення, економічність, світлотехнічне обладнання.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-88-95

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. До сьогоднішнього дня в Україні для освітлення приміщень достатньо широко використовують лампи з малим ККД. Люмінесцентні лампи неекологічні, тому що містять пари ртуті, а лампи розжарювання перетворюють в світлове випромінювання всього сім процентів від споживаної енергії. Тому є дві основні проблеми, які необхідно вирішити. Перша полягає в утилізації ламп, друга пов'язана з малою енергоефективністю.

Підвищення енергоефективності в системах освітлення головного корпусу КНУ є одним із механізмів для потенціальної економії електричної енергії. В статті проаналізовано сучасний стан діючої системи освітлення, та зроблені висновки, які дозволять розробити сучасну енергоефективну систему освітлення.

В Криворізькому національному університеті електрифікація аудиторій, лабораторій, приміщень загального використання відбувається за схемами електропостачання, які були використані при побудові головного корпусу. Окремої системи живлення освітлювальних приладів не існує. Використовуються лінії живлення до відповідних споживачів.

В коридорах головного корпусу університету встановлені різні види освітлювальних пристроїв. Так на перших трьох поверхах університету встановлені такі освітлювальні пристрої:

перший поверх – 55 освітлювальних пристроїв;

другий поверх – 92 освітлювальних пристрої;

третій поверх – 114 освітлювальних пристроїв.

В переважній більшості, використовуються світильники з люмінесцентними трубчатими лампами. Згідно діючого плану модернізації системи штучного освітлення, використовують світлодіодні лампи з типорозміром відповідним до люмінесцентних ламп. Інші освітлювальні прилади – це світлодіодні світильники типу «Armstrong», які використовують для часткової заміни застарілого світлотехнічного обладнання.

Незважаючи на рівень природнього освітлення, певна кількість освітлювальних пристроїв працює незалежно від потреби їх роботи. Через відсутність гнучкого керування мережею освітлення, майже цілодобово працює така кількість освітлювальних приладів:

на першому поверсі – 11 світильників;

на другому поверсі – 25 світильників;

на третьому поверсі – 38 світильників.

В означених освітлювальних пристроях, використовують люмінесцентні лампи OSRAM L36W/840[4] характеристики яких приведені на табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики люмінесцентних ламп OSRAM L36W/840	
Параметри	Назва лампи
	OSRAM L36W/840
Тип лампи;	Люмінесцентна
Потужність, Вт;	36
Цоколь;	G13
Робоча напруга, В;	220
Кольорова температура, К;	4000
Колірна температура освітлення;	Нейтральна
Світловий потік, лм;	3100
Термін роботи лампи, год.	13000

Також використовуються для їх заміни світлодіодні лампи VL-T8b-18124[5] та VL-T8b-09064[6] характеристики котрих представлені в табл. 2.

Таблиця 2

Параметри	Характеристики світлодіодні лампи VL-T8b-18124 та VL-T8b-09064	
	Назва лампи	
	VL-T8b-18124	VL-T8b-09064
Потужність, Вт;	18	9
Цоколь;	G13	G13
Колірна температура освітлення;	4100	4100
Робоча напруга, В;	82–265	82–265
Світловий потік, лм;	1800	900
Енергоефективність, лм/Вт;	100	100
Клас енергоефективності;	A+	A+
Кут розсіювання;	330°	330°
Термін роботи лампи, год;	30000	30000
Габарити, мм;	28x1200	28x600

Використовуються також світильники Armstrong LP112[7] (табл.3).

Таблиця 3

Технічні характеристики світильника типу Armstrong LP112	
Параметри	Назва світильника
	LP112
Потужність, Вт;	36
Робоча напруга, В;	220
Кольорова температура свічення, К;	4000
Світловий потік, лм;	2700
Тип розсіювача;	OPAL
Колірна температура освітлення;	Білий
Ступінь захисту;	IP20
Кут розсіювання;	120°

Викладення матеріалу та результати. В головному корпусі КНУ облік електричної енергії ведеться за допомогою одного лічильника. На показаннях цього лічильника базуються щомісячні звіти споживання електроенергії за минулий календарний місяць. Ці дані в подальшому можна використовувати в межах досліджень «Енергоаудит діючої системи освітлення головного корпусу КНУ».

Люмінесцентні лампи при виході з ладу, замінюють на більш енергоефективні та нові світлодіодні лампи відповідних типорозмірів. В даний час заміна застарілого типу ламп виконується дуже повільно, тому що змінюють тільки ті лампи, які вийшли із ладу. Частково це вирішує проблеми утилізації ламп.

Як було зазначено вище в університеті діє програма із заміни та модернізації світлотехнічного обладнання.

Розглянемо можливості підвищення енергоефективності системи освітлення за рахунок системи керування. Оптимальна система керування штучним освітленням дозволить зменшити витрати електричної енергії та автоматизує роботу мережі штучного освітлення за умовами:

відповідно до рівня природнього освітлення;

роботи в певні години доби;

з можливістю ввімкнення та вимкнення автоматизованих режимів;

можливість керування з використанням реакції інформаційних датчиків.

Пункти керування штучним освітленням можуть бути дистанційними або місцевими, в залежності від розміщення. При використанні системи з місцевою системою керування, ввімкнення та вимкнення приладів освітлення проводиться за допомогою апаратів комутації, які можуть будуть встановлені в кожному відповідному приміщенні, або на окремих освітлювальних ділянках.

Для об'єктів з великою площею, освітлювальні установки яких живяться окремими лініями від різних частин мережі, треба забезпечити дистанційне керуванням для кожної із ліній. Для цього потрібно встановити блоки керування, які знаходяться в межах одного або декількох пунктів управління.

Розглянемо можливі методи керування: місцеве індивідуальне і центральне дистанційне [9]

На рис. 1 схематично представлено варіанти можливого керування для мережі освітлення.

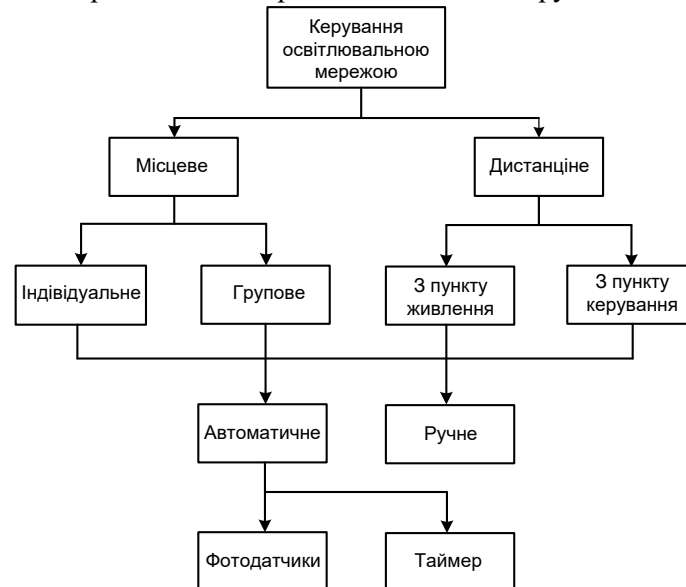


Рис. 1. Керування освітлювальною мережею

В умовах Криворізького національного університету найбільш доцільною для експлуатації є автоматизована система керування: місцева або дистанційна, яка керується з пункту управління. Реалізація базується на керуванні певними групами освітлювальних приладів.

При побудові системи автоматизованого освітлення слід обов'язково керуватися вимогами до штучного освітлення згідно законодавству України. Основні норми та вимоги до освітлення наведені в ДБН В. 2.5-28-2018.

Вибір комутаційних та освітлювальних приладів, можливих схем для реалізації автоматизації освітленням виконується згідно до нормативів. З урахуванням різних факторів, відповідно до заданих параметрів, враховуються вимоги до системи штучного освітлення та підтримки встановленого робочого режиму, з можливістю корегування.

На основі аналізу процесів в діючій системі керування штучним освітленням університету та можливих технічних рішень побудови системи автоматизації зроблено висновок, що в умовах університету для приміщень технічного призначення, оптимальним та ефективним буде використання місцевого групового керування. Для потреб аудиторних, лабораторних та інших приміщень слід використовувати систему дистанційного керування з пункту управління.

При розробці системи керування штучним освітленням враховані наступні фактори і обмеження:

наявність людей в зоні освітлення;

потреба у штучному освітленні для компенсації недостатнього рівня природнього освітлення.

Ці фактори є основними для системи автоматизації, яка повинна розрізняти та відповідно реагувати на них за запрограмованою логікою.

При модернізації діючої системи штучного освітлення має сенс додати блок керування штучним освітленням. Система розроблена з урахуванням використання наявної системи згідно до потреби в освітленості на певній обраній ділянці.

В системі можуть використовуватися наступні датчики:

датчик руху;

датчик звуку;

датчик перешкод;

датчик освітленості.

Датчик звуку KY-037[14], зовнішній вигляд представлено на рис. 2.



Рис.2. Зовнішній вигляд датчика KY-037: а - вигляд датчика KY-037 зверху; б - вигляд датчику KY-037 з боку

Датчик звуку KY-037 це універсальний модуль для виявлення звукових коливань та визначення змін при коливанні рівня навколишнього звуку. Чутливий капсульний модуль мікрофону, вбудований в датчик, та компаратор напруги, (наявні, як аналогові так і дискретні виходи) дають можливість використовувати модуль в різноманітних схемах керування та автоматизації.

Технічні характеристики датчика KY-037 наведені в табл. 4.

Датчик має такі переваги, як:

простота підключення;

можливість регулювання чутливості спрацювання;

порівняно невелика вартість.

Датчик наближення HW-201[15] зовнішній вигляд, якого представлений на рис. 3.

Для виявлення різних типів перешкод використовують датчик наближення HW-201. Він працює за принципом виміру променів інфрачервоних променів, які випромінюється вбудованим інфрачервоним світлодіодом, через приймач – фотодіод. Виміряну величину відбитого світлового потоку через компаратор порівнюють із сигналом, який заданий за допомогою вбудованого потенціометра

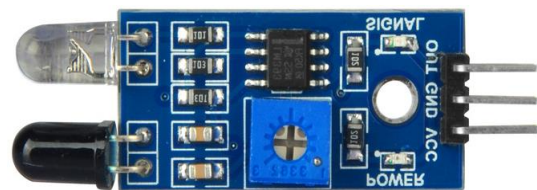


Рис. 3. Зовнішній вигляд датчика HW-201

Таблиця 4

Технічні характеристики датчика KY-037

Параметри	Датчик KY-037
Напруга живлення, В;	3,3 – 5,5
Датчик мікрофону, db;	-42 ± 3
Струм очікування, mA;	0,5
Габарити, мм;	15x36

і згідно до отриманого результату датчик змінює свій стан.

Таблиця 5
Технічні характеристики датчика HW-201

Параметри	Датчик HW-201
Напруга живлення, В;	3,3 – 5,5
Дистанція спрацювання, мм;	20 – 300
Кут відхилення;	35°
Габарити, мм;	31x14x7

Датчик має такі переваги:
простота підключення датчика;
можливість регулювання чутливості спрацювання датчика;
порівняно невелика вартість.

В основі роботи мікрохвильового датчику руху RCWL-0516[17] покладений ефект Доплера.

Ефект Доплера – це явище зміни частоти відбитої хвилі, коли джерело та відбивач рухаються один відносно другого, що дозволяє в свою чергу визначати рух навіть через певні перешкоди. Зовнішній вигляд датчику моделі RCWL-0516 наведено на рис. 4.

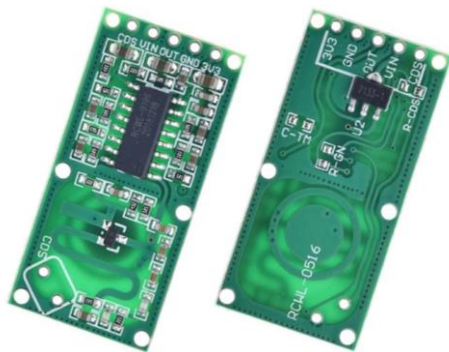


Рис. 4. Зовнішній вигляд датчика RCWL-0516

Таблиця 6
Технічні характеристики датчика RCWL-0516

Параметри	Датчик RCWL-0516
Напруга живлення, В	4 – 28
Струм в режимі очікування, мА	3
Дистанція спрацювання, мм	5
Кут відхилення	120°
Потужність передавача, мВт	20
Частота передавача, ГГц	5,8
Час блокування до наступного виміру, с	2
Напруга на виході при спрацюванні, В	3,2 – 3,4
Максимальний струм при спрацюванні, мА	100
Габарити, мм	17×36

Датчик має такі переваги:
простота підключення;
можливість регулювання часу затримки після спрацювання;
порівняно невелика вартість.

Його недоліки:

період в 10...15 секунд для самотестування, що триває при ввімкненні датчика.

Мікрохвильовий датчик руху HW-MS03[18] зовнішній вигляд, якого наведено на рис. 5.

Мікрохвильовий датчик руху HW-MS03 також базується на використанні ефекту Доплера.

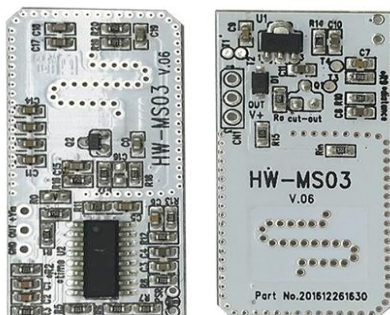


Рис. 5. Зовнішній вигляд датчика HW-MS03

Таблиця 7
Технічні характеристики датчика HW-MS03

Параметри	Датчик HW-MS03
Напруга живлення, В;	5 – 24
Струм в режимі очікування, мА;	5
Дистанція спрацювання, мм;	0,5
Кут відхилення;	360°
Частота передавача, ГГц;	10,525
Час блокування до наступного виміру, с;	2
Напруга на виході при спрацюванні, В;	3,3
Габарити, мм;	40x20x7

Датчик має такі переваги:
простота підключення датчика;
можливість регулювання часу затримки після спрацювання датчика;
порівняно невелика вартість.

Його недоліками є:

малий струм вихідного сигналу датчику, що потребує встановлення підсилювача рівня.

Датчик освітленості OKY3105[19] зовнішній вигляд, якого наведено на рис. 6.

В якості чутливого елемента у датчику використовується фоторезистор. Датчик освітленості працює за принципом порівняння отриманого рівня напруги на фоторезисторі та напруги з

потенціометра і залежно від результату порівняння перемикає свій стан. Його технічні характеристики наведені в табл. 8.

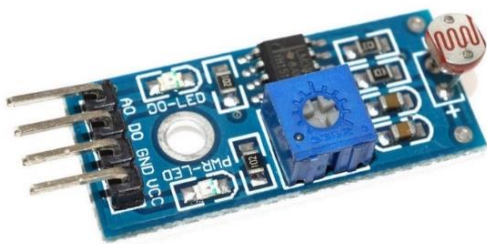


Рис. 6. Зовнішній вигляд датчика OKY3105

- Датчик має такі переваги:
- простота підключення датчика;
- можливість регулювання порогу спрацювання датчика;
- наявність аналогового виходу;
- порівняно невелика вартість.

Розглянемо схему САУ з використанням мікрохвильових датчиків, та датчика освітленості із використанням фоторезистора.

Розробка принципової схеми САУ проведена в програмному пакеті «EasyEDA». Обраний програмний пакет є безкоштовним програмним забезпеченням для конструювання та розробки електротехнічних схем і різноманітних електричних систем, та підготовки проекту для виготовлення друкованих плат. Програмний пакет дозволяє, як моделювати різні електричні схеми так і створювати файли для виготовлення друкованих плат.

На рис. 7 представлена схема з датчиком освітленості OKY3105 і мікрохвильовими датчиками HW-MS03 та RCWL-0516.

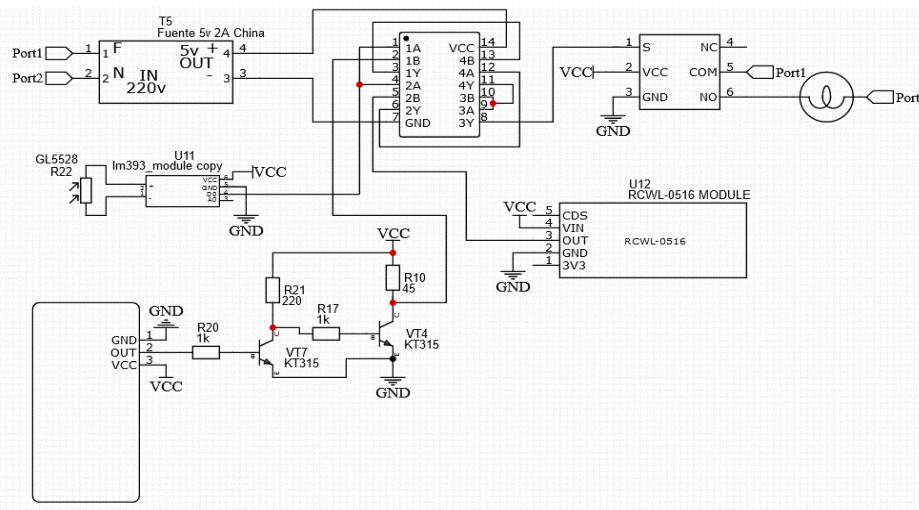


Рис. 7. Принципова схема з використанням датчика освітленості OKY3105 та мікрохвильовими датчиками HW-MS03 та RCWL-0516

Принцип роботи системи полягає в тому, що при спрацюванні одночасно двох інформаційних датчиків система повинна змінити стан керуючого реле з розімкненого на замкнений, що відповідно буде означати ввімкнення системою джерела освітлення. При використанні декількох груп реле, є можливість керувати, як декількома окремими освітлювальними приладами, так і керувати групами освітлювальних приладів.

Розроблена схема САУ є простою та надійною, при її побудові врахована потреба в паралельній роботі, як датчиків присутності так і датчиків освітленості, для більш оптимальної та енергоефективної роботи мережі освітлення університету.

В момент подачі живлення система подає напругу для живлення на датчики та керуючу логіку. В перші десять секунд від початку роботи, проводиться самотестування датчику RCWL-0516 після проведення якого система переходить до робочого режиму. На входи мік-

Таблиця 8

Технічні характеристики датчика OKY3105

Параметри	Датчик OKY3105
Напруга живлення, В;	3,5 – 5
Формат вихідного сигналу,	20 – 300
Час блокування до наступного виміру, сек;	35 ⁰
Струм виходу в режимі спрацювання, мА;	15
Габарити, мм;	17x36

росхеми K155ЛА3, надходять сигнали з датчику освітленості ОКУ3105, датчиків присутності RCWL-0516 та HW-MS03. Чутливим елементом датчика освітленості ОКУ3105 є фоторезистор, який виноситься за межі корпусу пристрою для визначення рівня навколишнього освітлення.

За умови присутності людей в зонах роботи датчиків руху, на їх виходах встановлюється потенціал логічної одиниці.

Після оброблення вхідних сигналів з датчиків, (тобто рух при низькому рівні освітлення) включається реле освітлювального приладу або їх групи, що залежить вже від типу схеми та їх комутації в межах освітлювальної мережі.

Побудована модель системи САУ, яка встановлена в аудиторії № 214 для дослідження роботи системи на ефективність та надійність. Реле системи підключено паралельно контактам вимикача для пари світильників. Модель системи зображена на рис. 8.



Рис. 8. Зовнішній вигляд зібраного пристрою

Висновки та напрямок подальших досліджень.

Проведений аналіз існуючої системи штучного освітлення КНУ показав її низьку енергоефективність, та необхідність її модернізації. Запропоновано використання керуючого пристрою з урахуванням присутності людей та існуючого рівня освітленості.

Для поліпшення інтелектуального рівня системи керування з урахуванням не робочих днів, відсутності студентів має сенс розробити варіант з використанням мікроконтролерів, годинника реального часу та SCADA системи.

Оскільки спроектована система не має можливості впливати на зміну рівня освітленості в плавному діапазоні, то потрібна обов'язкова заміна застарілого фонду освітлювального обладнання та переробка системи комутації ламп.

Список літератури

1. **Безпалько І. В.** Дослідження шляхів економії електричної енергії та енергозбереження в освітлювальних установках : звіт з н.-д. роботи. Вінниця : ВНТУ, 2011. 30 с.
2. Аудит системи освітлення URL: http://sites.kpi.kharkov.ua/es/data/_uploaded/file/Methods/34_meto.pdf (дата звернення: 24.11.2023).
3. ДБН В.2.5-28:2018. Державні будівельні норми України «Природне і штучне освітлення». На заміну ДБН В.2.5-28-2006 ; чинний від 2019-03-01. Вид. офіц. Київ : Укрархбудінформ, 2018. 132 с.
4. Освітлювальні прилади: класифікація. Рекомендації по вибору - Prometr - Помощник в строительстве и ремонте. URL: <https://prometr.com.ua/stroitelstvo/osv-tlyuval-n-priladi-klasif-kac-ya-rekomendac-po-viboru/> (дата звернення: 24.11.2023).
5. Сучасні Технології Освітлення, Тенденції Сучасного Освітлення. *Brille Інтернет Магазин Освітлення № 1 В Україні | Brille.* URL: <https://www.brille.ua/ua/sovremennye-tehnologii-v-osveshchenii/> (дата звернення: 24.11.2023).
6. Нормування і розрахунок висвітлення. *StudLancer.* URL: https://stud.com.ua/14375/bzhd/normuvannya_rozrahunok_visvitlennya (дата звернення: 24.11.2023).
7. 2.3.3. Штучне освітлення, нормування. *Навчально-науковий центр перепідготовки та заочного навчання ННЦПЗН НУ "Чернігівська політехніка".* URL: <https://cpo.stu.cn.ua/Oksana/posibnik/770.html> (дата звернення: 24.11.2023).
8. Про порядок нормування питомих витрат паливно-енергетичних ресурсів у суспільному виробництві : Постанова Каб. Міністрів України від 15.07.1997 р. № 786 : станом на 14 січ. 2020 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/786-97-п#Text> (дата звернення: 28.11.2023).
9. **Мандрика А. С.** та ін. Енергоефективні технології : навч. посіб. Суми : СумДУ, 2021. 330 с. ISBN 978-966-657-884-9
10. 9. Експлуатація і ремонт освітлювальних установок. *StudFiles.* URL: <https://studfile.net/preview/5286568/page:3/> (дата звернення: 24.11.2023).
11. 2.8 Керування освітленням. *StudFiles.* URL: <https://studfile.net/preview/3741598/page:8> (дата звернення: 24.11.2023).
12. Реферат «Економія електроенергії». *Библиотека учебной информации.* URL: https://www.kyrator.com.ua/index.php?option=com_content&view=article&id=54:ekonomiya-elenergii&catid=20&Itemid=123&limitstart=1 (дата звернення: 24.11.2023).
13. Порівняння типів ламп. Які лампочки вибрати?. *Лучшее осветительное оборудование для растений и улиц.* URL: <https://beamlight.com.ua/425> (дата звернення: 24.11.2023).
14. Настінний датчик руху для увімкнення світла настінний LM629 180° білий. *prom.ua.* URL: <https://prom.ua/ua/p/720364281-nastennyj-datchik-dvizheniya.html> (дата звернення: 24.11.2023).

15. Датчик руху мікрохвильовий Luxel IP20 3-2000 LUX (MW-07W). *prom.ua*. URL: <https://prom.ua/ua/p1431469725-datchik-ruhu-mikrohvilovij.html> (дата звернення: 24.11.2023).
16. CONTROLLER-3 пульт управління освітленням. *Horoz Electric Україна*. URL: <https://horozelectric.com.ua/controller-3> (дата звернення: 24.11.2023).
17. Салім М. С. Розробка приладу керування освітленням в приміщеннях : дипл. пр-т на здобуття наук. ступеня бакалавра. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ, 2020. 85 с.
18. Комплект для Розумного будинку Zipato Light Kit Zipato. *Secur*. URL: <https://secur.ua/umny-dom/complsmh/komplekt-dlja-umnogo-doma-zipato-light-kit> (дата звернення: 24.11.2023).
19. Учасники проєктів Вікімедіа. SCADA – Вікіпедія. *Вікіпедія*. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/SCADA> (дата звернення: 24.11.2023).
20. KEPServerEX. *СОЛІТОН*. URL: <https://www.soliton.com.ua/systems-kepsserverex.html> (дата звернення: 24.11.2023).
21. Поперечний П. В. Методи та засоби апаратно-програмної підтримки мікроконтролерів STM32. Вінниця, 2016. 2 с.
22. Real Time Clock Модуль (DS1307). *Arduino в Україні*. URL: <https://arduino.ua/ru/prod22-real-time-clock-modul-s-batareiko-ds1307> (дата звернення: 24.11.2023).
23. Розрахунок освітленості виробничого приміщення. Штучне освітлення. *Навч.-наук. центр перепідгот. та заочн. навч. ННЦПЗН НУ "Чернігівська політехніка"*. URL: https://cpo.stu.cn.ua/Oksana/rozrah_rozd_OP_DP_bak_spec_mag/80.html (дата звернення: 24.11.2023).
24. Орієнтовні значення коефіцієнтів відбиття р. *StudFiles*. URL: <https://studfile.net/preview/2449248/page:5/> (дата звернення: 24.11.2023).
25. Калькулятори розрахунку освітленості приміщення - Ekobil. *Ekobil*. URL: <http://ekobil.com.ua/kalkulyatori-rozrahunku-osvitlenosti-primishheniya/> (дата звернення: 24.11.2023).

Рукопис подано до редакції 28.03.24

УДК 622.7

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук, проф., М.М. ВІЛЬГЕЛЬМ, аспірант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ УМОВ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ЖИВЛЕННЯ ОБЕРНЕНОЇ ФЛОТАЦІЇ МАГНЕТИТУ

Мета. Метою даних досліджень є оцінка можливості формування оптимального живлення оберненої флотації магнетиту. Огляд існуючих досліджень у цьому напрямку для вирішення даної проблеми. Проведення глибокого мінералого-петрографічного вивчення явища флокуляції для вирішення поставленої мети.

Методи дослідження. При проведенні досліджень застосовувались наступні методи: наукове вивчення та узагальнення матеріалу в рамках існуючої проблеми; експериментальні – мінералого-петрографічне вивчення механізмів флокуляції, мінерального складу продуктів; теоретичні - доцільність застосування існуючих методів збагачення для зменшення явища флокуляції та підвищення технологічних характеристик продуктів.

Наукова новизна. У ході мінералого-петрографічних досліджень встановлено залежності кількості флокул по класам крупності та виконана можливість впливу зниження явища флокуляції на вміст заліза. Визначені залежності надають можливість їх використання у якості вихідних даних для створення математичних моделей.

Практичне значення. В рамках досліджень отримані наступні дані:

максимальна кількість флокул знаходиться у класах крупності $-0,04+0,02$ мм та $-0,02$ мм відповідно: 98% та 99% - у живленні флотації та 92% та 99% - у пінному продукті;

максимальна частка заліза сконцентрована у дрібних класах крупності $-0,04+0,02$ мм та $-0,02$ мм: живлення флотації – 46,5% / 64,6%; пінний продукт – 24,4% / 48,7%;

за рахунок введення операцій розмагнічування та тонкого грохочення очікується підвищення виходу концентрату на 2-4% та масової частки заліза на 0,7-0,9%.

Використання наведених даних у якості даних для математичного моделювання та розробки дозволяє на даному етапі спрогнозувати майбутню доцільність.

Практична значущість також може бути оцінена внаслідок проведення промислових випробувань, з використанням однієї операції розмагнічування, або в комбінації з тонким грохоченням та отриманням натурних технологічних показників.

Результати. В рамках досліджень проведено детальне вивчення явища флокуляції. Отримані результати підтверджують доцільність застосування додаткових методів збагачення для підготовки сировини для флотаційного доведення та розробки нових схем з отриманням продукції з підвищеними якісними характеристиками. Дані отримані в ході дослідження є основою для побудови математичних моделей.

Ключові слова: живлення флотації, продукт пінний, мінеральний склад, флокули, флотація.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Флотаційна доводка є одною з передових технологій збагачення корисних копалин. Вона має ряд переваг над іншими методами, а саме:

висока ефективність: флотація дозволяє отримати концентрат з високим вмістом корисного компоненту, що особливо важливо для бідних руд;

можливість переробки тонкодисперсної сировини: флотація ефективно працює з дрібними частинками, які важко піддаються збагаченню іншими методами;

широкий спектр застосування: флотація може використовуватися для збагачення різних типів руд, включаючи залізні, мідні, свинцево-цинкові, золотоносні та інші;

екологічність: сучасні флотаційні методи мінімізують вплив на навколишнє середовище за рахунок використання реагентів з низькою токсичністю та замкнутих циклів водопостачання.

Для магнетитових концентратів, отриманих з бідних магнетитових руд (магнетитових кварцитів) застосовується обернена флотація. Тобто флотується кварц, який переходить у пінний продукт, а камерний продукт є кінцевою продукцією [1-3].

Підготовка матеріалу для процесу флотації носить дуже важливий характер та залежить від ряду факторів, таких як характеристика руд та концентратів, властивості пульпи, тип та характеристика флотаційних машин, вид та дозування реагентів та ін.

Детальне вивчення характеристик живлення флотації таких, як розмір та форма частинок, мінеральний склад, здатність до флокуляції (коагуляції) дозволяють сформувавши оптимальні умови флотації та отримати параметри для її удосконалення.

Аналіз досліджень і публікацій. Флотаційне доведення магнетитового концентрату ускладнюється за рахунок присутності залишкової намагніченості матеріалу від попереднього переділу збагачення (магнітної сепарації). Суттєвим недоліком магнітної сепарації є те, що частинки запам'ятовують вплив магнітного поля у вигляді залишкової індукції, що призводить до їхнього об'єднання в агрегати і флокули. В результаті наступні переміщення стають менш ефективними, і при малих змістах нерудних частинок практично виключають отримання чистих концентратів [4].

Щоб відновити первісні магнітні властивості частинок, рекомендується їх розмагнічувати у потоці пульпи. Ця операція значно підвищує ефективність подальших процесів збагачення.

Матеріали наведені в [5-7] свідчать про ефективність операції розмагнічування для магнетитової сировини.

У [6] зазначено, що раціональна частота загасаючих коливань розмагнічувального магнітного поля має бути вищою за 500 Гц. У цьому разі ефектом обертання частинок у цьому полі можна знехтувати.

Прикладом ефективності операції розмагнічування матеріалу є результати випробувань високочастотного грохота корпорації "Деррік" на концентраті першої стадії ММС у схемах без розмагнічувального апарату і з розмагнічувальною котушкою. Використання в технологічній схемі розмагнічувального апарату дало змогу збільшити вихід підрешетного продукту на 17 % (з 34 до 51 %). Витяг класу -0,07 +0 мм у підрешітний продукт зросло на 28,9 % (з 60,7 до 89,6 %), а ефективність грохочення - на 19,7 % (з 44,2 до 63,9 %). У підсумку вміст заліза в концентраті другої стадії ММС підвищився на 2,09 % (до 60,3 %), а вихід - на 0,9 % (до 62,76 %) [8].

Зазвичай вивчення застосування операції розмагнічування виконується шляхом фотофіксації та оцінки до розмагнічування та з розмагнічуванням [5,6,7]. На фото наведено вихідний магнетитовий концентрат (рис. 1а). Зміни матеріалу відбуваються під впливом змінного поля від 5,6 кА/м (рис. 1б) до 24 кА/м (рис. 1в). Результати досліджень свідчать про те, що розпад флокул, відділення частинок з флокули починається в полі з напруженістю, що дорівнює коерцитивній силі; в полі з вищою напруженістю процес прискорюється (рис. 1).



Рис.1. Дефлокуляція продуктів

Оскільки продукти збагачення у технологічній схемі, близькі за магнітними характеристиками, істотних відмінностей у характері флокуляції не відмічається.

Зниження вмісту заліза зі зростанням крупності частинок закономірно призводить до зниження явища флокуляції за рахунок зменшення магнітних характеристик [9].

Явище флокуляції негативно впливає на процеси збагачення та спричиняє втрати корисного компонента у відходах тому потребує детального вивчення.

Суто, як процес, флокуляція - це процес коагуляції, під час якого укрупнені частинки дисперсної фази утворюють великі, пухкі пластівчасті агрегати, які називаються флокулами [10]. Ці флокули мають здатність швидко осідати або спливати [11].

Силами коагуляції є сили, які визвані наступними впливами:

полями електричної природи;

ультразвуком;

броунівським рухом;

силами тяжіння Ван-дер-Ваальса [12].

У зарубіжній літературі з колоїдної хімії терміни coagulation і flocculation часто розглядають як синоніми. У вітчизняних виданнях флокуляцію прийнято вважати одним із видів коагуляції.

У [13] відмічено широкий круг факторів, які впливають на магнітну коагуляцію, а саме: магнітні поля (постійні та змінні, $grad H$, тривалість дії); частинки матеріалу (дисперсність, форма, магнітні властивості, питома вага, властивості поверхні); дисперсна середа (щільність, змочуваність, в'язкість). Змінення значень одного із факторів нелінійно взаємопов'язано зі зміною багатьох інших факторів. Вивчення вища магнітної флокуляції виконано методом програмного та математичного моделювання шляхом формалізації процесу методами класичної фізики та математики.

Аналіз публікацій говорить про те, що формування оптимального живлення для будь якого переділу носить важливий характер. Тобто визначення оптимальних умов формування живлення флотації є актуальним та доцільним.

В рамках роботи, яка виконується, нами пропонується застосування операції розмагнічування для руйнування флокул та тонкого грохочення для вирішення двох завдань – відсіювання класу мінус 0,044 мм, який містить розкриті мінеральні частинки та за рахунок вібрації зруйнувати не міцні зв'язки між коагульованими частинками. Процес тонкого грохочення заснований на використанні вібрації та гравітаційних сил, що забезпечує ефективне сортування навіть за малих відмінностей у розмірах частинок [14].

Постановка задачі. Метою даних досліджень є оцінка умов формування оптимального живлення для оберненої флотації магнетиту на підставі детального вивчення мінерального складу та оцінки розміру частинок з використанням петрографічного та тринокулярного мікроскопів. Встановлення залежностей формування мінеральних флокул в продуктах збагачення для розуміння можливих подальших шляхів руйнування скоагульованих неселективних утворень.

Викладення матеріалу та результати. На Інгулецькому гірничо-збагачувальному комбінаті застосовано доведення магнетитового концентрату, отриманого по магнітній схемі, методом оберненої флотації. Флотація частково працює в замкненому циклі. Тобто пінний продукт у діючій схемі доводиться на дільницях двоступеневої магнітної сепарації та дешламації та у вигляді циркуляції додається у живлення флотації однієї або двох флотаційних машин РІФ-25.

Предметом дослідження є вивчення живлення флотації ПРАТ «ІНГЗК» та пінного продуктів флотації з метою розгляду можливості виведення продуктів технологічної схеми в окремі цикли, удосконалення існуючої схеми та розробки нових схем.

Принципова схема ПРАТ «ПІВНГЗК» під час відбору продуктів, які є предметом дослідження наведена на рис. 2.



Рис.2. Принципова схема

Живленням флотації є магнетитовий концентрат з вмістом заліза на рівні 61,0 %. На рис. 3 наведено мінеральний склад живлення флотації. Проба в переважній більшості представлена магнетитом та кварцем. Також присутні зерна кумінгтоніту (рис. 3в) та актиноліту (рис. 3г).

Для живлення флотації характерно наявність високої кількості флокул і скоагульованих частинок. Так ввідсоток магнетиту у складі магнітних флокул варіює від 72% до 90%. В пробі відмічається незначна кількість чистого кварцу. В основному, кварц містить включення магнетиту, іноді у вигляді тонких смуг і прошарків.

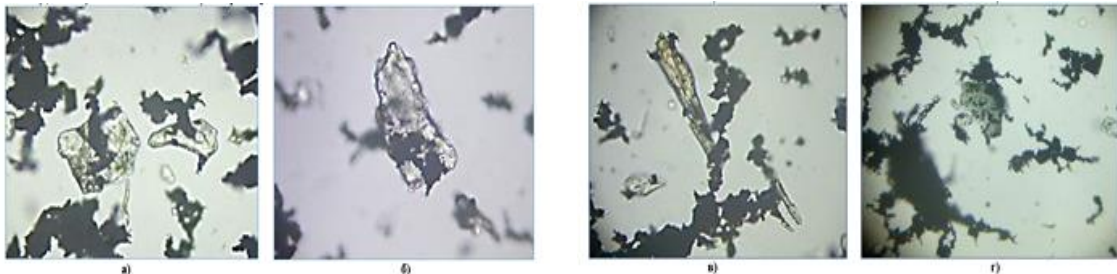


Рис.3. Мінеральний склад живлення флотації (петрографічний мікроскоп, імерсійний препарат. Збільшення: а, г - 400 \times ; б, в - 170 \times): а, б – магнетит (чорний), кварц (не забарвлений); в – кумінгтоніт (зеленувато-жовтий), кварц, магнетит; г – актиноліт (блідо-зелений), магнетит, кварц

Флокули та скоагульовані частинки в живленні флотації мають різні зовнішні форми, а саме виділяються кулясті, ланцюжкові, кільцеві, крабовидні та змішані (рис. 4). Флокуляція негативно впливає на флотаційне збагачення, знижуючи якість концентрату через забруднення його пустою породою.

Утворення флокул та скоагульованих частинок обумовлено попередніми операціями. За рахунок залишкової намагніченості дрібні частинки об'єднуються у значні флокули. Розмір та вага флокул значно більші, ніж окремих частинок, з яких вони складаються і можуть сягати 0,40 мм, при розмірі окремих часточок меншому за 0,0025 мм.

Явище флокуляції зберігається і для пінного продукту. У продукті наявні більш дрібні флокули і окремі скоагульовані мінеральні утворення - мінеральні часточки прилипають до крупних флокул. Основні мінерали пінного продукту: кварц, кумінгтоніт, актиноліт значно більші за розміром, ніж (переподрібнений) магнетит. Розміри кварцу у десятки разів перевищують розміри магнетиту. Кварц – 0,1-0,12 мм, магнетит – 0,01-0,03 мм, але магнетит повністю сфлокульований. Розмір флокул, особливо ланцюжкових сягає 0,2-0,3 мм, і вони переважають за розмірами виділення кварцу.

Флокуляція магнетиту з більшими за розміром зернами кварцу і силікатів та складна розгалужена морфологія флокул спричиняють значні втрати заліза у пінному продукті (рис. 5).

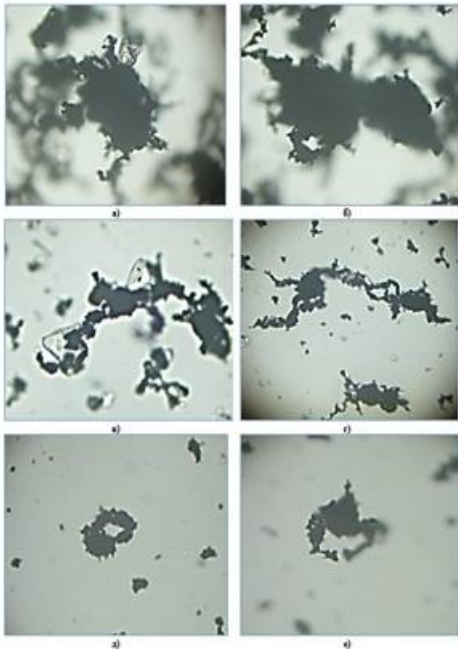


Рис.4. Магнітні флокули, утворені відокремленими часточками у складі живлення флотації (петрографічний мікроскоп, імерсійний препарат. Збільшення: *a, б* - 270^X; *в* - 350^X; *г* - 150^X; *д, е* - 400^X): *a, б* - кулясті; *в, г* - відовжені, ланцюжкові з зернами кварцу; *д* - кільцева; *г* - крабовидна

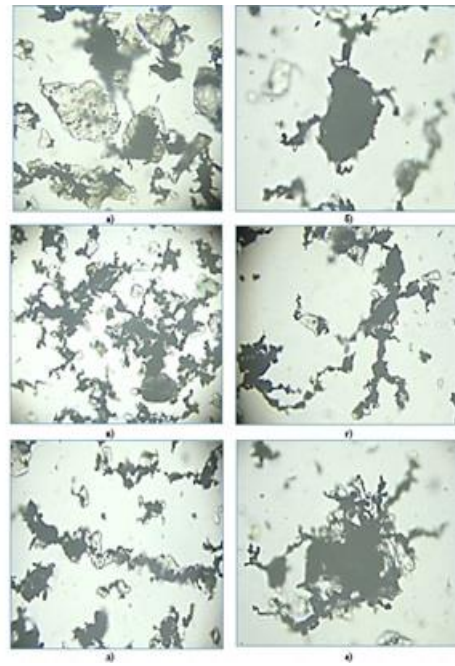


Рис.5. Особливості виділень магнетиту (чорне) у пінному продукті (петрографічний мікроскоп, імерсійний препарат. Збільшення: *a, в, д* - 200 X; *б, г* - 375X; *е* - 400X): *a* - різні за розміром рудні вclusions у кварці і силікатах; *б* - куляста магнітна флокула з тонкими відгалуженнями; *в, г* - розгалужені флокули; *д* - ланцюжкова кварц-магнетитова флокула, кварц містить дрібні вclusions магнетиту; *е* - складна кварц-магнетитова флокула

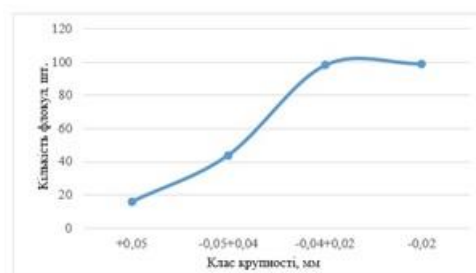
На рис. 6 наведено залежності кількості флокул і частинок-коагулянтів за класами крупності в живленні та пінному продукті флотації. Графіки свідчать про те, що залежність зберігається для обох продуктів. Максимальна кількість флокул і скоагульованих частинок знаходиться у класах крупності $-0,04+0,02$ мм та $-0,02$ мм.

Авторами [15] явище флокуляції досліджено на пінному продукті. Зниження флокуляції оцінювалось по вмісту заліза. Введення операції розмагнічування пінного продукту з наступною операцією магнітної сепарації дозволило підвищити вміст заліза на 6,42 % (з 40,6 до 47,02 %), що вище на 2,52 % в продукті без операції розмагнічування в лабораторних умовах (з 40,6 до 44,5%). Даний експеримент підтверджує можливість застосування даної операції для живлення флотації і як наслідок підвищенню вмісту заліза в сировині для подальшого переділу.

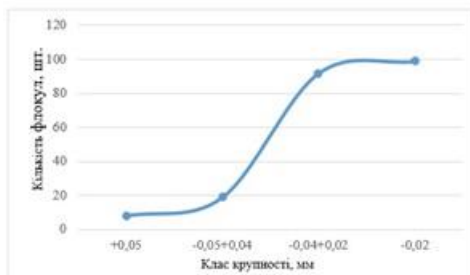
Аналіз гранулометричного складу та заліза по класам крупності наведений на рис. 7 показує концентрування більш високого вмісту заліза у дрібних класах крупності як у живленні флотації так і у пінному продукті. Введення операції грохочення з високою ефективністю по класу 0,040-0,053 мм дозволить вивести в підрешітний продукт багатий матеріал та розвантажити наступні операції. Ця операція дозволить додатково зменшити остаточний ефект флокуляції за рахунок вібрації, а також підвищити вміст заліза для наступного переділу.

Доцільність застосування вібраційного грохоту також пов'язано з комбінацією механізмів поділу на грохоті. Основний механізм поділу йде по крупності, але частково поділ також відбувається за щільністю. Щільність пов'язана із сегрегацією і гідравлічним характером переміщення частинок по поверхні грохоту і в підрешітний продукт. Як наслідок буде відбуватись підвищення масової частки заліза в підрешітному продукті.

Наведені результати досліджень свідчать про доцільність застосування операцій розмагнічування та тонкого грохочення для зниження явища флокуляції як у живленні флотації так і у пінному продукті. Застосування цих операцій позитивно вплине на технологічні показники та забезпечить формування оптимальної сировини для флотаційного збагачення.



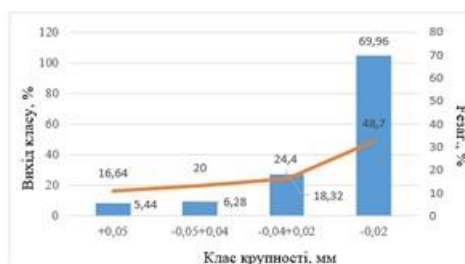
а)



б)



а)



б)

Рис. 6. Залежність концентрування кількості флокул по класам крупності: а - живлення флотації; б - пінний продукт

Рис. 7. Вміст заліза по класам крупності: а - живлення флотації; б - пінний продукт

Висновки і напрямок подальших досліджень. По результатам досліджень встановлено: максимальна кількість флокул знаходиться у класах крупності $-0,04+0,02$ мм та $-0,02$ мм відповідно: 98% та 99% - у живленні флотації та 92% та 99% - у пінному продукті; кількість флокул зменшується при збільшенні класів крупності; застосування операції розмагнічування та тонкого грохочення сировини перед флотацією є доцільним у технологічній схемі з огляду виконаних досліджень по оцінці флокуляції; за рахунок введення операцій розмагнічування та тонкого грохочення очікується підвищення виходу концентрату на 2-4% та масової частки заліза на 0,7-0,9%.

Результати дослідження будуть використані при розробці математичних моделей флокуляції та тонкого грохочення та потребують перевірки у промислових умовах.

Список літератури

1. Олійник Т.А. Перспективи розвитку технологій збагачення залізних руд// Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 69(110). – С. 32-44. http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FT=ASP_meta&C21COM=S&S21P03=FILE=&S21STR=Zkk_2018_69_7.
2. Tetiana OLINYK, Liudmila SKLYAR, Natalia KUSHNIRUK, Nadiya HOLIVER, Barbara TORA, 2023 – Ocena skuteczności technologii wzbogacania kwarcytu hematytowego, Inżynieria Mineralna z. 1(51), Wyd. Polskiego Towarzystwa Przeróbki Kopalni, Kraków, s. 33 – 44 <http://doi.org/10.29227/IM-2023-01-04>
3. Олійник Т.А. Перспективи розвитку технологій збагачення залізних руд// Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 69(110). – С. 32-44.
4. Березняк О.О., Младецький І.К. Визначення частоти розмагнічування тонких феромагнітних частинок. Збагачення корисних копалин. – Дніпро. – 2019. Вип. 73 (114), - с.106.
5. Березняк О.О., Березняк Е.О., Гумеров М.Є., Полига Д.О. Експериментальні результати розмагнічування магнетиту в імпульсному режимі. Збагачення корисних копалин. – Дніпро. – 2012. Вип. 50 (91).
6. Березняк О.О., Березняк Е.О., Гумеров М.Є. Розрахунок необхідних параметрів процесу розмагнічування магнетиту. Збагачення корисних копалин. – Дніпро. – 2012. Вип. 48 (89).
7. Березняк О.О., Младецький І.К., Пайва Є. М. Розмагнічування феромагнітних частинок у пульпі. Збагачення корисних копалин. – Дніпро. – 2014. Вип. 57 (98).
8. Yakubaylik E.K., Kilin V., Chizhik M.V., Ganzhenko I.M., Kilin S.V. Study of strong-magnetic ores magnetization and demagnetization processes by the method of digital photography. Izvestiya. Ferrous Metallurgy. 2013; 56(2):5-11.
9. Ultrafast Laser Induced Magnetization Dynamics in High Magnetic Fields <http://hdl.handle.net/2066/156225>
10. Великонська Н.М., Надточій А.А. Поверхневі явища та дисперсні системи: Навчальний посібник. – Дніпро: НМетАУ, 2018. – 78 с.
11. Сльцов С.В., Водолазкая Н.О. Фізична та колоїдна хімія: Учбовий посібник. Ч. I. – Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2005. – 239 с.
12. Anthony G. Mathematical model to investigate the behaviour of the systems of ferromagnetic particles under the magnetic fields. Applied Mathematics and Computation. 2018;320:654–676. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2017.09.050>

13. Kharitonskii P., Bobrov N., Gareev K., Kosterov A., Nikitin A., Ralin A. et al. Magnetic granulometry, frequency-dependent susceptibility and magnetic states of particles of magnetite ore from the Kovdor deposit. Journal of Magnetism and Magnetic Materials. 2022;553:169279. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2022.169279>

14. Олійник Т.А., Невзоров В.В. Тонке грохочення як спосіб вирішення технологічних питань при виробництві високоякісних залізрудних концентратів. Науковий вісник КНУ. – Кривий Ріг. – 2023. Вип.57, - С.80

15. Олійник Т.А., Вільгельм М.М. Особливості коагуляції частинок та адсорбція регентів на поверхні пінного продукту флотації. Науковий вісник КНУ. – Кривий Ріг. – 2023. Вип.57, -с.70

Рукопис подано до редакції 26.02.24

УДК 681.5:[622.73:622.69]

Д. В. ШВЕЦЬ, ст. викладач, Криворізький національний університет
В. В. ШВЕЦЬ, заступник директора енергетичного департаменту,
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ЦИКЛОМ ПОДРІБНЕННЯ ЗАЛІЗНОЇ РУДИ З УРАХУВАННЯМ ЧАСУ ТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕМІЩЕННЯ ПОТОКУ СИРОВИНИ

Мета. Розробити спосіб автоматичного керування процесом мокрого подрібнення залізної руди в кульовому млині, що працює в замкнутому циклі зі спіральним класифікатором, з урахуванням часу транспортного запізнення частини потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора, який може бути використаний на рудозбагачувальних фабриках чорної металургії при збагаченні магнетитових руд.

Методи досліджень. У статті використано поєднання огляду літератури та патентного аналізу, проведено аналіз переваг і недоліків існуючих методів автоматичного керування процесом мокрого подрібнення залізної руди.

Наукова новизна. Запропоновано спосіб автоматичного керування процесом мокрого подрібнення вхідної руди в кульовому млині, що працює в замкнутому циклі зі спіральним класифікатором, з урахуванням часу транспортного запізнення частини потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора, що може бути використана на рудозбагачувальних фабриках чорної металургії при збагаченні магнетитових руд.

Практична значимість. Розроблений спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення з урахуванням часу транспортного запізнення частини потоку вхідної руди дозволить стабілізувати вміст заліза на виході першої стадії магнітної сепарації, що, в свою чергу, підвищить якість кінцевого продукту рудозбагачувальної фабрики – залізрудного концентрату.

Результати. В ході досліджень розроблено спосіб автоматичного керування процесом мокрого подрібнення залізної руди в кульовому млині, що забезпечує внесення до блоку керування попередньо встановленого значення часу транспортного переміщення (запізнення) частини потоку вхідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора, який формує керуючий сигнал на виконавчий механізм засувки, якою подають воду і коригують задане значення крупності зливу класифікатора з урахуванням зазначеного часу транспортного запізнення вхідної руди.

Ключові слова: залізна руда, автоматизація, транспортне запізнення, подрібнення і класифікація, міцність руди.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-101-105

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В Україні чорна металургія є однією з найбільш розвинутих галузей промисловості. В той же час, магнетитові концентрати вітчизняного виробництва за своєю собівартістю є більш вартісними порівняно з зарубіжними аналогами. Це зумовлює зниження їх конкурентоспроможності на світовому ринку [1].

При цьому існує проблема коливання показників вмісту заліза в залізрудній сировині, що надходить на переробку на рудозбагачувальні фабрики. Коливання показників якості вхідної залізної руди призводить до коливання вмісту корисного компонента в промпродукті та в концентраті. У зв'язку з цим, стабілізація вмісту заліза в залізрудній сировині є одним із найважливіших завдань у гірничозбагачувальній промисловості, зумовленим необхідністю підвищення якості концентрату в умовах жорсткої конкуренції на світовому ринку залізрудних концентратів.

Питання контролю вмісту корисного компоненту в залізній руді на етапі подрібнення знаходило своє відображення в ряді наукових праць [2-7]. В той же час, через нелінійність та скла-

дність процесу переробки залізної руди, а також наявність рециклів, необхідно брати до уваги час транспортних переміщень залізорудної сировини через технологічні агрегати кожної зі стадій процесу збагачення [8, 9].

Аналіз досліджень і публікацій. Як зазначалося вище, через коливність хіміко-мінералогічних властивостей залізної руди, що надходить на переробку, в процесі збагачення на кожній із стадій збільшується кількість втрат корисного компоненту в хвості збагачення. При цьому найбільші втрати заліза спостерігаються саме на першій стадії збагачення та сягають порядку 50% [10]. З огляду на це, набувала актуальності розробка методів та засобів оперативного контролю вмісту загального та магнітного заліза в руді, що поступає на подрібнення в млин [11-18]. Отримувана інформація про хіміко-мінералогічні властивості залізної руди дає змогу операторові млина керувати обсягами подачі руди в подрібнювальну установку та підвищує інформативність процесу переробки залізорудної сировини.

З урахуванням інерційності процесу переробки залізної руди в умовах рудозбагачувальних фабрик доцільно враховувати час транспортного запізнення частини потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора.

Один із способів автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення включає в себе стабілізацію витрати вихідної руди у млин на заданому значенні зміною витрати руди, стабілізацію співвідношення "руда - вода" на заданому значенні, а також вимірювання заданого значення крупності і щільності зливу класифікатора. Також в ньому стабілізують на заданому значенні щільність зливу класифікатора і коригують задане співвідношення "руда - вода" у млин таким чином, що при збільшенні крупності зливу класифікатора від заданого значення кількість води в млин зменшують, а при зменшенні - збільшують у прямій пропорції у заданому діапазоні [19]. Недоліком зазначеного способу є те, що задане значення крупності зливу класифікатора встановлюється технологічним персоналом вручну, в залежності від його кваліфікації, без урахування фізико-механічних та хіміко-мінералогічних властивостей вихідної руди.

Відомий також інший спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення, що включає в себе стабілізацію витрати вихідної руди у млин на заданому значенні зміною витрати руди, стабілізацію співвідношення "руда - вода" на заданому значенні, стабілізацію на заданому значенні щільності зливу класифікатора і корекцію заданого співвідношення "руда - вода" у млин таким чином, що при збільшенні крупності зливу класифікатора від заданого значення кількість води в млин зменшують, а при зменшенні - збільшують у прямій пропорції у заданому діапазоні. Також попередньо встановлюють залежність між міцністю вихідної руди та вмістом в ній заліза і вносять отриману залежність до блоку обчислювання міцності, який розраховує поточну міцність вихідної руди і коригує задане значення крупності зливу класифікатора таким чином, що при перевищенні запланованого значення міцності вихідної руди задану крупність зливу класифікатора зменшують, а при зменшенні – збільшують [20]. Недоліком цього способу є те, що задане значення крупності зливу класифікатора коригується по показникам міцності вихідної руди, замірними в момент завантаження вихідної руди крупністю 20мм в кульовий млин, які порівнюються з одночасно замірними показниками крупності зливу класифікатора – частинами потоку руди, завантаженими в млин раніше. Для подрібнення вихідної руди крупності 20мм до крупності -0,1мм (крупність зливу класифікатора) необхідний значний час. Як показали проведені дослідження, час транспортного переміщення частини потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора складає 15-25 хвилин, в залежності від продуктивності секції по вихідній руді та міцності руди. Таким чином, в даному способі, як і в інших відомих системах автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення, задана крупність зливу класифікатора коригується порівнянням параметрів різних частин завантаженого в кульовий млин потоку вихідної руди. В результаті, таке порівняння призводить до розбалансування системи автоматичного управління та погіршує результати роботи секції. Такі системи не знаходять застосування на діючих рудозбагачувальних фабриках. Як показує багаторічний досвід експлуатації систем автоматичного керування процесом мокрого збагачення магнетитових руд, у більшості випадків автоматизація рудозбагачувальних фабрик завершується стабілізацією трьох технологічних параметрів: витрати руди в млин, співвідношення «руда – вода» у млині та щільності зливу класифікатора.

Постановка завдання. Розробити спосіб автоматичного керування процесом мокрого подрібнення вхідної руди в кульовому млині, що працює в замкнутому циклі зі спіральним класифікатором, з урахуванням часу транспортного запізнення частини потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора, який може бути використаний на рудозбагачувальних фабриках чорної металургії при збагаченні магнетитових руд.

Викладення матеріалу та результати дослідження. Завданням досліджень є удосконалення відомого способу автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення за рахунок автоматичного коригування заданого значення крупності зливу класифікатора в залежності від величини міцності вихідної руди з урахуванням часу транспортного запізнення частини потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора.

Поставлена задача вирішується за рахунок того, що спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення магнетитових руд включає:

стабілізацію витрати вихідної руди у кульовий млин на заданому значенні;

стабілізацію співвідношення "руда - вода" на заданому значенні зміною витрати води у млин;

стабілізацію на заданому значенні щільності зливу класифікатора;

корекцію заданого співвідношення "руда - вода" зменшенням кількості води в млин при збільшенні крупності зливу класифікатора від заданого значення і збільшенням кількості води в млин при зменшенні крупності зливу класифікатора від заданого значення;

а також встановлення залежності між міцністю вихідної руди та вмістом в ній заліза і внесення отриманих залежностей до блоку обчислювання поточного значення міцності вихідної руди і розрахунку поточної міцності вихідної руди з коригуванням заданого значення крупності зливу класифікатора зменшенням заданої крупності зливу класифікатора при перевищенні запланованого значення міцності вихідної руди або збільшенням заданої крупності зливу класифікатора при зменшенні міцності вихідної руди.

Додатково встановлюють час транспортного переміщення частини потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора і вносять його значення до блоку обчислювання міцності вихідної руди, за допомогою якого формують керуючий сигнал на виконавчий механізм засувки, якою регулюють подачу води у кульовий млин і коригують задане значення крупності зливу класифікатора з урахуванням часу транспортного переміщення вихідної руди.

Спосіб реалізується наступним чином. Перед переведенням керування циклу мокрого подрібнення магнетитової руди в автоматичний режим, технологічний персонал рудозбагачувальної фабрики спільно з фахівцями рудовипробувальної лабораторії визначає оптимальні значення регульованих параметрів (співвідношення "руда - вода", щільності і крупності зливу класифікатора) і їх допустимі відхилення від оптимальних значень, а також планове значення вмісту магнітного заліза в вихідній руді. Попередньо встановлюють залежність між вмістом заліза і міцністю вихідної руди та час транспортного переміщення вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу її до зливу класифікатора.

Зазначений спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення магнетитових руд включає в себе:

стабілізацію витрати вихідної руди у кульовий млин на заданому значенні;

стабілізацію співвідношення "руда - вода" на заданому значенні зміною витрати води у млин;

стабілізацію на заданому значенні щільності зливу класифікатора і корекцію заданого співвідношення "руда - вода".

Додатково використовується попередньо встановлена залежність між міцністю вихідної руди та вмістом в ній заліза. Встановлена залежність вноситься до блоку обчислювання поточного значення міцності вихідної руди, який здійснює розрахунки поточної міцності вихідної руди і, шляхом формування керуючого сигналу на виконавчий механізм засувки, керує подачею води та коригує задане значення крупності зливу класифікатора таким чином, що при перевищенні запланованого значення міцності вихідної руди задану крупність зливу класифікатора зменшують, а при зменшенні міцності вихідної руди – збільшують.

Попередньо встановлене значення часу транспортного переміщення (запізнення) частини потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора вноситься до блоку обчислювання міцності вихідної руди, який формує керуючий сигнал на виконавчий механізм засувки, якою подають воду і коригують задане значення крупності зливу класифікатора з урахуванням часу транспортного запізнення вихідної руди.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Запропонований спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення магнетитової руди з урахуванням міцності вихідної руди і урахуванням часу транспортного переміщення частин потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора підвищує ефективність керування та дозволяє знизити втрати корисного компонента і його коливання в кінцевому продукті рудозбагачувальних фабрик – концентраті.

Список літератури

1. **Мацуй, А.М.** Моделювання підходів подрібнення різнотипів руд конкретного родовища у кульових млинах замкнутого циклу / **А.М. Мацуй, В.О. Кондратець** // Математичне моделювання. – 2015. – № 2 (37). – С. 43 – 49.
2. **Morkun, V., Morkun, N., Tron, V., Porkuian, O., Serdiuk, O., Sulyma, T.** Application of magnetic and ultrasonic methods for determining parameters of ferromagnetic components in iron ore slurry flows. *Acta Mechanica et Automatica*, 2021, 15(4), P. 193–200
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. Model of absorbed gamma radiation in the interaction with rock formation / **A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, V. Serebrenikov, D. Shvets** // *IAES International Journal of Robotics and Automation*. Vol.8, No.4. December 2019. 269-276 ISSN: 2089-4856, DOI: 10.11591/ijra.v8i4.pp269-276
5. **Shvets D.V.** Mathematical model for controlling the classification process of crushed iron raw materials using fuzzy logic // *Вісник Криворізького національного університету* – Вип.55 – 2022. – С. 156-162.
6. **Азарян А.А., Моркун В.С., Швець Д.В., Черкасов О.В., Гриценко А.М., Швидкий О.В.** Пошук шляхів зниження втрат і розубоження залізорудної сировини / *Вісник Криворізького національного університету*. – Вип. 52. – 2021. – С.15-19. doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-15-19
7. Патент № 146595 Азарян А.А., Гриценко А.М., Цибулевський Ю.С., Швець Д.В. Пристрій оперативного контролю крупності магнетиту у пульпі. Опубл. 03.03.21 Бюл. №9.
8. Using the intensity of absorbed gamma radiation to control the content of iron in ore / **A. Azaryan, A. Gritsenko, A. Trachuk, V. Serebrenikov, D. Shvets** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2019. – Vol. 3, issue 5 (99). – P. 29–35. – DOI: 10.15587/1729-4061.2019.170341.
9. **Azaryan A.** Complex automation system of iron ore preparation for beneficiation / **A. Azaryan, A. Pikilnyak, D. Shvets** // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – Issue 8. – P. 64–66.
10. Контроль содержания магнитного железа в пульповых продуктах рудообогатительной фабрики / **[Азарян А.А., Кучер В.Г., Цибулевский Ю.Е., Швець Д.В.]**. – *INTERNATIONAL ACADEMY JOURNAL «Web of Scholar»*, Киев, №1(10), 2017, С.9-12.
11. Патент № 129934 **Швець Д.В.** Спосіб автоматичного керування процесом подрібнювання магнетитових руд у залежності від їх міцності. Опубл. 26.11.18 Бюл. №22.
12. **Shvets D.V.** Analysis of operational control methods of iron ore chemical and mineralogical characteristics / Міжнародна НТК «Розвиток промисловості та суспільства». - Матеріали конференції. 24-26 травня 2023 р. – Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2023. - С. 250.
13. **Азарян А.А.** Розробка математичної моделі технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини на рудозбагачувальних фабриках / **Азарян А.А., Швець Д.В., Карабут Н.О.** // *Science, society, education: topical issues and development prospects. Abstracts of the fifth International scientific and practical conference*. Kharkiv, Ukraine. 2020. Pp. 21-27.
14. **Швець Д. В.** Формалізація структури математичної моделі першої стадії технологічного процесу переробки залізної руди з урахуванням нечітких параметрів // XVI Всеукраїнська науково-практична конференція «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (KICM). 21-23 березня 2023 р. Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2023. - С. 240-241.
15. **Азарян А.А.** Підвищення точності гамма-методу для визначення хіміко-мінералогічних характеристик залізорудної сировини / **Азарян А.А., Швець Д.В., Карабут Н.О., Крапивний Н.С.** // *Modern Science And Practice. Abstracts of XV International Scientific and Practical Conference*. Varna, Bulgaria 2020. Pp. 274-276
16. **Morkun V. S., Morkun N. V., Tron V. V., Sulyma T. S.** Synthesizing models of nonlinear dynamic objects in concentration on the basis of Volterra-Laguerre structures. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2020. Vol. 2. P. 30–36. DOI: 10.33271/nvngu/2020-2/030.
17. **A. Azaryan, A. Trachuk, D. Shvets, A. Gritsenko.** Research of opportunities for increasing control accuracy of magnetic iron content in blastholes // XIV Міжнародна наукова конференція «Science and Society». Гамільтон, Канада, 2019 р. - С. 4-9.
18. **Швець Д.В.** Розробка математичної моделі взаємодії гамма-випромінювання з залізорудною сировиною для визначення її хіміко-мінералогічних характеристик / **Швець Д.В., Карабут Н.О., Крапивний Н.С., Азарян А.А.** //

ХІІ Міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих науковців «Наука, освіта, суспільство очима молодих». 26 травня, 2020 р., м. Рівне: Рівненський державний гуманітарний університет, С. 299-300.

19. Патент № 56304 **Кучер В.Г., Черняков С.М., Кривенко Ю.Ю.** Спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення. Опубл. 10.01.11 Бюл. №1.

20. Патент № 118091 **Швець Д.В.** Спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення. Опубл. 25.07.17 Бюл. №14.

Рукопис подано до редакції 20.03.24

УДК 622.2

О.Л. ШЕПЕЛЬ, канд. техн. наук, доц.

Криворізький національний університет

АКТУАЛЬНИЙ СТАН ПРОБЛЕМИ ПЕРЕХОДУ З ВИДОБУТКУ КОРИСНИХ КОПАЛИН ВІДКРИТИМ СПОСОБОМ НА ТЕХНОЛОГІЇ КОМБІНОВАНОГО ВІДКРИТО-ПІДЗЕМНОГО ТА ПІДЗЕМНОГО ВИДОБУТКУ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

Мета. Метою даної роботи є обґрунтування переходу з техногенно-деструктивних, екологічно небезпечних технологій відкритої на відкрито-підземну та підземну технології розробки родовищ корисних копалин.

Методи дослідження. Використані наступні методи: аналіз практичного досвіду роботи ряду закордонних рудників з комбінованим відкрито-підземним способом розробки родовищ; аналіз та узагальнення літературних джерел в області проблем подальшого розвитку техногенно-деструктивних, екологічно небезпечних технологій видобутку магнетитових кварцитів відкритим способом; проведено дослідження проблеми переходу з видобутку корисних копалин відкритим способом на технології комбінованого відкрито-підземного та підземного видобутку залізорудної сировини; методи аналізу.

Наукова новизна. Встановлено, що при видобуванні з надр корисних копалин змінюється напружено-деформований стан гірських порід. Це впливає на процеси зрушення гірських масивів, при яких зміщення можуть досягати верхніх горизонтів і проявитися у вигляді деформацій елементів кар'єрного поля. Такі зміщення можуть призводити до руйнування промислових і цивільних об'єктів. Встановлено, що всі підприємства, які розпочали відпрацювання запасів відкритим способом, проводять у життя технічну політику планомірного переходу від відкритих гірничих робіт до підземних гірничих робіт, створюючи на родовищах, що відпрацьовуються, єдині геотехнологічні системи «кар'єр-шахта».

Практична значимість. Полягає на обґрунтуванні принципів вирішення проблеми раціонального використання сировинної бази Кривбасу, що базуються на технологіях комбінованого видобутку залізорудної сировини та можливості утилізації відходів гірничого виробництва у виробленому просторі шахт.

Результати. В результаті виконаного аналізу літературних джерел встановлено, що у світовій практиці є стійка тенденція переходу з техногенно-деструктивних технологій відкритого видобутку залізорудної сировини на сучасні екологічно безпечні технології відкрито-підземної та підземної розробки корисних копалин, особливо в районах, що характеризуються несприятливими умовами для відкритих гірничих робіт. В роботі зазначено, що відпрацювання родовищ комбінованим способом дозволяє знизити рівень екологічних збитків від відкритих гірничих робіт з одночасним підвищенням ефективності підземних робіт.

Ключові слова: технологія, аналіз, відкрито-підземний, відпрацювання, комбінована розробка, руда.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-105-110

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. У Криворізькому залізорудному басейні в результаті тривалого та інтенсивного відпрацювання родовищ відкритим способом утворилися значні площі порушених гірничими виробками територій. Значні площі орних земель зайняті під кар'єри, відвали та хвостосховища. Сотні тисяч гектарів плодючої Української землі вже сьогодні непридатні для сільськогосподарського використання, а іноді і для проживання. Тисячі тон пилу з відвалів та хвостосховищ кожен рік погіршують навколишню природу та забруднюють повітря в гірничодобувних басейнах. Масові вибухи на кар'єрах при відбійці гірської маси призводять до викиду в атмосферу значної кількості шкідливого пилу та канцерогенних речовин. Екологічна обстановка в районах з відкритим способом розробки часто близька до критичної. Крім того, сейсмічний ефект від масових вибухів утворює сейсмічну хвилю, яка, в окремих випадках, призводить до руйнування цивільних будинків та промислових об'єктів.

Отже, поступовий перехід з відкритої розробки родовищ корисних копалин на технології відкрито-підземного та підземного видобутку є вимушеним і в той же час безальтернативним шляхом розвитку гірничодобувних районів, зокрема Криворізького залізорудного басейну. При цьому, основними проблемами такого переходу будуть проблеми геомеханічної стабілізації гірського масиву при будівництві шахт в зонах можливого впливу кар'єрних полів.

Аналіз досліджень і публікацій. Сучасний досвід роботи розвинутих гірничодобувних підприємств з відкритим способом розробки свідчить про наявність у світовій практиці стійкої тенденції до переходу з відкритої на екологічно безпечніші технології комбінованого видобутку корисних копалин. Наприклад відкрито-підземна технологія дозволяє протягом тривалого часу підтримувати виробничі потужності гірничодобувних підприємств, значно зменшуючи екологічний вплив гірничих робіт на природу басейну.

На сьогодні, комбінований спосіб видобутку застосовують понад 16% діючих гірничодобувних підприємств світу. Тому в останні роки наукові дослідження перехідних відкрито-підземних та підземних технологій зазнали інтенсивного розвитку.

У цьому відношенні практичний інтерес представляє досвід роботи ряду закордонних рудників, які повторно або спільно розробляють крутоспадні родовища комбінованим відкритим, відкрито-підземним, або підземним способом поблизу рудних кар'єрів.

Доведено, що комбінована відкрито-підземна розробка дозволяє протягом тривалого часу підтримувати виробничі потужності гірничодобувних підприємств. Більш того, впровадження у виробництво наукових рекомендацій та технологічних рішень відпрацювання запасів комбінованим способом дозволило низці закордонних підприємств, які традиційно застосовували відкритий спосіб розробки, залучити до інтенсивної експлуатації ділянки родовищ, які вважались насамперед безперспективними [1-3].

Прикладом планомірного переходу від відкритих гірничих робіт до підземної розробки є рудник Кідд Крик (Kidd Creek) в Онтаріо (Канада) [4, 5]. Родовище поліметалевих руд розробляється з 1966 р. відкритим способом. Комбінована відкрито-підземна технологія видобутку застосовується з 1968 р. з поступовим переходом виключно на підземний видобуток, що показано на рис.1. Будівництво шахти було розпочато коли глибина кар'єру фактично становила 150 м (проектна глибина 250 м), тобто за 7-10 років до закінчення відкритих гірничих робіт.

З часом, по мірі збільшення продуктивності підземного видобутку виробнича потужність кар'єру зменшувалась. Однак, при цьому зберігався стабільний сумарний об'єм видобутку руди та постійний рівень завантаження збагачувальної фабрики.

Наступним показовим родовищем з переходом на комбінований спосіб відпрацювання покладів є Австралійське мідно-золоте родовище Озборн (Osborne), яке розташовано в Квінсленді.

З 1996 р. родовище відпрацьовується підземним способом у борту кар'єра, виведеного з експлуатації того ж року. Розкриття ділянки підземних робіт здійснюється через похилу штольню з горизонту 80 м відпрацьованого кар'єру та вертикальними стволами [6].

Досить цікава технологія представлена на Австралійському родовищі Нозпарке (Northparkes), яке розташоване за 27 км від м. Паркс. Родовище розробляється групою шахт, які ведуть підземні гірничі роботи не після закінчення відкритих гірничих робіт, а одночасно з ними. Підприємство виробляє високоякісний мідно-золотий концентрат [7].

Рудне тіло, що розробляється підземним способом, має потужність близько 200 м і поширюється на глибину більше 800 м. Доступ до підземної частини родовища здійснюється через похилий ствол, який використовують для транспортування руди конвеєром, а також для доставки людей та матеріалів. Під час розробки використовують систему підповерхового обвалення.

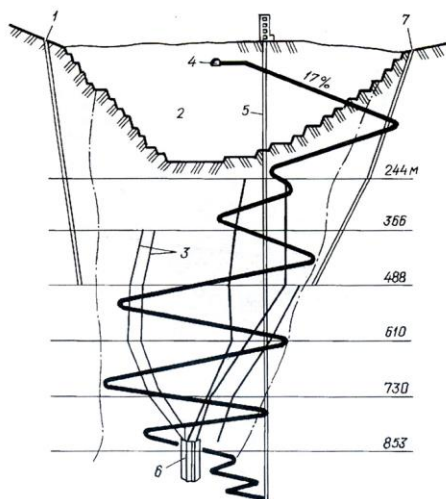


Рис. 1. Схема розкриття поліметалевого родовища, що відпрацьовується рудником «Кідд Крик»: 1, 7 – вентиляційний піднягтевий; 2 – граничний контур кар'єру; 3 – рудо-спуск; 4 – портал штольні, розташований у неробочому борту кар'єру; 5 – рудопідйомний ствол; 6 – підземний склад

Значний досвід одночасного ведення відкритих та підземних робіт накопичено на найбільшому мідно-золотому родовищі Гразберг (Grasberg) в Індонезії, розвіданому в 1988 р. Рудник складається з кар'єру та шахти. Кар'єр забезпечує високий обсяг видобутку з низькою собівартістю. Добова продуктивність кар'єру – 200-240 тис. т. Шахтою розробляється рудний масив в дні кар'єру та кілька індивідуальних покладів поблизу кар'єру. Добова продуктивність видобутку руди шахтою на ділянці Глибокої Рудної Зони (DOZ) складає в середньому 43,6 тис. т. Блок DOZ є одним із найбільших всесвітньо відомих підземних блоків [8].

Рудниками «Віханті», «Хаммаслахті», «Пюхясалмі», «Хавері», «Луйконлахті» та «Коталахті» (Фінляндія) відпрацьовується ряд родовищ поліметалевих руд відкритим, підземним та комбінованим відкрито-підземним способом.

Рудник «Пюхясалмі» (Puhäsalmi Mine Oy), найглибший рудник кольорових металів у Європі (глибина 1444 метри). Рудником «Пюхясалмі» відпрацьовується мідне поліметалеve родовище з вмістом міді в руді 3-4%. Крім того, з руди вилучають свинець, цинк, сірку та рідкісноземельні елементи. Потужність родовища 20-40 м, яке залягає під кутом 70-80 град. Верхня частина родовища відпрацьовується кар'єром до глибини 120 м, нижня – підземним способом, із застосуванням камерних систем із закладкою, а також системою горизонтальних шарів із твердіною закладкою [9, 10].

Родовище поліметалевих руд Віртасалмі (Virtasalmi copper mine) відпрацьовується на повну глибину відкритим та підземним способами. До глибини 175 м родовище відпрацьовувалося спільно відкритим та підземним способом з доставкою гірської маси з підземної частини на денну поверхню по похилому з'їзду. З переходом на підземні гірничі роботи, з неробочого борту кар'єру пройдено вентиляційні підняття для провітрювання підземних гірничих робіт [10].

Досить привабливими з точки зору комбінованої відкрито-підземної розробки є дослідження, в яких розроблено способи додаткового відпрацювання запасів бідних руд, а також наведено загальну класифікацію способів комбінованої розробки родовищ [11].

Загалом при безпосередній участі авторів пропонуються способи визначення безпечних розмірів ціликів, що залишаються між кар'єром та виробками підземного рудника. Також запропоновано деякі варіанти технологій розробки підземних запасів руди у межах діючого кар'єру [12-14].

Авторами досліджено деякі питання внутрішнього відвалоутворення у виробленому просторі кар'єру [15].

Аналіз приведених технологій дає змогу визначити кілька основних напрямів, основним з яких є проблема переходу з техногенно-деструктивних, екологічно небезпечних технологій видобутку корисних копалин відкритим способом, що потребує вирішення екологічних проблем гірничодобувних регіонів. Одним із напрямів може бути розробка ресурсозберігаючих та екологічно безпечних технологій відкрито-підземного та підземного видобутку залізорудної сировини які, крім іншого, дозволяють утилізувати відходи гірничодобувної промисловості у виробленому просторі шахт при переході на підземний видобуток.

Постановка задачі. Таким чином, на нашу думку, гірничодобувні підприємства з відкритим способом розробки, які на сьогодні дають понад 70 % товарної руди в Україні, повинні розвиватися з поступовим нарощуванням елементів комбінованого відкрито-підземного видобутку (I етап), та поступовим переходом на підземний видобуток (II етап).

Викладення матеріалу та результати. Із загального обсягу залізорудної сировини, що видобувається в Україні, на частку Кривбасу припадає близько 80 %, при цьому питома вага підземного видобутку становить близько 30 % [16].

У Криворізькому залізорудному басейні видобуток багатих залізних руд підземним способом здійснює АТ «Криворізький залізорудний комбінат», шахтоуправління з підземного видобутку руди ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «Суша Балка».

ПрАТ «Центральний ГЗК» здійснює розробку магнетитових кварцитів підземним способом на шахті ім. Орджонікідзе.

ТОВ «Рудомайн» видобуває багаті залізні руди відкритим способом, які раніше були залишені на вище розташованих горизонтах колишніх шахт РУ ім. Кірова та ім. Дзержинського. За якістю ці руди відносяться до товарних.

Зазначені типи залізних руд розрізняються, як за фізико-механічними властивостями, так і за гірничо-геологічними і гірничотехнічними умовами видобутку. Ці відмінності відповідно впливають на напружено-деформований стан досліджуваних масивів.

Багаті залізні руди видобуваються в основному підземним способом, магнетитові кварцити розробляються переважно відкритим способом і частково підземним.

Для отримання загальної картини необхідно зауважити, що з кінця минулого сторіччя у світовій та вітчизняній практиці розробки рудних родовищ, у тому числі і залізорудних, випереджальний розвиток отримав відкритий спосіб видобутку корисних копалин. Для залізорудних родовищ України ця тенденція визначилась у зміні співвідношення обсягів видобутку між підземним і відкритими способами розробки, а відповідно – і погіршенням екологічної ситуації в басейні.

До 1970 р. більше товарної руди давав підземний видобуток. Але вже з 1970 р. кількість товарної руди, що видобувалась відкритим способом зросла в 2,2 рази і склала в 2003 р. близько 65 млн т. Підземний видобуток скоротився в середньому з 43,6 млн т товарної руди в 1970 р. до 18,9 млн т в 2003 р.

Таким чином, на сьогодні з 83,8 млн. т залізорудної сировини, що видобувається в Україні тільки 13,9 млн т видобувається підземним способом, що становить близько 17 %.

Таке співвідношення між двома основними способами розробки, на нашу думку, не є оптимальним. Особливо негативно збільшення відкритого способу видобутку впливає на екологію Криворізького басейну.

Так при відкритому способі розробки набагато більше відчужується гектарів родючих земельних угідь. У Криворізькому басейні, на частку якого припадає до 85 % виробленої в Україні товарної залізорудної сировини, гірничими роботами порушені тисячі гектарів родючих орних земель.

За даними ДП ДП «Кривбаспроект», на одиницю товарної продукції при відкритих гірничих роботах витрати земельних угідь у Криворізькому басейні в 13 разів більші, ніж при підземній розробці, і за забрудненням атмосфери пилогазовими викидами на відкритих роботах справи набагато гірші, ніж на підземних роботах.

Збитки, що завдаються в Криворізькому басейні навколишньому середовищу підземними та відкритими роботами, у розрахунку на 1 т товарної продукції при відкритому способі видобутку руди в 3,5 рази більші, ніж при підземному, а з урахуванням якості товарної продукції - в 3 рази.

Відомо, що родовища, які відпрацьовують відкритим способом представлені, як правило, запасами бідних залізних руд – залістистих, або магнетитових кварцитів (вміст заліза 22-38%), що потребують збагачення. В той же час, збагачення магнетитових кварцитів призводить до утворення та складування величезної кількості відходів збагачення, а відповідно і створення нових сховищ для їхнього розміщення. Крім того, магнетитові кварцити мають невисокий вміст заліза, включають домішки сірки, фосфору й інших компонентів, що знижують якість металу, який виробляється.

Техногенно-деструктивні наслідки для довкілля та основні недоліки технологій відкритого видобутку залізорудної сировини з урахуванням сучасних екологічних проблем відкритої розробки корисних копалин узагальнено в табл. 1.

Таблиця 1

Техногенно-деструктивні наслідки для довкілля та основні екологічні проблеми відкритої розробки корисних копалин

Умови експлуатації родовища	Виробничі процеси	Наслідки для довкілля
Глибина залягання рудних покладів (до 450 м)	Розкривні роботи в процесі поглиблення очисних робіт	Порушення земної поверхні, зниження якості ґрунтів, складування у відвалах значних обсягів розкривних порід, зміна гідрологічного режиму території
Висока міцність розкривних порід та руд	Застосування буровибухових робіт	Великі обсяги пилових і газових викидів в атмосферне повітря, сейсмічний вплив
Якісні характеристики руд (22-38% Fe)	Необхідність збагачення видобутої рудної сировини	Складування відходів збагачення, утворення хвостосховищ, шкідливі викиди в повітря, використання та забруднення значних обсягів водних ресурсів

Отже, в процесі виробництва основної продукції утворюється значна кількість газоподібних, твердих і рідких відходів. Супутні відходи негативно впливають на результати господарської діяльності гірничодобувних підприємств, оскільки вимагають витрат на їх локалізацію, транспортування, зберігання, та зрештою ускладнюють екологічну обстановку в районах розміщення об'єктів гірничо-збагачувального виробництва.

Істотний вплив на екологічний стан довкілля чинить видобуток і переробка гірської маси та розкривних порід від проведення гірничих робіт. Це позначається на відведенні значних площ орних земель під відвали, порушенні природного ландшафту земної поверхні. В процесі відкритого видобутку корисних копалин атмосферне повітря забруднюється твердими пиловими і газоподібними домішками, природні водоймища забруднюються шламовими водами та високо мінералізованими водами водовідливу.

За даними авторів роботи [17] з кожної 1000 т гірської маси, що видобувається гірничо-збагачувальними комбінатами, виробляється всього близько 200 т залізородної продукції. При цьому відчужується 40 м² і затоплюється 50 м² землі, витрачається 110 м² високо мінералізованих вод, а в атмосферу викидається 2,5 т тонкодисперсного пилу, 1,8 т отруйних газів.

Отже, проблеми відкритої розробки корисних копалин привели до надмірного накопичення на земній поверхні значних обсягів відходів видобувного та гірничо-збагачувального виробництва.

А також, характер і ступінь порушення довкілля зокрема, земель гірничого відводу в районі функціонування підприємства обумовлені технологічними рішеннями щодо формування кар'єру, як підприємства з видобування корисних копалин, так і сукупності гірничих виробок для розробки родовища відкритим способом.

Висновки та напрямок подальших досліджень. В результаті виконаного аналізу першоджерел встановлено, що у світовій практиці є стійка тенденція переходу з техногенно-деструктивних технологій відкритого видобутку залізородної сировини на сучасні екологічно безпечні технології відкрито-підземної та підземної розробки корисних копалин, особливо в районах, що характеризуються несприятливими умовами для відкритих гірничих робіт.

Таким чином в подальшому відпрацювання родовищ комбінованим способом дозволяє знизити рівень екологічних збитків від відкритих гірничих робіт з одночасним підвищенням ефективності підземних робіт.

Напрямок подальших досліджень полягає у економічному обґрунтуванні застосування комбінованої відкрито-підземної розробки родовищ корисних копалин.

Список літератури

1. Pysmennyi, S., Chukharev, S., Kyelgyenbai, K., Mutambo, V., Matsui, A. (2022). Iron ore underground mining under the internal overburden dump at the PJSC «Northern GZK». IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1049(1), 012008. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012008>.
2. Удосконалення спільної (відкритої-підземної) розробки рудних родовищ: Збірник тез доповідей науково-технічної конференції. – Кривий Ріг: КГРІ, 1984. – 223 с.
3. Черних А.Д., Калишевський І.А., Маєвський А.М., Гордін Д.В. Параметри комплексної розробки родовищ. – Дніпропетровськ: Січ, 1993. – 318 с.
4. Офіційний сайт компанії «Ask Glencore Canada» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.glencore.ca/en/kidd>.
5. Інтернет-сайт новин гірничодобувної промисловості «Mining-technology.com» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.mining-technology.com/projects/kidd_creek/.
6. Інтернет-сайт новин гірничодобувної промисловості «Mining-technology.com» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mining-technology.com/projects/osborne/>.
7. Офіційний сайт компанії «Northparkes» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.northparkes.com/>.
8. Офіційний сайт компанії «PT Freeport Indonesia» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ptfi.co.id/en/grasberg-open-pit-mine>.
9. Rurppa R., Erkkile E Changing at Pihasalmi. «Care Studies of Sur-face Mining». – New York, 1969.
10. Офіційний сайт гірничої енциклопедії «mining-enc» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.mining-enc.ru/f/finlyandiya/>.
11. Патент № 33955 А Україна, МКІ Е21С 41/06 Спосіб комбінованої розробки крутоспадних родовищ корисних копалин / В.Ф. Бизов, С.О. Сторчак, В.П. Воловик, О.Є. Чередниченко, Ю.І. Ковальов, О.В. Романенко, В.В. Лотоус, В.О. Щелканов, Б.М. Андреев. – Опубл. 15.02.01; Бюл №1; – 2с. іл.
12. Сторчак С.О., Щелканов В.О., Андреев Б.М. Безпечна технологія розробки запасів під бортом кар'єру системами з масовим обваленням / С.О. Сторчак, В.О. Щелканов, Б.М. Андреев. – Охорона праці. – 1995. – № 2. – С. 6-8.
13. Сторчак С.О. Підземні роботи в зоні впливу відкритих / С.О. Сторчак. – Кривий Ріг: АГН УкраїниКТУ, 1997. – 256 с.

14. Андреев Б.М. Геотехнологічні параметри маловитратного підземного рудника в борту діючого кар'єра / Б.М. Андреев // Зб. наук. трудів НГА України № 12, Том 2. – Дніпропетровськ: РІК НГА України, 2001. – С. 115-119.
15. Андреев Б.М., Ошмянський І.Б., Черних О.Д. Відкрито-підземна розробка рудних родовищ. – Техніка, Київ, 2010 р., 520 ст.
16. Короленко М.К., Ступнік М.І., Калініченко В.О. [та ін.]. Розширення сировинної бази підземного Кривбасу за рахунок залучення до видобутку магнетитових кварцитів. – Кривий Ріг: Діоніс, 2012. 284 с.
17. Олійник Т.А. Підвищення якості бідних кускових руд шахтного видобутку Кривбасу методом відсадження / Т.А. Олійник, Л.В. Скляр // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ: НГУ, 2013. – Вип. 53 (94).

Рукопис подано до редакції 15.03.24

УДК 004.94

В.А. ШИМКО, ст. викладач
Криворізький національний університет
О.О. СЛІПІЧ, канд.техн.наук, директор
ТОВ «Індастріал Констракшн Груп»

ВИКОРИСТАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ РІШЕНЬ ТА VR-ТЕХНОЛОГІЙ В АРХІТЕКТУРНО-БУДІВЕЛЬНОМУ ПРОЕКТУВАННІ ТА БУДІВНИЦТВІ

Мета. Метою даної роботи є визначення сучасних засобів цифрової інформації та моделювання, що дозволять більш ефективно співпрацювати фахівцям різних напрямків на різних етапах архітектурно-будівельного проектування та безпосередньо під час будівництва об'єкту.

Методи дослідження. При виконанні даної роботи були використовані систематизація, структурний та порівняльний аналіз, теоретичне узагальнення даних, отриманих при детальному аналізі літературних, статистичних джерел та інтернет-ресурсів, натурних обстеженнях об'єктів. При натурних обстеженнях застосовані методи фотофіксації.

Наукова новизна. Архітектурно-будівельне проектування та будівництво в цілому передбачає тісну співпрацю великої кількості учасників між собою: проектувальників, будівельників-підрядників, замовників, інспекторів різних служб та відомств тощо. Саме тому актуальним завданням, вирішення якого стане суттєве покращення взаємодії цих фахівців, є використання цифрових інноваційних засобів та VR-технологій в процесі архітектурно-будівельного проектування та будівництва.

Практична значимість. Досвід архітектурно-будівельного проектування та будівництва різних об'єктів показує, що використання сучасних інноваційних цифрових засобів та технологій є ефективною технічною допомогою фахівцям, як в процесі створення нових об'єктів, так і під час їх реконструкції, а також сприяє значному зменшенню інженерних помилок та колізій в цих процесах. Результати роботи можуть бути широко впроваджені на різних етапах архітектурно-будівельного проектування та під час будівництва.

Результати. Проаналізовано сучасний стан та основні напрямки вдосконалення архітектурно-будівельного проектування та будівництва з активним застосуванням інноваційних цифрових технологій. Показані переваги та недоліки використання різних видів цифрових платформ та програмних комплексів для покращення взаємодії всіх учасників процесу проектування та будівництва. Визначені напрямки співпраці проектувальників та IT-фахівців по створенню більш ефективного програмного застосунку (додатку) VR-туру, розрахованого на багато користувачів.

Ключові слова: архітектурно-будівельне проектування, BIM-технології, VR-технології, розрахований на багато користувачів VR-тур, Unreal Engine, Pixel Streaming, кросплатформність.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-110-114

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Архітектурно-будівельне проектування, як специфічний та достатньо консервативний вид діяльності, має високий рівень трудовитратності, що значно впливає на терміни виконання проектів. Також при створенні проектної документації на різних стадіях залучається багато інженерів-фахівців відповідно до необхідних розділів проекту і дії яких повинні постійно узгоджуватися між собою і всю відповідальність за це несе головний архітектор(інженер) проекту. В подальшому вже на етапі будівництва об'єкта виникають проблеми постійних змін, коригування та узгодження нових проектних рішень між проектувальником, замовником та підрядником, що також суттєво впливає на терміни будівництва в цілому.

Насьогодні поява на ринку інноваційних цифрових технологій, зокрема BIM-технологій, дозволяє кардинально змінити підходи та старі технології створення проектної документації на більш сучасні та динамічні. Створення цифрової моделі майбутнього об'єкту в 3D-вимірі та в

усіх деталей дозволяє як скоротити час на виготовлення проектної документації так і значно зменшити кількість помилок при розробці.

В той же час більш ефективна співпраця та взаємодія залучених у процес проектування та будівництва спеціалістів на всіх етапах є практичним та науковим завданням, що обумовлює пошук нових підходів, ідей та досліджень в цьому напрямку.

Аналіз досліджень і публікацій. Вже протягом останніх років проблема поліпшення та ефективності процесів створення проектної документації для будівництва як і саме будівництво, впровадження інноваційних технологій у ці процеси турбує багатьох вчених, що займаються дослідженнями в будівельній галузі та галузі IT-технологій.

Авторами статті також був проведений аналіз досліджень зарубіжних та вітчизняних вчених, в яких докладно і всебічно описано перспективні напрями впровадження сучасних інноваційних цифрових технологій у архітектурно-будівельне проектування та будівництво.

Окремі аспекти проблеми впровадження сучасних BIM- та VR-технологій в проектування та будівництво висвітлено в працях українських науковців: Афанасьєв Д., Блонський О. [1], Трач Р.В. [2], закордонних науковців: Zita A.[3], Шакшак О.М., Евсиков И.А.[4], Du J., Shi Y.[10], Ruppel U., Schatz K.[11] та інших. Однак більшість досліджень спрямовано виключно на поліпшення та вдосконалення самих процесів проектування та будівництва і майже не зачіпають проблемні аспекти тісної співпраці учасників цих процесів. В цьому і полягає невирішена частина проблеми і, відповідно, основна мета даного дослідження.

Постановка завдання. Проаналізувати досвід та визначити більш ефективні VR-технології, що можуть посприяти та поліпшити взаємодію різних інженерів-фахівців як в процесі створення проектної документації так і під час будівництва, їх більш тісної та ефективної співпраці, поставити завдання і методи дослідження.

Викладення матеріалу та результати. Кабінет Міністрів України 17 лютого 2021 року затвердив Концепцію впровадження технологій будівельного інформаційного моделювання (BIM-технологій) в Україні, яка передбачає поетапний перехід, починаючи з 2020 по 2035 рік до проектування, з обов'язковим використанням BIM-технологій на об'єктах державного фінансування.

BIM-технології – це інструмент, без якого немислиме швидке та ефективне будівництво, відновлення порушеної війною інфраструктури держави.

Ефективне використання такого потужного інноваційного інструменту, як BIM-технологій в процесі архітектурно-будівельного проектування, значно поліпшує якість проектування в цілому, дозволяє інженеру-проектувальнику різного фаху розглядати проектувану будівлю як в цілому, так і окремі її частини з різним ступенем деталізації.

Крім того інформаційне моделювання будівлі насамперед – це спільна робота різних спеціалістів. Головний інженер та архітектор проекту, директори будівельних компаній, інвестори та BIM-менеджери в рамках глобального проектування потребують віддаленого та спільного контролю процесу.

Саме для цього процесу на базі вже створеної цифрової моделі будинку більш доречно використання технологій віртуальної реальності або VR-технологій. Можливість віддалено брати участь у віртуальному турі (VR-турі) дозволяє значно економити час у процесі узгодження між різними фахівцями проектування. Такий підхід спрощує спілкування між фахівцями та людьми, які не мають професійних знань у будівельній галузі [3]. Оскільки у віртуальному турі є спеціальні візуальні засоби для ідентифікації об'єкта, то немає потреби використовувати професійні терміни.

Останні розробки в галузі VR-технологій сприяли використанню інтерактивної візуалізації при проектуванні та будівництві. На сьогоднішній день існуюче програмне забезпечення не дозволяє працювати віддалено у віртуальній реальності. Застосування інноваційного підходу у побудові VR-моделі за допомогою додатку Unreal Engine надає користувачам програми широкий спектр можливостей.

У додатку реалізована можливість вибору середньої температури у майбутньому будівельному об'єкті [4]. Користувач може оцінити результати розрахунку теплового балансу та необхідну кількість енергії на опалення з урахуванням коефіцієнта теплопередачі стін та вікон, взятого з BIM-моделі, та середньої температури повітря зовні. Завдяки простому та інтуїтивно зрозумілому інтерфейсу, користувачу необов'язково мати якісь спеціальні знання.

Додатково програма дозволяє розрахувати ефективність використання альтернативних джерел енергії, таких як сонячні батареї та вітрогенератори. Програма пропонує оптимальну кількість джерел електроенергії з урахуванням їх вартості та середньорічної генерації енергії у заданому кліматичному регіоні. Застосування відкритого коду дозволяє додавати в додаток індивідуальні доопрацювання, необхідні тому чи іншому замовнику. Враховуючи високу зацікавленість VR-технологіями забудовників, додатково в проєкт імпортується метадані приміщень та джерел світла. Це дозволяє демонструвати докладну квартирографію, а також оцінити освітленість приміщень та можливі витрати електроенергії, що дозволить покращити модель енерго-ефективності будівлі (рис.1).

На даний момент візуалізація будівельних об'єктів здійснюється в основному за допомогою програмних продуктів Autodesk Revit Live, Enscape та Twinmotion [5-7]. Дані програми дозволяють на базі BIM моделі створити VR-середовище, але не дозволяють компілювати в повноцінний VR-додаток. Також у них не реалізовано квартирографію, розрахунок енергоефективності та немає розрахованого на багато користувачів режиму. Варто зазначити, що продукти, створені на базі Unreal Engine, можна запускати на більшості операційних систем та платформ.

Для розрахованого на багато користувачів VR-туру є два підходи. Перший, кросплатформенний, з використанням плагіна Pixel Streaming (рис.2).



Рис.1. Реалізація квартирографії за допомогою Unreal Engine 5

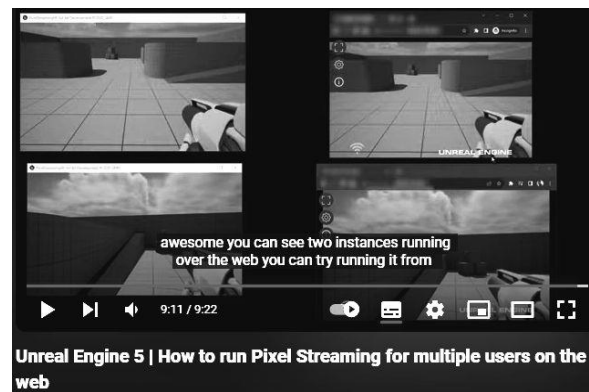


Рис.2. Кросплатформенний VR-тур з використанням плагіна Pixel Streaming

Результат для користувача аналогічний перегляду відеопотоку з таких сервісів, як YouTube або Netflix, за винятком двох речей [8]:

замість відтворення попередньо записаного відеокліпу, аудіо- та відеопотік генеруються в режимі реального часу за допомогою Unreal Engine;

користувачі можуть контролювати робочий процес через будь-який браузер, відправляючи назад на сервер події клавіатури, миші та інших пристроїв введення.

Переваги даного розрахованого на багато користувачів VR-туру на базі плагіна Pixel Streaming:

здатність мобільних пристроїв та легких веб-браузерів відображати графіку кращої якості, ніж це можливо в інших випадках. В результаті це дає можливість показувати складні сцени з високою роздільною здатністю, використовуючи функції рендерингу, які можливі лише при використанні власної настільної програми з потужним графічним процесором.

Відсутність потреби заздалегідь завантажувати великі файли або файли вмісту, що виконуються, і їх встановлювати. Єдине, що користувачеві необхідно завантажити – це медіапоток під час відтворення.

Можливість підтримувати кілька платформ без створення та розповсюдження кількох окремих пакетів. Програма компілюється один раз для Windows і дозволяє використовувати будь-яку платформу для перегляду контенту. Користувачі можуть переглядати потік у будь-якому сучасному браузері, який підтримує модель підключення WebRTC, включаючи Google Chrome та Mozilla Firefox на платформах для настільних комп'ютерів, IOS та Android.

Система Pixel Streaming містить мінімальну кількість компонентів, які відносно легко встановити у локальній мережі. Тим не менш, вона досить потужна, щоб команди, які мають досвід

розгортання веб-служб, могли використовувати її як основу для створення користувацьких хмарних платформ.

Pixel Streaming використовує середовище однорангового зв'язку WebRTC для забезпечення мінімальної затримки між користувачем та додатком Unreal Engine.

Єдиний недолік полягає в тому, що на різних пристроях відбувається управління тим самим персонажем, тобто з'являється поділ учасників VR-туру на одного ведучого і кількох глядачів. Проте роль ведучого можна змінювати між учасниками.

Другий мультиплеєрний підхід реалізується вбудованими засобами Unreal Engine. За такого підходу інформація про стан «гри» передається між кількома комп'ютерами через Інтернет-з'єднання, а не формується на одному комп'ютері. Це робить розраховане на багато користувачів програмування, ніж програмування для одиночної сцени, оскільки процес обміну інформацією між користувачами делікатний і додає кілька додаткових кроків. Unreal Engine має потужне мережеве середовище, яке підтримує деякі з найпопулярніших у світі онлайн-ігор, допомагаючи спростити процес програмування.

До плюсів такого підходу можна віднести:

можливість у режимі реального часу віддалено взаємодіяти з іншими учасниками проекту;

відсутність необхідності використовувати професійні терміни, оскільки можна використовувати спеціальні візуальні засоби для ідентифікації об'єктів (рис. 3).

Мінусом цього підходу є необхідність завантажувати та встановлювати програмне забезпечення для кожного проекту.

Для повноцінного спілкування учасників розрахованого на багато користувачів VR-туру можна використовувати плагін Viovo з можливістю аудіо-конференції та чату [9]. Сервіс легко інтегрується і є керованим рішенням з хостингом, яке працює з будь-яким движком і є єдиним відомим авторам кросплатформним сервісом. Таке рішення дозволяє спілкуватися гравцям на PC, PS4, Xbox One, Nintendo Switch, IOS, Android та у браузері. Сервіс Viovo використовується в найбільших іграх, що легко масштабується для будь-якої аудиторії: від 10 осіб до 10 мільйонів. Також застосування Viovo заощаджує споживання ресурсів процесора та каналу зв'язку, оскільки сервіс добре оптимізований.



Рис. 3. Взаємодія користувачів у режимі мультиплеєра

На жаль, два перелічені вище методи мультиплеєрності не можуть бути реалізовані одночасно. Кожен підхід має свої плюси та мінуси, і замовник сам вирішує, який варіант підходить більше. У процесі проектування може скластися така ситуація, коли є фахівці, які бажають донести до інших інформацію про помилки проекту. У такій ситуації розумно використовувати кросплатформний або мультиплеєрний режим. У першому випадку, ви передаєте управління по черзі, а у другому кожен керує своїм рухом усередині проекту.

Використання другого мультиплеєрного підходу дозволяє, наприклад, досліджувати поведінку людей під час аварійної евакуації. Занурюючи людей у серйозне ігрове середовище, можна збирати інформацію про колективну поведінку людей у стресовій ситуації [10, 11].

На даний момент розроблено додаток VR-туру, MVP (minimum viable product, мінімально життєздатний продукт), що містить безліч цікавих та нових можливостей для звичайного користувача: візуалізація тепломасообміну в приміщенні, розрахунок квартирографії, аналіз енергоефективності та мультиплеєрний режим.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Ідея даної роботи саме й полягає у необхідності розробки ефективного мультиплеєрного VR-додатку, за допомогою якого одночасно декілька користувачів можуть перебувати у віртуальному просторі майбутнього будівельного об'єкта, побудованого на основі BIM-моделі. За допомогою засобів VR є можливість вільно переміщатися у тривимірному просторі та змінювати параметри об'єкта в режимі реального часу, визначати та своєчасно виправляти окремі помилки та оклюзії.

Проведене дослідження довело, що поява сучасних інноваційних цифрових та VR-технологій сприяє вдосконаленню та ефективності такого багатовимірного процесу, як архітектурно-будівельне проектування, дозволяє значно зменшувати кількість помилок, що виникають при цьому, та значно економити час на узгодження питань, які виникають при проектуванні та будівництві.

Також дослідження показало, що до створення та розробки сучасного мультиплеєрного VR-додатку для більшої комунікації фахівці-будівельників між собою, необхідно залучення IT-фахівців та їх тісна співпраця з інженерами-проектувальниками.

Список літератури

1. **Афанасьєв Д., Блонський О.** Концепція впровадження BIM – Будівельного Інформаційного Моделювання в Україні. 2020. 116 с.
2. **Трач Р.В.** Інформаційне моделювання в будівництві (BIM): сутність, етапи становлення та перспективи розвитку (КНУБА). Миколаїв: МНУ ім. В.О. Сухомлинського / Науковий збірник «Економіка та управління підприємством», – 2017. – Вип. 16. – С.490–496
3. **Zita A.** Enhancing BIM Methodology with VR Technology // State of the Art Virtual Reality and Augmented Reality Knowhow. 2018. P. 59–79. DOI: 10.5772/intechopen.74070.
4. **Шакшак О.М., Евсиков И.А.** Многофункциональное VR приложение на основе цифровой модели здания // Архитектон: известия вузов. 2019. № 4 (68). URL: http://archvuz.ru/2019_4/17.
5. Revit Live. URL: <https://www.autodesk.com/products/revit-live/overview> (дата обращения: 14.02.2020).
6. Enscape. URL: <https://enscape3d.com/> (дата обращения: 14.02.2020).
7. Twinmotion. URL: <https://www.unrealengine.com/en-US/twinmotion> (дата обращения: 14.02.2020).
8. Pixel Streaming. URL: <https://docs.unrealengine.com/en-US/Platforms/PixelStreaming/index.html> (дата обращения: 25.01.2020).
9. Vivox. URL: <https://www.vivox.com/> (дата обращения: 25.01.2020).
10. **Du J., Shi Y., Mei C., Quarles J., Yan W.** Communication by Interaction: A Multiplayer VR Environment for Building Walkthroughs // Construction Research Congress. 2016. P. 2281–2290. DOI: 10.1061/9780784479827.227.
11. **Rüppel U., Schatz K.** Designing a BIM-based serious game for fire safety evacuation simulations // Advanced Engineering Informatics. 2011. 25(4). P. 600–611. DOI: 10.1016/j.aei.2011.08.001

Рукопис подано до редакції 20.03.24

УДК 622.235:622.271

Д.А. ТІТОВ, аспірант

Криворізький національний університет

ТЕОРЕТИЧНА БАЗА ОБГРУНТУВАННЯ ЗБАЛАНСОВАНОГО ЕНЕРГОНАСИЧЕННЯ ПОРОДНОГО МАСИВУ ПІДРИВАННЯМ КОМБІНОВАНИХ СВЕРДЛОВИННИХ ЗАРЯДІВ

Мета. Основною метою даної статті є добір надійних й адекватних аналітичних методів та способів їх експериментальної перевірки для комплексного і системного дослідження фізичних процесів, які відбуваються при вибуховому руйнуванні скельних порід свердловинними зарядами спеціальних конструкцій, в цілях забезпечення збалансованого розподілу вибухової енергії в породному масиві, який підривається, максимально відповідно до змінних фізико-механічних характеристик скельних порід в окремих локальних зонах вибухового блоку.

Методи дослідження – порівняльний аналіз сучасних, надійно апробованих імітаційних та математичних моделей геомеханічних процесів. Критерієм придатності при цьому слугувала максимальна адекватність методів щодо завдання точного визначення повного тензора напружено-деформованого стану порід за умов динамічного напруження вибухом породного масиву складної структури на відкритих розробках для наступного відбору методів, найбільш придатних для цілей дослідження.

Наукова новизна матеріалу статті полягає в системному підході щодо обґрунтування теоретичної бази збалансованого енергонасичення породного масиву підриванням комбінованих свердловинних зарядів і відповідних їм засобів, заходів та технічних рішень.

Практична значимість. Представлений методологічний підхід та його подальший розвиток цілком придатні для формулювання змісту подібних за напрямком досліджень та їх планування, сприяючи вирішенню задач зниження собівартості мінеральної продукції за рахунок підвищення ефективності буро-підривних робіт у залізорудному кар'єрі.

Результати. На підставі виконаного аналізу сформовано комплекс науково-методологічних підходів як інструментарію для базових теоретичних і експериментальних вишукувань, застосування яких забезпечує визначене автором уточнення механізму створення і розвитку динамічного навантаження скельного масиву вибухом для на-

ступної розробки й обґрунтування надійних методів управління даним процесом шляхом координованого в просторі та часі короткоуповільненого підривання груп свердловинних зарядів спеціальних конструкцій. При цьому враховуються структурні закономірності та локальні аномалії масиву, анізотропія його властивостей, зміна стану тощо. Тільки достовірно знаючи системно значимі часові та просторові характеристики породного масиву, можна адекватно моделювати динамічні його еволюції та розробити достатньо обґрунтовані теоретично відповідні математичні моделі з алгоритмом їх прикладного використання, які є реально придатними до впровадження в практику відкритих розробок.

Ключові слова: кар'єр, гірська порода, вибухове руйнування, вибух, породний масив, напруження, деформації, свердловинні заряди.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-114-122

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Більшість доступних на сьогоднішній день даних з виробничої звітності підприємств України, які спеціалізуються на вибуховому підриванні гірських порід в кар'єрах, переконливо свідчать про те, що якість гірничої маси, підготовленої до екскавації таким способом, дуже рідко відповідає оптимуму, під яким розуміють максимальну відповідність її грануляційного складу технічним вимогам з боку засобів виймання з розвалу, навантаження, транспортування, механічного дроблення та наступного подрібнення на збагачувальних фабриках. Головною причиною такої невідповідності, на наше переконання, є, насамперед, нерегулярна зональна розмаїтість мінералогічного складу, а звідси – фізико-механічних властивостей більшості гірських порід, а також станів останніх внаслідок їхнього генезису та тривалих техногенних впливів високої потужності, що й актуалізує невпинний пошук шляхів удосконалення даного процесу, який є одним з найвитратніших в ланцюгу технології розробки корисних копалин відкритим способом.

Аналіз досліджень і публікацій за означеним напрямом дає змогу узагальнено оцінити результати оцінки ефективності найбільш результативних аналітичних досліджень, оприлюднених у фахових виданнях останніх років щодо процесу руйнування скельних масивів вибухом [1-3], а також відгуків провідних гірничих інженерів-практиків і задокументованих свідочств виробничого застосування рекомендацій таких досліджень в умовах глибоких кар'єрів, коли буро-підривні роботи (БПР) ведуться за обмежених робочих площадок та високої інтенсивності робіт [4-8]. З даного аналізу однозначно слідує, що управління дією технологічних вибухів надзвичайно ускладнюється відповідно ускладненню геологічної будови родовищ та структури породних масивів, особливо в зонах контакту останніх, а також – постійного перетворення стану покладів корисних копалин під впливом техногенних факторів, серед яких найсуттєвішим є динамічний вплив масових вибухів (МВ).

За цих умов надзвичайно суттєво й масштабно проявляються (негативно) щонайменші прорахунки і невідповідності між цілеспрямовано закладеними в паспорти БПР параметрами управління дією вибуху та реальними властивостями окремих компонентів вміщуючого заряди ВР середовища, яке не просто змінюється, а – переважно – змінюється нетипово.

Невирішена частина проблеми ефективності технологічних вибухів у даному аспекті зумовлюється здебільшого саме відміченими невідповідностями, детермінованими нерідко, з одного боку, об'єктивною складністю визначення (а тим більше – прогнозування) стану та суттєвих властивостей компонентів породного середовища, а з іншого – далеко не точною відповідністю паспортних характеристик вибухових матеріалів реальним, враховуючи невідворотність цього внаслідок відхилень хімічного складу вихідних компонентів при виготовленні ВР, реакцій та розшарування за тривалого зберігання, сегрегації при заряджанні, вимивання складових в обводнених масивах тощо.

Постановка задачі дослідження за цих умов є розвиток – удосконалення методів вибухового руйнування скельних середовищ і, на переконання автора, головні зусилля у цьому плані мають бути зосереджені саме на адекватному узгодженні параметрів керованих впливів (паспортів БПР) та достовірно визначених властивостей елементів і зон породних масивів складної структури. Для чого пропонується завчасно об'єднувати найтипівіші для масиву породи за їх схожими властивостями в окремі умовні групи, а потім визначати для виділених груп:

діапазон динамічних навантажень, оптимальних для умов підривання близьких за фізико-механічними якостями груп порід;

достатньо точне об'ємно-просторове зонування (картування) зосередження в підривавому

блоці виділених груп;

оптимальне для структурованого за двома попередніми ознаками масиву розташування в ньому джерел імпульсної енергії, достатньої для його руйнування, з урахуванням: просторового розташування об'ємів згрупованих порід; оптимізованої для заданих умов підривання мережі вибухових свердловин з максимально раціональною в ній координатною прив'язкою кожної свердловини.

Надалі постає завдання адекватної компенсації потенційних невідповідностей, які можуть виникнути в даній системі внаслідок деяких цілеспрямованих відхилень від ідеальної мережі з міркувань адаптивного позиціонування реальних свердловин в межах прийнятних допусків, після чого вирішується задача конкретизації геометричних й енергетичних параметрів зарядів ВР в окремих свердловинах та їх групах. Завершується даний процесний алгоритм оптимізацією «мозаїчно-континуального» динамічного навантаження масиву шляхом проектування «мережевого» короткоуповільненого підривання усієї наявної множини зарядів та їх частин за як завгодно складного щодо траєкторій послідовно-паралельного поширення ініціювання детонаторів, але чітко регламентованого проектом масового вибуху, «квантованих» мінімальним часовим інтервалом заданих затримок спрацювання

Безумовно, дане завдання є надзвичайно складним та строкатим, але сукупність компонентів його середовища є ні чим іншим, як класичною складною динамічною умовно закритою системою, тому вирішення його уможливується виключно методами теорії систем і системного аналізу, а, враховуючи сучасні обчислювальні технології, стає, хоч і громіздким, та, зрештою, – цілком досяжним.

Саме даному аспекту й підпорядковано матеріал цієї статті. Для чого необхідно виконати усебічно обґрунтований вибір надійно апробованих дослідницьких комплексів за означеними вище напрямками для формування теоретичної та методологічної бази обґрунтування збалансованого енергонасичення породного масиву підриванням комбінованих свердловинних зарядів.

Викладення матеріалу та результати. Чисельними теоретичними дослідженнями й експериментальними вишукуваннями однозначно доведено, що в умовах відкритої розробки ефективність БПР значною мірою залежить від повноти урахування фізичної анізотропії масиву та забезпечення максимально відповідного їй динамічного навантаження останнього вибухом. Під відповідністю в даному контексті розуміється таке параметричне сполучення обох VS факторів, за якого досягається забезпечення максимально можливого переведення підірваної гірничої маси в запланований стан. За цих умов домінують два цільових показника:

гранулометричний склад отриманого продукту;

рівень знеміцнення матеріалу всередині окремих фрагментів породи.

Другий показник є певною мірою «прихованим», так як нерідко – при зовнішній цілісності кусків – їх загальна міцність і рівень мікропорушень породи в них коливається в надзвичайно широких межах, що стає серйозним ускладнюючим фактором для гірників та збагачувальників, так як перших провокує на завищення питомої витрати ВР (в результаті чого відбувається перездрибнення грануляту), а других – на нераціональне розбалансування технологічного процесу здрибнення руди перед її збагаченням з причини недооцінки ступеня «прихованого» розкриття мінеральних зерен вибухом.

На наше переконання, відмічені невідповідності зумовлюються значною мірою саме недостатньою *системністю* підходу до розглянутого процесу, коли одні з дослідників зосереджуються на результуючій гранулометрії, а інші – на превентивному знеміцненні породи. Адже усі без виключення фізичні процеси вибухових технологій безпосередньо і самим наскрізним чином пов'язані між собою і є взаємозалежними внаслідок приналежності до єдиної системи.

Логічно, тут виникає нова проблема визначень внаслідок емерджентності систем, адже єдиного інтегрального критерію оцінки значення таких різних показників як кускуватість підірваної гірничої маси (її грансклад) та рівень знеміцнення породи в кусках поки що не існує.

Безумовно, охопити усе і зразу в даному випадку неможливо, але – чим і відрізняється наш підхід від інших – ми плануємо дослідження з огляду на відмічену єдність об'єкту і процесів, які його супроводжують, незважаючи на вимушену етапність та фрагментарність реалізації завдання.

Першочерговим порядком при цьому мають бути максимально конкретизованими: *а)* анізотропні характеристики середовища, у якому відбувається вибух, та *б)* можливості керованого

спрямування енергії вибуху за певними напрямками. Повне й адекватне узгодження чого є цільовим.

В контексті першого завдання варто ще раз звернути увагу на дещо хибне на нашій погляд визначення анізотропії масиву здебільшого за відповідними характеристиками кристалів породотворюючих мінералів. Деякі з дослідників навіть вважають достатнім знати превалюючу азимутальну орієнтацію останніх в масивах, а потім екстраполують їх властивості на весь масив. Але ж, хоча, переважно системна тріщинуватість масиву формується під впливом кристалогенної, внаслідок чого дійсно здебільшого співпадає з нею, превалюючий напрям кристалічних осей породотворюючих мінералів далеко не завжди зумовлює орієнтацією природних системних тріщин, а техногенні тріщини подекуди і зовсім виникають та розвиваються в на перший погляд парадоксальну – діагональну тріщинуватість. А сама по собі анізотропія мінеральних кристалів є практично необмежено варіативною і не обов'язково ортогональною (рис 1).

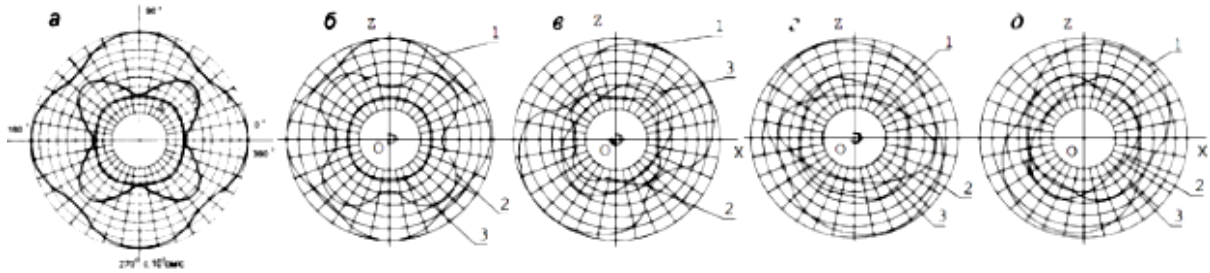


Рис. 1. Широка варіативність анізотропії фазових швидкостей: 1 – поздовжньої, 2, 3 – поперечних хвиль в кристалах германата вісмута (а), сіленіту (б), авгіту (в), польового шпату (г), кварцу (д)

У цілому ж на результати БПР найбільший вплив справляє системна макротріщинуватість масиву. При цьому в породах, які тривалий час піддавалися регулярним потужним динамічним впливам, що є типовим для кар'єрних зон, макротріщини все більше розділяють масив на окремі блоки, внаслідок чого в ньому утворюються хвилеводи, і це все більш суттєво і масштабно позначається на результатах масових технологічних вибухів.

Частіше за субортогональної орієнтації системних тріщин виникнення в масиві хвилеводів зумовлює формування фронту хвиль від центрально розташованої свердловини у вигляді чотирьох осесиметричних гіпербол (рис. 2).

Наші гіпотези (потім – експериментальні спостереження) свідчать про те, що близький до гіперболічного характер векторної діаграми змінюється на епіциклоїдний у міру зростання ступеня і щільності заповнення макротріщин в породі. Але це – з одного боку. А з іншого – дещо близьке до цього відбувається по мірі зниження бризантності ВР, що і підтвердилось експериментально. Зрештою, в обох випадках осесиметричні гіперболи чотирьох координатних квадрантів поступово трансформуються в наближення до трохоїди.

Спостереження: чим нижчою є бризантність ВР, тим більш подібними стають кругові векторні діаграми фронтів вибухових хвиль навколо заряду А з такими (за однакової бризантності ВР) зі зростанням ступеня заповнення щілин в породі та акустичної жорсткості заповнювача; і – навпаки.

Слідство 1: при вищій акустичній жорсткості заповнення тріщин, чим самої породи масиву, переважно формуються гіперболічні межі хвильових каналів, якщо ж навпаки – трохоїдні.

Слідство 2: у затиснутому середовищі управляти гранскладом підірваної гірничої маси потрібно обов'язково з урахуванням каналізу-

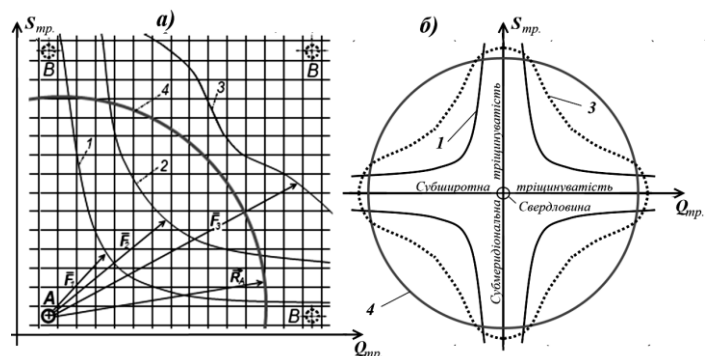


Рис. 2. Закономірність трансформації контуру кругової векторної діаграми фронту хвилі від гіперболічних – 1, 2 до епіциклоїдної (трохоїдної) – 3: А – підірвана свердловина; В – неактивовані заряди; $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \vec{F}_3, \vec{R}_A$ – відповідно, вектори утворюючих гіпербол 1 і 2, трохоїди 3 та кільцевої 4, яка відповідає ізотропному середовищу

вання поширення хвиль від підірваного заряду.

Авторська оригінальність методологічного підходу в даному випадку полягає в чіткому розмежуванні при вирішенні прикладних задач «кристалогенної» та «тріщиногенної» анізотропії масиву, які, хоч і корелюють між собою певним чином, але далеко не завжди жорстко зумовлюють векторну аналогічність акустичного каналотворення в породному масиві.

Також вельми проблемним, на наш погляд, залишається урахування речовинного складу та стану заповнювача тріщин [9].

Проводячи спостереження під час експериментальних підривань породних блоків в умовах кар'єрів «АрселорМіттал Кривий Ріг» та Південного ГЗК протягом 2022-2024 рр., ми відмітили деяку невідповідність отриманих результатів розрахунковим. Наша робоча гіпотеза пояснює це недосконалістю коефіцієнту K_{cm} [10], який враховує характеристики заповнення макротріщин у сполученні з кінетикою вибуху при проходженні пружною хвилею через них, що супроводжується «сходинковим» зрізанням її амплітуди при перетинанні структурних порушень породи при розгляді масиву як сукупності пружних стержнів. Ми пропонуємо додатково будувати апроксимовано усереднений графік 1 і до розрахунків приймати дані з нього (рис. 3).

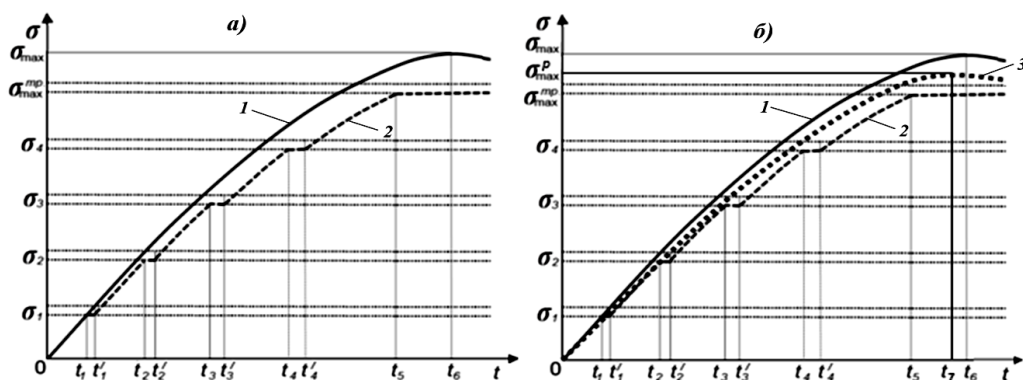


Рис. 3. Модифікація – а та усереднення – б графіка залежності напружень у фронті пружної хвилі під впливом системної тріщинуватості породного масиву: 1 – формалізована крива; 2 – модифікована крива; 3 – апроксимовано усереднений графік

Але дане подання є повністю ідеалізованим, так як відображає лише випадок, коли тріщини орієнтовані виключно перпендикулярно (нормально) вектору руху хвилі (рис. 3). Адже реально фронт хвилі є сферичним і кругова векторна діаграма її розповсюдження в середовищі з ортогональною (субортогональною) тріщинуватістю створює (внаслідок проходження й відбивання енергії на межі шарів з різною акустичною жорсткістю) енергетичні перетворення, які апроксимуються функцією, близькою до гіперболічної (рис. 2).

Тому, з урахуванням викладених міркувань, ми пропонуємо ввести у формулу коригуючий комплементарний компенсатор кутових впливів k_α , наразі обмежуючись законами кристалооптики, та визначати згаданий вище коефіцієнт вже як

$$K_{квт} = K_{cm} \cdot k_\alpha + K_{тр} = \sqrt{f \cdot \rho_{тр}} \cdot \left(1 - \frac{r_{ф.х.} \cdot g_{тр}}{A} \right)^{(1-\rho_{тр})},$$

де f – міцність породи; $\rho_{тр}$ – рівень заповненості тріщини (відношення об'єму заповнювача V_3 до об'єму тріщини $V_{тр}$ ($\rho_{тр} = V_3 / V_{тр}$)); $r_{ф.х.}$ – відстань від заряду до фронту хвилі; $g_{тр}$ – показник питомої тріщинуватості масиву ($g_{тр} = \square_{тр} / l_{тр}$).

Ця обставина є надзвичайно важливою, адже в реальних породах при їх підриванні «тріщиногенна» анізотропія масиву незрівнянно потужніше проявляється, чим «кристалогенна».

При цьому особливого значення набуває обводненість середовища.

Тому введення додаткового враховуючого тріщинуватість масиву і коригуючого її коефіцієнту $K_{квт}$ є не забаганкою, а вельми необхідним, враховуючи, що від кута перетину тріщини хвилею енергія останньої може континуально переспрямовуватися від повного проходження через межу розділу середовищ, до повного відбиття. А це подекуди є набагато дієвішим усієї сукупності решти факторів, включаючи дисипативні перетворення у фронті хвилі, зумовлені тріщинуватістю, й інші.

Уточнення даного коефіцієнту має суттєво підвищити точність розрахунків в математичних моделях технологічних вибухів, а відтак – ефективність БПР. Тому подальше вдосконалення його визначення й операційного використання ми закладаємо в перелік завдань нашого подальшого дослідження.

Виходячи з закладеної в основу дослідження ідеї використання в якості основного засобу управління дією вибуху комбінованого заряду, ми особливу увагу приділяємо також закономірностям динаміки формування поля напружень при підірванні масиву підібраними з певних міркувань сполученнями різнотипних ВР (рис. 4).

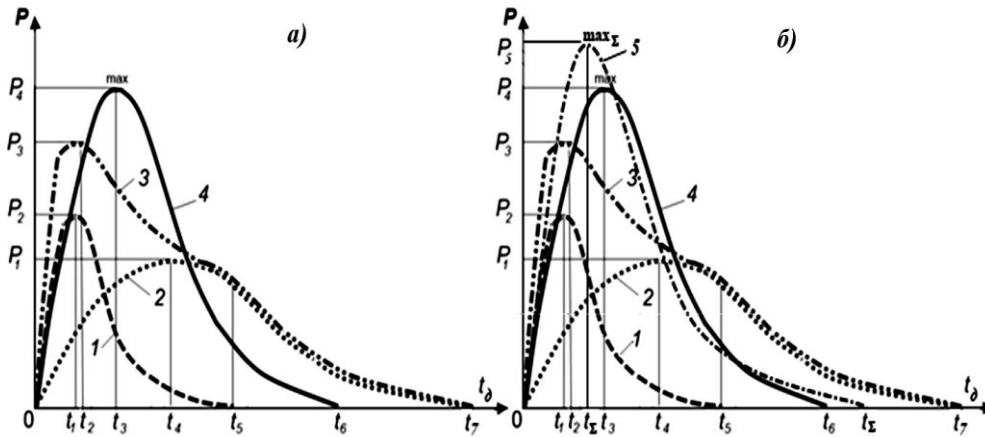


Рис. 4. Трактуювання *a* – відоме та *б* – авторське характеру залежності детонаційних особливостей підірвання комбінованого свердловинного заряду від його конструкції та співвідношення мас ВР різної вризантності

В дослідженнях проф. Жукова С.О. (рис. 4*a*) при поданні характеру формування енергетичних параметрів вибухових хвиль при сумісному підірванні ВР з різною бризантністю стверджується, що результуючий рівень тиску (крива 4) має визначатися не алгебраїчною сумою (крива 3) відповідних показників високобризантної ВР (крива 1) та низькобризантної (крива 2), з чим ми повністю згодні. Але що стосується трактування особливостей розвитку вибухового процесу за умови «перетиснутої» детонації з визначенням максимуму P_4 в момент $t_3 = t_{BB} + (t_{NB} - t_{BB})/3$, та t_6 , як $t_6 = t_5 + (t_7 - t_5)/3$, ми пропонуємо дещо іншу інтерпретацію (рис. 4*б*), за якої максимум зміщується до P_5 в момент t_2 , з урахуванням «стискання» періоду повної детонації даного типу заряду, над аналітичною формалізацією чого автор працює зараз.

Таким чином, ми логічно підійшли до другої – зустрічної першій – задачі забезпечення максимальної відповідності параметрів вибуху характеристикам середовища, яке руйнується ним, тобто – породного масиву. Ця задача, зрештою, є предметом і головною метою усіх досліджень щодо вибухових технологій в гірництві, але, незважаючи на їх чисельність, актуальність не спадає, оскільки єдине «проривне» рішення поки що не передбачається, а відтак, навіть незначне удосконалення досягнутого забезпечує суттєві позитивні наслідки, враховуючи масштабність науково-практичної проблеми та витратність БПР в кар'єрах.

У даному аспекті головні напрацювання представлені надзвичайно широким переліком засобів руйнування порід – бурової та рихлячої техніки, вибухових і супутніх матеріалів та пристроїв тощо.

Значна частина технічних рішень стосується удосконалення конструкції свердловинних зарядів, включаючи комбіновані та спрямованої дії [11-13], з яких ми виділили для порівняльного аналізу ефективності представлені на рис. 5. Маючи справу зі свердловинними зарядами з лінійно розосередженою в них ВР (рис. 5*a*), ми проаналізували принципи їх конструювання і дії [14, 15], дані результуючого гранскладу підірваної гірничої маси за окремими зонами та шарами в розвалі й сформулювали припущення щодо формування навколо груп зарядів зон максимального й оптимального здрібнення породи (рис. 5*б*). Подальший компаративний та каузальний аналіз переконав нас у доцільності надання розглянутим зарядам спрямованої радіально дії, що й спонукало до розробки власної конструкції.

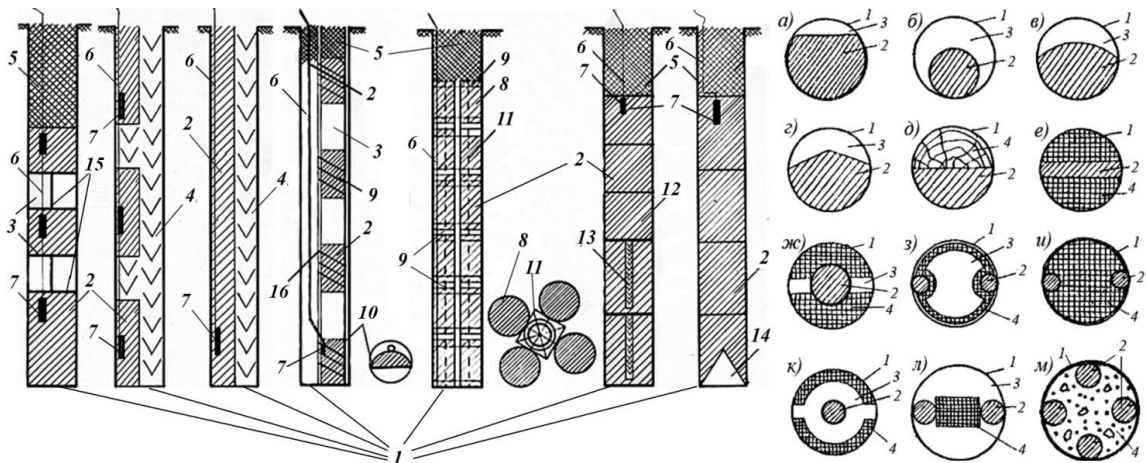


Рис. 5. Компонування комбінованих свердловинних зарядів по висоті (ліворуч) та в поперечному перерізі (праворуч): 1 – свердловина; 2 – вибухова речовина; 3 – повітряний проміжок; 4 – інертний заповнювач; 5 – забивка; 6 – ДШ (хвилевід); 7 – заряд ВР; 8 – повітряний проміжок; 9 – проміжний детонатор; 10 – патрони ВР; 11 – кріплення патронів ВР до дерев'яного сердечника; 12 – дерев'яна пластинка; 13 – дерев'яний сердечник; 14 – шашки ВР; 15 – шашки з сердечником; 16 – кумулятивна воронка; 15 – дерев'яний каркас; 16 – розділююча рейка

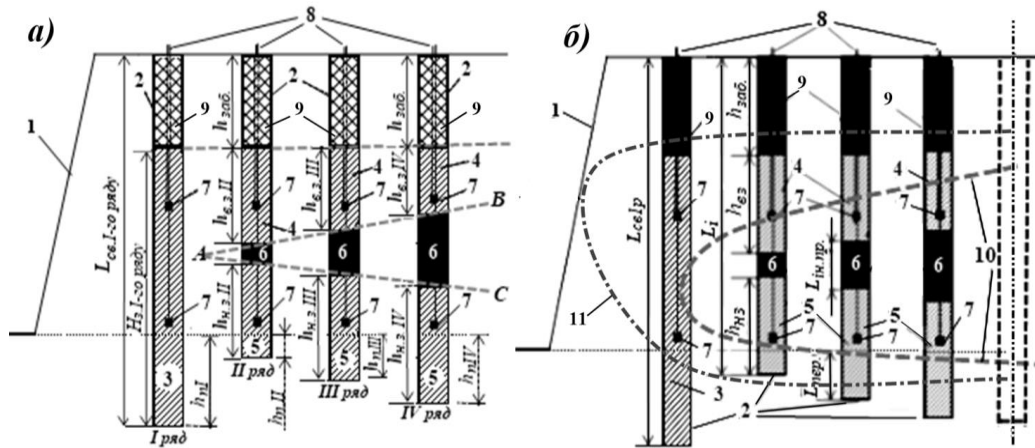


Рис. 6. Розміщення на уступі груп свердловинних зарядів з лінійно розосередженою в них ВР: 1 – свердловини, 2 – суцільний заряд свердловини 1-го ряду; 3, 4 – відповідно верхні та нижні частини зарядів, 5 – проміжні детонатори, 6 – хвилеводи, 7 – інертні проміжки; 8 – забивки, 9 – укіс уступу; 10 – гіпотетичний контур зони максимальних руйнувань за випереджаючого підривання в затиснутому середовищі свердловин II, III, IV рядів відносно першого ряду; 11 – гіпотетичний контур зони оптимальних руйнувань за послідовного підривання всіх свердловин групи; АВ, АС – лінії розмежування за заданим алгоритмом меж ВР та інертного заповнювача

Таким чином, після аналізу множини свердловинних зарядів основних конструктивних рішень та їхньої результативності, нами свого часу було розроблено й успішно випробувано авторську пропозицію щодо формування комбінованого заряду за допомогою полімерного рукава. Спосіб відрізняється від відомих тим, що дозволяє роздільно формувати різнотипні ВР в широкому діапазоні співвідношення їх паралельно орієнтованих мас, ізолювано компоновані за довжиною свердловини (рис. 7). Така можливість є виключно ефективною у разі необхідності забезпечення спрямованої дії вибуху, наприклад, для створення відрізних, екрануючих або дренажних щілин в породному масиві, при завідкості контурних поверхонь кар'єрних уступів (контурному підриванні) тощо.

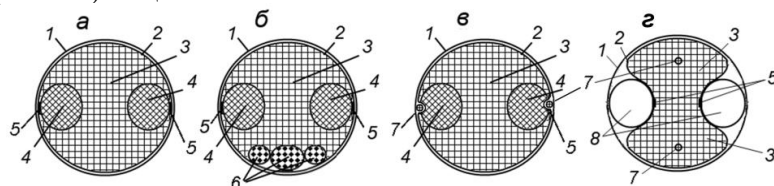


Рис. 7. Приклади формування свердловинних зарядів пропонованим способом: а, б, в – у вивертій оболонці; г – в не вивертій: 1 – свердловина; 2 – поліетиленова оболонка; 3 – заряд основної ВР; 4 – заряди ВР з відмінною від основної бризантністю; 5 – місця проплавленої оболонки; 6 – лінійні ємності для засобів придушення пилу, або – демпфери; 7 – джгути ДШ; 8 – утворювачі лінійних кумулятивних жолобів, заповнені високопористим матеріалом

Попри візуальну складність конструкції, технологічно подібні заряди та окремі їх лінійні ємності формуються доволі просто й у надзвичайно широкому співвідношенні їх діаметрів, розмір яких обмежується виключно лише розміром зерен заповнюючого матеріалу..

Конструкції та ВР основного й додаткових лінійних зарядів, а також допоміжних невибухових речовин визначаються з урахуванням фізико-механічних властивостей порід, структури та стану масиву, співвідношення акустичної жорсткості порід зі швидкістю детонації ВР, її критичних діаметрів та імпедансу, а зрештою – кінцевої мети та умов підривання.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином, за головної мети дослідження – зниження питомої витрати ВР із забезпеченням необхідної рівномірності дроблення в межах заданого гранулометричного складу підірваної гірничої маси – досягнення результату планується за рахунок комплексного вирішення залежних взаємно задач в межах єдиного простору, який у даному контексті розглядається як *система*, з усіма її атрибутами і властивостями.

Саме системність підходу зумовлює на перший погляд дещо надто різновекторні вишукування, частина з яких представлені вище, але усі вони цілеспрямовано мають вирішувати окремі задачі єдиної макрорівневої проблеми, вихідна емерджентність якої вимагає суміщене в кар'єр-системі й у часі, узгоджене операційно певними алгоритмами.

Список літератури

1. Babii K, Chetveryk M, Perehudov V, Kovalov K, Kiriia R, Pshenychnyi V. (2022) Features of using equipment for in-pit crushing and conveying technology on the open pit walls with complex structure Mining of Mineral Deposits, 16 (4), 96-102 <https://doi.org/10.33271/mining16.04.096>
2. Ткачук К. Н., Ткачук К. К., Тверда О. Я., Дыняк С. В. Управление энергией взрыва. International Scientific Journal «Theoretical & Applied Science». № 11 (19). 2014. - С. 77-83.
3. Тверда О. Я., Воробйов В. Д. Обґрунтування раціональних розмірів і геометрії мережі свердловин за фактором пропрацювання підосви уступу для тріщинуватих скельних порід. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки. № 3 (74). 2015. - С. 140-148.
4. Перегудов В. В., Жуков С. А. Пути повышения качества взрывных работ при разрушении горных пород сложной структуры: монография. - Кривий Ріг: Видавничий дім, ISBN 966-7388-47-6. 2002. - 305 с.
5. Терентьев О. М., Клещов А. Й., Гонтьарь П. А., Тверда О. Я. Резонансне енергоощадне руйнування гірських порід: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Том 1. 2018. - 149 с.
6. Тищенко С. В., Єременко Г. І., Малих Д. Ю., Мартинюк М. В., Кривенко Ю. Ю. Спосіб формування свердловинних зарядів вибухової речовини (Patent No. 84967). 2013.
7. Бизов В. Ф., Федоренко П. Й. Вибухові роботи. Кривий Ріг: Мінерал, 2001. - 230 с.
8. Kutter H.K. *Stess analysis* of a pressurized circular pole with radial cracks in an infinite elastic plate // Fracture Mech, t.6. № 3. 1970. – P. 223-247.
9. Горбачевич Ф. Ф. Отражение и прохождение упругих волн на границе раздела сред. — Апатиты: Изд. Кольского филиала АН СССР, 1985. - 98 с.
10. Жуков С. А. Теоретические аспекты попутной добычи природного камня. Монография. ISBN 966-7103-15-3. - Кривой Рог.: Минерал, 1999. – 187 с.
11. Бротанек И., Вода Й. Контурное взрывание в горном деле и строительстве. - М.: Недра, 1983. - 144 с.
12. Фокин В. А., Тарасов Г. Е., Тогунов М. Б., Данилкин А. А., Шитов Ю. А. Совершенствование технологии буровзрывных работ на предельном контуре карьеров. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН. 2008. - 224 с.
13. Друкованый М. Ф., Комир В. М., Кузнецов В. М. Действие взрыва в горных породах. - К.: Наукова думка, 1973. - 184 с.
14. Перегудов В. В. Учет свойств разрушаемого массива при взрывной уступной отбойке // Разраб. рудн. месторожд.: Кривой Рог. - Вып. 78, 2002. - С. 16-21.
15. Фролов О. О. Використання ефекту зустрічі детонаційних хвиль для підсилення дії вибуху на рівні підосви уступу. Вісник НТУУ «КПІ» / Гірництво. – К.: НТУУ «КПІ»: ЗАТ «Техновибух», 2002. - С. 63-65

Рукопис подано до редакції 04.03.24

В.В. СУГЛОБОВ, д-р техн. наук, проф., В.Г. КРУПКО, канд. техн. наук, доц.
Приазовський державний технічний університет
І.В. КРУПКО, канд. техн. наук, доц., Технічний університет «Метінвест політехніка»
А.В. ВЕСНІН, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

МЕХАНІЗМИ ЗЕМЛЕРИЙНИХ МАШИН З ХВИЛЬОВИМИ ЛАНЦЮГОВИМИ ПЕРЕДАЧАМИ

Мета. Стаття присвячена вирішенню актуальної задачі по зниженню енергетичних затрат при руйнуванні ґрунтів робочими органами землерийних машин за рахунок застосування в приводах виконавчих механізмів хвильових ланцюгових передач.

Методи дослідження. Зміна швидкості в процесі копання ґрунтів веде до зниження опору копання за рахунок динамічного впливу робочого органу на ґрунт. Найбільш наглядним прикладом таких явищ де необхідно змінювати швидкість робочих органів можна вважати процес взаємодії ківшів екскаваторів з ґрунтом, будівельними матеріалами або гірничими породами, коли перед робочим органом виникає значне ущільнення матеріалу що руйнується і накопичується в ківшах. Це явище істотно впливає на процес різання ґрунтів за рахунок ущільненого ґрунту (нароста), який утворюється в зоні взаємодії ріжучої кромки і ґрунту що називають також «ущільненим ядром». Показано, що хвильові ланцюгові передачі здатні забезпечувати змінювання передатного відношення привода механізму, а відповідно і швидкості веденого елемента, що може забезпечити імпульсний рух веденої ланки, наприклад робочого органу (ковша), а відповідно і руйнування такого ядра ґрунта.

Наукова новизна. Авторами проаналізовані відомі конструкції хвильових ланцюгових передач, а також визначені проблемні питання, які потребують вирішення. Запропоновані конструкції приводів механізмів підйома і натиску ковша з хвильовими ланцюговими передачами, які відрізняються спрощеною конструкцією та спрощеною технологією виготовлення, а їх використання, забезпечить нерівномірну (пульсуючу) швидкість веденого елемента. Наведені залежності по визначенню параметрів хвильових ланцюгових передач дозволяють визначати і в широкому діапазоні змінювати передатне відношення приводів наведених механізмів.

Практична значимість. Виконані дослідження підтверджують ефективність використання хвильових ланцюгових передач у виконавчих механізмах землерийних машин. Розроблено також методику визначення оптимальних кінематичних параметрів та вплив на їх величину конструктивних параметрів елементів передачі, а саме кількості і діаметрів котків, кроку ланцюга та інших.

Результати. Стаття може бути корисною підприємствам та інженерам механікам зайнятих конструюванням і експлуатацією гірничих і землерийних машин і рекомендується до публікації в збірнику науково-технічних робіт.

Ключові слова: енергетичні витрати, руйнування ґрунтів, натиск ковша, ланцюгові передачі.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-122-126

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В сучасному господарському комплексі України значна увага буде приділятися технологічним процесам, пов'язаних з видобутком корисних копалин, відбудовою зруйнованих війною інфраструктури, промислових, цивільних будівель, шляхів і інших об'єктів. Названі процеси потребують застосування сучасних будівельних, гірничих, підйомно-транспортних, землерийних і інших типів машин, які можна віднести до технологічних [1,4]. Ефективна робота наведених машин в значній мірі залежить від конструкцій робочих органів їх виконавчих механізмів та одного із основних складових елементів технічних систем, а саме приводів та передатних механізмів. Передатні механізми забезпечують необхідний режим роботи, задані параметри і закони руху робочих органів, або інших ведених кінцевих елементів машин. Таким чином, удосконалення конструкцій приводів на основі сучасних досліджень механічних передач, пошук нових фізичних ефектів, що дозволять підвищити ефективність застосування машин, зменшити енергетичні затрати на виконання технологічних операцій являється досить актуальною науково-технічною задачею.

Аналіз досліджень і публікацій. Розроблені рекомендації по застосуванню хвильових ланцюгових передач з метою зменшення енергоємності процесів руйнування ґрунтів у приводах гірничих і землерийних машин [2,5,7,8]. Ефективність застосування таких передач полягає в забезпеченні пульсуючого (нерівномірного) руху робочих органів, що веде до зменшенню опору руйнування ґрунтів. Хвильові ланцюгові передачі доцільно застосовувати в приводах сучасних млинів для забезпечення процесів їх пуску [3,9] в механізмах – кантувачах, наприклад кувальних кранах [10] та ряді інших машин. Розроблено цілий ряд приводів виконавчих ме-

ханізмів землерийних машин, а також проведені дослідження [7,8] показали, що для кожного конкретного механізму необхідно мати цілий ряд вхідних і вихідних параметрів механізмів (наприклад закон руху, швидкість час вистою веденої ланки та інші). Таким чином питання застосування хвильових ланцюгових передач потребує в кожному окремому випадку обґрунтування кінематичних схем і параметрів, що здатні забезпечити необхідний режим роботи виконавчих механізмів і машин в цілому.

Постановка завдання. Метою даної роботи є обґрунтування доцільності застосування передатних механізмів з хвильовими ланцюговими передачами та розробка методики визначення їх основних параметрів для приводів гірничих і землерийних машин.

Для досягнення поставленої мети необхідно : обґрунтувати доцільність застосування хвильових ланцюгових передач для зменшення енергоємності процесу копання за рахунок нерівномірного (пульсуючого) руху ковша ; :провести аналіз конструкцій приводів землерийних машин і умов роботи виконавчих механізмів однокішшевих екскаваторах; розробити методику по визначенню конструктивних і кінематичних параметрів хвильових ланцюгових передач з урахуванням умов роботи виконавчих механізмів технологічних машин.

Викладення матеріалу та результати. В роботах [4] проф. Баладіньського В.Л. показано, що зміна робочих швидкостей машин традиційної дії та створення машин з динамічними робочими органами потребує розробки виконавчих механізмів і їх приводів здатних руйнувати ґрунти при менших енергетичних затратах, тому конструювання й експлуатації високопродуктивних землерийних машин зі змінним робочими швидкостями робочого органу, наприклад ковша, призводить до створення умов динамічного руйнування .

Найбільший динамічний вплив на масив при роботі екскаватора відбувається при різких коливаннях навантаження на робочому органі. При цьому різка зміна зусилля копання і коефіцієнта динамічності навантаження призводить до зміни амплітуди коливання сейсмоприймачів, як в масиві, так і після його розпушення вибухом, що дозволяє значно (на 15-20%) зменшити енергетичні затрати на руйнування ґрунтів [4]. Досягти значних коливань швидкості робочого органу в процесі копання ґрунтів можливо за допомогою додаткового елемента в приводах виконавчих механізмів сучасних однокішшевих екскаваторів, а саме застосуванням хвильових ланцюгових передач. Ефективність застосування таких передач полягає в забезпеченні пульсуючого (нерівномірного) руху робочих органів, що веде до зменшенню опору руйнування ґрунтів.

Хвильова ланцюгова передача, яка забезпечує дискретність руху веденої ланки механізмів наведена на рис.1 [7], умовно складається з корпусу 1, нерухомих зірочки 2, водила 4 з котками 3, багаторядного ланцюга 5 і приводного валу 6, який забезпечує передачу крутного моменту на водило з котками. Таким чином, при повороті водила з котками відбувається переміщення ланцюга на кут, величина якого залежить від параметрів ланцюгової передачі, і конструктивних параметрів водила з котками [9].

Застосування механізмів з приводом на основі хвильового ланцюгового редуктора відкриває широкі перспективи в напрямку інтенсифікації землерийних робіт, а удосконалення конструкцій приводів дозволить досягти, зниження енергоємності процесів землерийних машин [8-10]. Враховуючи особливості процесів копання гірничих порід і навантаження насипних вантажів застосування приводів, що забезпечують нерівномірну (пульсуючу) швидкість приведе до підвищення продуктивності землерийних машин. На рис.2 зображений механізм натиску екскаватора, який складається із рукояті 1, закріпленої за допомогою сідлового підшипника 2, переміщення якої здійснюється багаторядним ланцюгом 3 хвильового ланцюгового редуктора 4 через відхиляючі ролики 5.

Механізм натиску екскаватора з хвильовою ланцюговою передачею працює таким чином: багаторядний ланцюг 3, закріплений на кінцях рукояті 1, отримує переміщення від хвильового ланцюгового редуктора 4. Відхиляючі ролики 5 забезпечують переміщення багаторядного ланцюга 3 у потрібній площині, а також безперебійну роботу хвильового

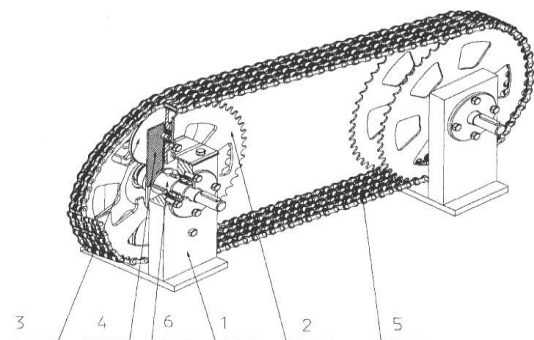


Рис. 1. Хвильова ланцюгова передача: 1 - корпус; 2 - нерухома зірочка; 3 - катки; 4 - водило; 5 - ланцюг; 6 - приводний вал

ланцюгового редуктора 4, що вкупі гарантує переміщення рукояті 1 вздовж сидлового підшипника 2.

На рис. 3 приведено підйомний механізм екскаватора. Він складається із рукояті 1, ковша 2, блоків стріли 3, підйомних канатів 4,5, редуктора 6, хвильового ланцюгового редуктора 7, асинхронних електродвигунів 8,9, підйомної лебідки ланцюгового хвильового приводу 10, підйомної лебідки класичного приводу 11.

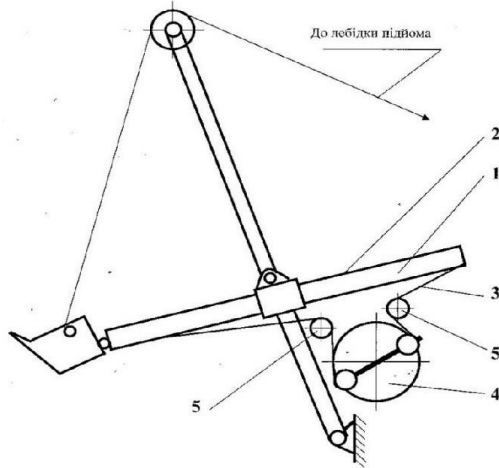


Рис. 2. Конструктивна схема механізму натиску ковша екскаватора - прямої механічної лопати

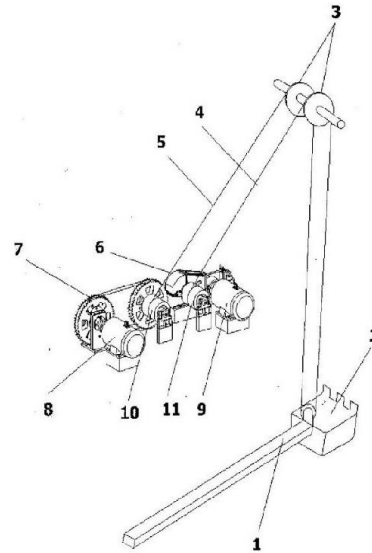


Рис. 3. Підйомний механізм екскаватора

Підйомний механізм екскаватора працює таким чином. Від хвильового ланцюгового редуктора 7 за допомогою підйомної лебідки 9 робочому органу 2 завдається пульсаційний рух, а вкупі з рухом підйомної лебідки 10 здійснюється підйом ковша та руйнування ґрунту. Опускання ковша та розвантаження відбувається без участі хвильового ланцюгового приводу.

Обґрунтування параметрів хвильових ланцюгових передач розглянемо на прикладі конструктивної схеми передачі показаної на рис.4, яка дозволяє передати принцип роботи такої передачі. На практиці це здійснюється так:

- жорстке колесо 3 виконується збірним з двох паралельних нерухомих співвісних дисків;
- між дисками розташовується генератор хвиль 1 (водилю з котками) з «утопленими» в зазор між цими дисками котками, що деформують гнучкий елемент (ланцюг);
- умовне «гнучке колесо» утворюється з ланцюга 5 в результаті відсутності жорсткого дна та збільшення периметру гнучкої частини, яка перетворюється в гнучкий зв'язок;

Додається новий – ведений диск 4 кінематично об'єднаний з жорстким колесом та генератором хвиль гнучким зв'язком.

Миттєве значення передатного числа для цієї передачі знаходиться з виразу

$$\varphi = 0,5 - \alpha_0. \quad (1)$$

Кут α_0 залежить від співвідношення конструктивних параметрів складових елементів передачі (рис. 4)

$$\alpha_0 = \frac{\arccos(R_0 - r)}{R}. \quad (2)$$

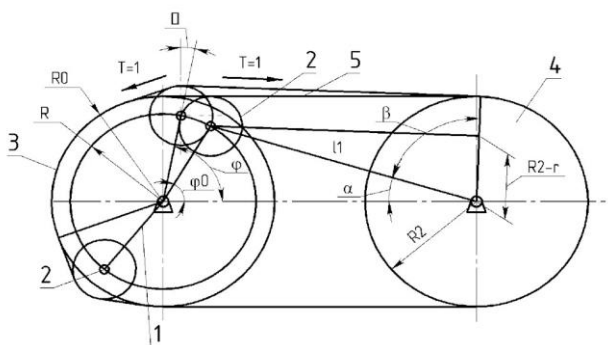


Рис. 4. Хвильова передача з зовнішнім обкатуванням гнучкого зв'язку (неспіввісна) передача

Принцип дії такої передачі полягає у пульсуючому русі веденої ланки, наприклад, зірочки 4, яка буде повертатися відносно вісі веденого колеса на кут, що відповідає переміщенню ланцюга 5 котком (роликком) 2 з радіусом (r) на шлях, рівний кількості ланок, що вступають в

контакт з цим роликом. Таким чином, обертання водила з роликами 2 з постійною кутовою швидкістю, забезпечує пульсуючу кутову швидкість обертання зірочки 4. Геометрична схема та основні параметри провідного елемента ланцюгової хвильової передачі визначаються зі схеми (див. рис. 4), звідки видно, що центри котків з радіусом (r) розміщені на колі радіусом (R). Нерухома зірочка ланцюгової передачі може виконуватися з різним числом зубів, радіус ділильного кола зірочки (R_0) [7,8].

Фіктивний радіус котка (r_ϕ) з урахуванням товщини ланцюга, визначається зі співвідношення

$$r_\phi = r + 0,5h, \quad (3)$$

де h – ширина ланцюга; r - радіус котка.

Кут активної взаємодії котка з ланцюгом, в межах якого виконується поворот веденої зірочки на заданий кут φ_3 (рис. 2), визначиться за формулою

$$\cos \alpha = \frac{R_0 - r_\phi}{R}. \quad (4)$$

Ланцюг та ведена зірочка залишаються нерухомими під час часу, відповідному повороту водила на кут (рис. 2).

Описане вище переміщення ведучої гілки ланцюга забезпечується за рахунок того, що з боку веденої гілки ланцюга котком їй передається така ж ділянка ланцюга ΔS (рис.2), при цьому протилежно розташований каток переходить з положення IV в положення V. Канатний барабан при цьому повертається на кут

$$\varphi_3 = \frac{\Delta S \cdot 360}{\pi D_3}, \quad (5)$$

де D_3 – діаметр початкового кола зірочок, встановлених на канатному барабані.

При подальшому обертанні водила (рис.2) на кут γ (перехід котка з положення II в положення IV через проміжне положення III) відбувається холоста перегонка гофра abc , а робочі гілки ланцюга не переміщуються (точки a та c – нерухомі). Барабан залишається нерухомим.

Число котків водила, в даному випадку, рівним двом, для забезпечення достатнього числа зубів зірочки, що знаходяться в зачепленні з ланцюгом [4]. В залежності від потреб в зміні кінематичних параметрів привода їх число може змінюватись в межах 1-5 [8,10].

Очевидно, що для нормальної роботи приводу необхідно, щоб в положенні котка з центром в точці II ланцюг був повністю виведений із зачеплення згідно співвідношенню

$$R_n = R_0 + r + \Delta, \quad (6)$$

де Δ - гарантований проміжок між зубами зірочки і ланцюгом.

Середнє значення передаточного числа хвильового ланцюгового приводу

$$i_{у.н.} = \frac{\pi D_3}{k \cdot (t_y + \Delta z)}, \quad (7)$$

де k – кількість котків водила.

Таким чином дана методика дає можливість визначити основні геометричні та кінематичні параметри хвильової ланцюгової передачі. Основними з яких є: фіктивний радіус котка, кут повороту водила, переміщення ланцюга, кут оберту канатного барабана, середнє значення передатного відношень.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Розглянуті в роботі хвильові ланцюгові передачі мають цілий ряд специфічних особливостей до яких відносяться:

забезпечення нерівномірної (пульсуючої) швидкості руху веденого елемента ,яка залежить від конструктивних параметрів передачі;

дозволяє в широкому діапазоні змінювати передатне відношення привода механізму з можливим вистоем веденого елемента або без нього;

при відповідній кутовій швидкості ведучого елемента забезпечити імпульсний рух веденої ланки, наприклад робочого органу (ковша), що показано на механізмі натиску екскаватора;

застосування приводів з хвильовою ланцюговою передачею механізмів підйома і натиску

дозволить підвищити ефективність роботи екскаватора і подолати негативний вплив явища ущільнення ґрунтів в процесі копанні.

Список літератури

1. **Веснін А.В.** Моделювання процесу пересування екскаватора з чотирьохопорним крокуючим рушієм / **А.В.Веснін, І.В.Крупко, В.В.Сегін** // Вісник Криворізького національного університету. - 2017. - Вип. 44. - С. 54-58.
2. **Веснін А.В.** Методика визначення показників складності маршруту руху, ефективності роботи та узгодженості параметрів системи "двигун-трансмсія" кар'єрних самоскидів / **А.В.Веснін, О.Д.Почужевський** // Вісник Криворізького національного університету. - 2012. - Вип. 32. - С. 136-139.
3. **Веснін А.В.** Обґрунтування передаточних чисел редуктора властивостей колеса кар'єрного самоскида у відповідності до складності трас руху / **А.В.Веснін, Ю.А.Монастирський** // Наукові нотатки. - 2014. - Вип. 45. - С. 72-78.
4. **Баладінський В.Л.** Теорія руйнування робочих середовищ: Підручник / **В.Л.Баладінський, Ю.М.Абрашкевич** // К.:КНУБА, 2000. - 91с.
5. **Степанов Е.А.** Привід перетворення безперервного обертального руху на крокове обертання / **Е.А. Степанов, В.Г.Крупко, Г.І.Бондаєвський, В.С.Шнюков** // А.С. № 1234308. - Бюл. Винах. № 20, 1986.
6. **Дорохов М.Ю.** Хвильовий ланцюговий редуктор / **М.Ю.Дорохов, В.Г.Крупко** // Патент України на корисну модель № 68714 МПК Е 02F 16 G 13/00 від 16 08.2004 р.
7. **Крупко В.Г.** Хвильові ланцюгові передачі у приводах землерийних машин / **В.Г.Крупко, Н.О.Кучер** // Вестник ХНАДУ: зб. наук. пр. - Вип.73 : Харків, 2016. - С. 184-189.
8. **Крупко В.Г.** Розробка привода сучасних підйомно-транспортних машин із хвильовим ланцюговим передаточним механізмом / **В.Г.Крупко, М.Ю.Дорохов** // Підйомно-транспортна техніка. №2(10). - Дніпропетровськ, 2004. - С. 41-45.
9. **Альошичев П.В.** Натискний механізм екскаватора / **П.В. Альошичев, М.Ю.Дорохов, В.Г.Крупко** // Патент України на корисну модель № 67932 МПК Е 02 F 3/08 від 15.07.2004 р.
10. **Суглобов В.В.** Застосування хвильових ланцюгових передач в приводах технологічних машин / **В.В.Суглобов, В.Г. Крупко** //Наука та виробництво : міжвуз. темат. зб. наук. пр. - Вип. 25: ДВНЗ «ПДТУ». - Дніпро, ПДТУ, 2023. - С. 44 - 49

Рукопис подано до редакції 21.03.24

УДК 669.71:621.791.92:621.431

М.О. ГНАТЕНКО, ст. викладач

Національний університет «Запорізька політехніка»

УСУНЕННЯ ЛИВАРНОГО БРАКУ ДЕТАЛЕЙ МЕТОДАМИ МІКРОПЛАЗМОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

Мета роботи. впровадити ефективний метод усунення ливарного браку та дефектів що дозволяє відновлювати пошкоджені сегменти виливків. Було встановлено що межа міцності і відносне подовження наплавленого матеріалу ЕП648 знаходиться на рівні основного литого сплаву ВХ4Л і складає 83-100 Н і $\delta=17-20\%$.

Методи дослідження проводилося за допомогою плазмового пальника та джерела живлення Starweld, робота Mitsubishi порошком ЕП648 на поверхню деталі зі сплаву ВХ4Л товщина наплавленого шару складала 8 мм, висота 1,2 мм, діаметр наплавлення 570 мм. Механічні властивості межі міцності і відносного подовження були визначені на розривній машині INSTRON. Дослідження мікроструктури проводилося за допомогою мікроскопів Stemi 200-c, Observer.D1m (Zeiss, Німеччина) при збільшеннях від $\times 100$ до $\times 1000$. При вивченні структурних складових в сплавах застосували комплексну методика якісної й кількісної оцінки складових.

Наукова новизна полягає у отриманні нікелевих сплавів зі створенням специфічних металургічних фаз та структур на рівні литих фасонних виливків. Ці фази, включаючи гамма-твердий розчин, метастабільні карбіди та нітриди, відіграють важливу роль у поліпшенні механічних властивостей матеріалу. Гамма-твердий розчин відомий своєю високою стійкістю до деформації та відновлювальною здатністю, що робить його ідеальним для застосування у виробництві, де потрібна висока міцність. Метастабільні карбіди і нітриди дозволяють до структури сплаву додаткову зносостійкість та стійкість до впливу зовнішніх факторів.

Практична значимість полягає у значному розширенні можливостей ремонту і усунення дефектів литва багатогабаритних виливків.

Отримані результати успішно впроваджено технологію усунення ливарного браку для багатогабаритних деталей з нікелевих сплавів шляхом застосування методів мікроплазмового наплавлення, за рахунок усунення дефектів шляхом механічної обробки та нанесення додаткового шару матеріалу замість пошкодженого. Використання нікелевих сплавів із застосуванням методу наплавлення дозволяє забезпечити високу якість та надійність продукції при усуненні ливарних дефектів чи проведенні ремонту виробів.

Ключові слова: адитивні технології, нікелеві сплави, ливарне виробництво, усунення ливарного браку.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями при виготовленні деталей методами литва, можуть виникати дефекти чи брак, що є закономірним явищем для будь-яких технічних процесів.

Дефекти лиття можуть виникати з різних причин, включаючи недосконалу конструкцію ливарної форми, виробничі помилки або фактори навколишнього середовища. Дефекти можуть виявлятися в різних формах, включаючи пористість, шорсткість поверхні, тріщини та короблення, що може вплинути на якість та функціональність кінцевого продукту[1-3].

На даному етапі існують такі методи виправлення ливарних дефектів як механічна обробка, зварювання, абразивна обробка.

Але дані методи можуть бути недоцільними особливо у випадках коли дефекти є критичними та розповсюджені на великій площі поверхні деталі[4-5].

Аналіз досліджень і публікацій. В останні роки сучасні технології ремонту та відновлення ливарних деталей методом плазмового наплавлення та адитивних технологій стали все більш популярними. Ці методи дозволяють швидко та ефективно відновити деталі, які раніше вважалися непридатними для використання.

Плазмова наплавка – це метод, при якому металевий порошок нагрівається до температури плавлення за допомогою плазмової дуги та наноситься на пошкоджену поверхню. Плазмова дуга розплавляє поверхню металу, далі в розплавлену ванну подається порошок що при затвердінні з'єднується з поверхнею деталі, створюючи новий шар металу на поверхні вилівку. Цей процес дозволяє відновлювати пошкоджені ділянки деталей з різних матеріалів, таких як сталь, алюміній, бронза та інші[5-7]. За допомогою методу мікроплазмового наплавлення можна виправляти дефекти, що виникають при ливарному виробництві, такі як недолив, чорноти, рихлоти на поверхні деталі, впливати на геометрію деталі змінюючи її розміри та форми.

Постановка задачі провести аналіз застосування методу мікроплазмового наплавлення при усуненні ливарних дефектів на прикладі кільцевої деталі з нікелевого сплаву ВХ4Л.

Викладення матеріалу та результати. В даному дослідженні процес наплавлення є керованим та автоматизованим за допомогою програмного та автоматизованого виробництва (САМ), та дозволяє забезпечити точний ремонт. Наплавлення відбувалося на роботизованому комплексі Starweld який складається з 1 – пальника та джерела живлення MagicWave; робота Mitsubishi, механізму подачі порошку, пульта управління; контролеру (рис. 1).

Експериментально склад карбідів і нітридів визначали на електронному мікроскопі Stemi с використанням системи енергодисперсійного рентгеноспектрального мікроаналізу.

Механічні властивості межі міцності і відносного подовження були визначені на розривній машині INSTRON.

У даній статі буде розглянуте застосування методу порошкового наплавлення для усунення ливарного браку на прикладі деталі з жароміцного нікелевого сплаву ЕП648 (ХН50ВМТЮБ-ВИ) кожух камери згорання. Принцип дії процесу полягав в тому, що на робочому пульті задавався напрямок руху робота і швидкість наплавлення. При запуску процесу наплавлення починає подаватися порошок механізмом подачі і захисний газ [7-10].

Місце на деталі, яке схильне до утворення ливарних дефектів при заливці та охолодженні позначено цифрою 1 на рис 2. Для усунення дефекту, пошкоджене місце відрізалось та шліфувалося і зачищалося для забезпечення рівної поверхні під наплавлення.

Деталь встановлювалась на маніпулятор роботизованого комплексу, базувалася, та жорстко закріплювалась за допомогою затискачів.

Для досягнення необхідної геометричної форми необхідно було нанести 16 шарів матеріалу, висота одного шару матеріалу складає 1,2 мм. Додаткові уступи на деталі, наведені вище забезпечувалися подальшою механічною обробкою.



Рис. 1. Схема роботизованого комплексу

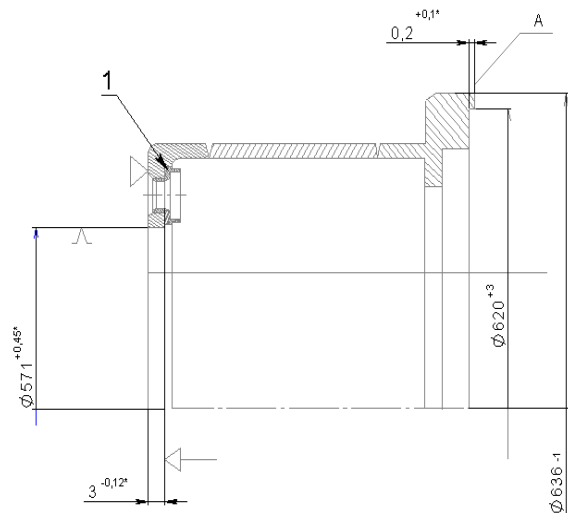


Рис. 2. Робоче креслення деталі

Процес відновлення деталей відбувався на наступних режимах наведених в табл. 1.

Таблиця 1

Параметри режимів наплавлення

Параметри	№ прохода				
	1	2-3	3	4	5-16
Ток наплавлення, А	70-75	65-70	58-62	55-60	50-55
Діаметр вольфрамового електрода, мм	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Діаметр плазмоутворюючого сопла, мм	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Час імпульса, мс	300/160	300/160	300/160	300/160	300/160
Струм імпульса, А	2	2	2	2	2
Швидкість наплавлення, мм/сек.	1.6	1.7	1.75	1.8	1.8
Витрата пілотнога газу (аргон), л/мин	0.8-1.0	0.8-1.0	0.8-1.0	0.8-1.0	0.8-1.0
Витрата захисного газу (аргон), л/мин	10-12	10-12	10-12	10-12	10-12
Витрата плазмоутворюючого газу (аргон) л/мин	1.0	0.9	0.8	0.8	0.8
Витрата транспортного газу (аргон), л/мин	3.2	3.2	3.2	3.2	3.2
Висота наплавленого шару, мм	1.2	1.2	1.7	1.6	1.5
Витрата порошка, г/мин	3.5-3.7	3.2-3.6	3.0-3.4	2.7-3.2	2.5-3.0
Фракція порошка, мкм	63-160	63-160	63-160	63-160	63-160

Параметри наведені вище є типовими для вирощування та відновлення деталей зі сплаву ЕП 648. В залежності від товщини отримуваної поверхні можуть змінюватися такі параметри як сила струму та швидкість наплавлення.

На рис. 3 представлена деталь корпусу камери згоряння виготовлена з нікелевого сплаву ЕП648, після процесу відновлення виливка.

На поверхні деталі можна побачити хвилеподібні взаємопов'язані шари, які характерні для наплавленого нікелевого сплаву. Така геометрія виникає через термічний вплив дугового наплавлення на метал. В процесі вирощування висока температура розплавленого металу сприяє нерівності поверхні металевому шару та утворенню хвилеподібних структур на поверхні виробу.

Загальна структура наплавленої поверхні нікелевого сплаву включає в себе металеві зерна, границі зерен, включення та дефекти. Оскільки якість наплавленої поверхні має великий вплив на ефективність та надійність деталі, необхідно приділяти особливу увагу контролю параметрів процесу наплавлення та якості наплавленого металу.



Рис. 3. Деталь після відновлення методом мікроплазмового наплавлення

Мікроструктура складається з γ -твердого розчину, метастабільних карбідів та нітридів. Розміри та розподіл фаз залежать від складу сплаву, швидкості наплавлення та температури охолодження (рис. 4).

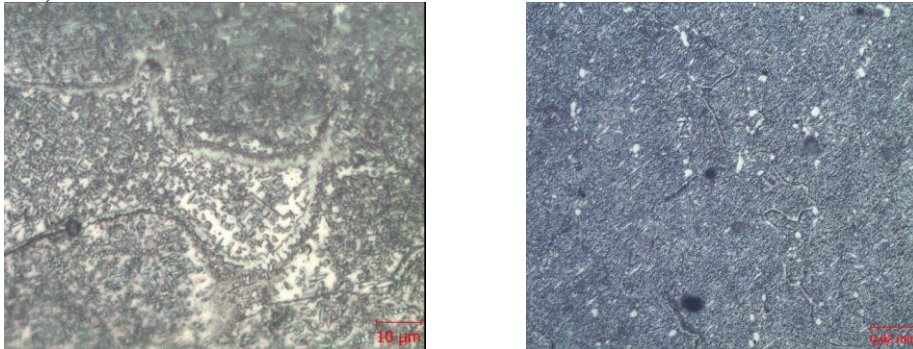


Рис. 4 Мікроструктура матеріала зразків зі сплаву ЕП648 (ВХ4Л)

Оскільки вміст нітридів та карбонітридів структури даного сплаву високий то мікроструктура має зернисту та колоноподібну форму, що обумовлено їх сильним впливом на зростання зерен та орієнтацію зерен при наплавленні. На мікрографах таких сплавів можна побачити дрібні частинки нітридів і карбонітридів, рівномірно розподілених у матриці γ -твердого розчину.

Для зняття напруги після наплавлення та підвищення механічних властивостей і мікроструктури, наплавлений нікелевий сплав піддавали термічній обробці, яка може включати в себе відпал, загартування і відпустку. Ці процеси дозволяють покращити твердість, зносостійкість та інші механічні властивості сплаву, а також змінити мікроструктуру та склад фаз.

Властивості отриманого з'єднання перевірялись на зразках плоского типу. На поверхню пластин з литого сплаву ВХ4Л наносилися шари матеріалу зі сплаву у вигляді порошку та дроту ЕП648.

З даних, наведених у табл. 2, видно, що механічні властивості зразків що досліджуються відповідають вимогам ОСТ 1 90126-85 для сплаву ВХ4Л-ВИ. І задовільняють технологічним характеристикам що пред'являються до виливків.

Висновки та напрям подальших досліджень. Було відновлено деталь кожух камери згорання методом порошкового наплавлення, діаметр наплавлення складав 600 мм, ширина поверхні наплавлення складала 8 мм. для висота відновленої поверхні складала 20 мм. Мікроструктура напавленої поверхні складалася з γ -твердого розчину, метастабільних карбідів та нітридів. Розміри та розподіл фаз процесу наплавлення перебували у прямій залежності від складу сплаву, швидкості наплавлення та температури охолодження.

Механічні властивості напавленого матеріалу знаходилися на рівні ОСТ 1 90126-85 (для сплаву ВХ4Л-ВИ).

Даний метод можна використовувати для різних сплавів, включаючи сталь, алюміній та титан, що робить його універсальним варіантом усунення ряду дефектів лиття. Цей метод також

Таблиця 2
Механічні властивості зразків зі сплаву типу ЕП648 (ВХ4Л)

Инд. номер образца	Механічні властивості при $t = 20^{\circ}\text{C}$	
	$\sigma_{\text{в}}, \frac{\text{кгс}}{\text{мм}^2}$	$\delta, \%$
усл.№1	83,6	17,1
усл.№2	96,5	20,0
усл.№3	82,6	17,7
усл.№4	100,6	25,7
Норми ОСТ 1 90126-85 (для сплаву ВХ4Л-ВИ)	$\geq 80,0$	$\geq 4,0$

можна використовувати для нарощування або додавання матеріалу до виливки, що може бути корисним для ремонту зношених або пошкоджених деталей.

Окрім того, метод мікроплазмового наплавлення дозволяє усувати дефекти лиття з високою точністю, забезпечуючи точніший і послідовніший результат, ніж традиційні методи. Метод наплавлення також універсальний і може використовуватися для усунення широкого спектра дефектів лиття, включаючи пористість, тріщини та шорсткість поверхні.

Список літератури

1. Гнатенко М.О., Чигілейчик С.Л., Сахно С.С. Виготовлення авіаційних деталей з жароміцних нікелевих сплавів методом адитивного плазмового наплавлення. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2021. №5(175). С. 48-51. DOI: 10.32620/akt.2021.5.06
2. Bintaо W., Zengxi P., Donghong D., Dominic C., Huijun L., Jing X., John N. A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of Manufacturing Processes*. Vol. 35, October 2018, P. 127-139
3. M. Gnatenko, P. Zhemaniuk, I. Petrik, S. Sakhno, S. Chigileichik, V. Naumyk, O. Ovchinnikov, M. Matkovska Detecting the influence of heats sources on material properties when production a aviation parts by a directenergy deposition method. *Eastern–european journal of enterprise technologies*. 2019. 1/12(97). P. 49 – 54.
4. Gnatenko, M., Naumyk, V., Matkovska. Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. *Materials Science and Technology*. 2019. P. 68 – 74
5. Leary M. Introduction to AM. In: *Design for Additive Manufacturing*. Elsevier; 2020. p. 1–6.
6. Prakash KS, Nancharaih T, Rao VVS. Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -An Overview. In: *Materials Today: Proceedings*. Elsevier Ltd; 2018. p. 3873–82
7. Aqib Muzaffar, S. K. Khadheer 3D and 4D printing of pH-responsive and functional polymers and their composites in 3D and 4D Printing of Polymer Nanocomposite Materials, 2020.
8. Li N, Huang S, Zhang G, Qin R, Liu W, Xiong H, et al. Progress in additive manufacturing on new materials: A review. Vol. 35, *Journal of Materials Science and Technology*. Chinese Society of Metals; 2019. p. 242–69.
9. Mohammadreza Nematollahi, ... Mohammad Elahinia, in *Metals for Biomedical Devices (Second Edition)*, 2019
10. Williams S. W., Martina F., Addison A. C., Ding J., Pardal G., Colegrove P. Wire + Arc Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32. P. 641–647.

Рукопис подано до редакції 25.03.24

УДК 622.1: 534

Б.І. РИБАЛКО, канд. техн. наук, доц., А.В. БАКАЙ, аспірант
Криворізький національний університет

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ТРАНСФОРМАЦІЇ МІКРОСЕЙСМІЧНОГО СИГНАЛУ

Мета статті є створення математичної моделі, яка описують процеси трансформації мікросейсмічних сигналів, розробка математичних рівнянь та алгоритмів, які відображають фізичні та геологічні процеси, які відбуваються в мікросейсмічних сигналах.

Методи дослідження. Збір та аналіз реальних мікросейсмічних сигналів для визначити їх характеристики та динаміку в різних геологічних умовах. Розроблення математичних моделей, які відображають фізичні процеси, що відбуваються у напружено-деформованому стані масиві, дозволяє вивчити вплив різних факторів на трансформацію мікросейсмічного сигналу.

Спектральний аналіз для вивчення частотних характеристик мікросейсмічного сигналу. Розробка математичних моделей, які відображають фізичні процеси, що відбуваються у глибинах Землі, дозволяє вивчити вплив різних факторів на трансформацію мікросейсмічного сигналу.

Наукова новизна. Встановлено нові залежності амплітуди, тривалості і частоти від відстані для мікросейсмічного сигналу.

Практична значимість. Динамічна модель трансформації мікросейсмічного сигналу важлива для покращення розуміння геологічних процесів та управління ризиками в активних сейсмічних регіонах. Зокрема, модель можна використовувати для моніторингу сейсмічної активності в реальному часі з визначенням відстані до геомеханічного явища, виявляти види сейсмічної активності за частотою (тріщини, заколів, мікроударів), виявлення динаміки незначних геологічних зрушень є важливим для оцінки потенціальних ризиків утворення руйнівних явищ. За допомогою динамічної моделі трансформації мікросейсмічного сигналу можна розробити більш точні моделі для прогнозування геологічних явищ, таких як технічних землетруси, обрушень. При використанні геоінформаційних систем моніторингу збільшить безпеку ведення гірничих робіт.

Такий підхід має велике значення для наукових досліджень та практичного використання в геологічній та цивільній сфері.

Результати. Доведено, залежність відстані від амплітуди мікросейсмічного сигналу, залежність відстані від тривалості мікросейсмічного сигналу, залежність частоти від відстані та створено динамічної моделі трансформації сейсмічного сигналу з відстанню.

Ключові слова: мікросейсмічний сигнал, динамічна модель, трансформація сейсмічних сигналів, аналіз мікросейсмічних даних, сейсмічна активність, моніторинг геомеханічних процесів, напружено-деформований стан масиву.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-130-137

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На території України зосереджені одні з найбільших запасів залізної руди у світі [1]. Переважні кількості залізних руд видобуваються підземним способом. Однією з важливих проблем видобування корисних копалин є стійкість гірничого масиву [2]. При збільшенні напружено-деформованого стану масиву виникають руйнування цього масиву, що утворює коливання в цьому масиві [3]. Руйнування гірничого масиву викидає в атмосферу велику кількість забруднюючих речовин, і для зменшення дрібнодисперсного пилу використовують спеціальні реагенти [4,5]. Передбачення та виявлення потенційних проблем у шахти може бути досягнуто за допомогою аналізу мікросейсмічних сигналів. По характеру коливань в масиві можна визначити види геомеханічних явищ, що важливо для впровадження геоінформаційної системи шахти для збільшення безпеки видобувних робіт [6]. Тому важливо дослідити, як змінюється мікросейсмічний сигнал у масиві залежно від відстані, потужності, глибини та інших факторів, що на нього впливають. Розуміння цих змін дозволить розробити динамічну модель трансформації мікросейсмічного сигналу, яка може відтворювати та прогнозувати поведінку цих сигналів в різних умовах. Такий підхід є ключовим для підвищення безпеки та ефективності в управлінні ризиками природних та техногенних катастроф, а також для підвищення нашого розуміння процесів, що відбуваються у напружено-деформованому масиві.

Аналіз досліджень і публікацій. Для характеристики сейсмічних сигналів використовуються різноманітні функції з як неперервним, так і дискретним аргументом [7,8,9]. Серед таких функцій можна відзначити періодичні сигнали, системи ортогональних функцій (наприклад, функції Радеміхера) та імпульсні сигнали. [10].

Для різних шахт характеристики геомеханічних явищ відрізняються, в залежності від властивостей самої породи. Сейсмічні хвилі є просторово розходжуваними від гіпоцентру і несуть інформацію щодо розташування явища. Амплітудні, частотні, часові характеристики отриманих сигналів містять інформацію про явище та властивості середовища на шляху поширення хвиль [3]. Відмінність у процесі руйнування формує відмінну комбінацію хвиль, яка використовується для визначення належності сейсмічного сигналу до землетрусу (утворення тріщин) чи вибуху [11,12,13]. Утворення різних геомеханічних явищ призведе до коливання в гірському масиві, з відстанню характеристики цих коливань будуть змінюватися, тому необхідно дослідити як характеристики коливання будуть залежати від відстані.

Постановка задачі. Метою представленої роботи є створення математичної моделі, яка описує процеси трансформації мікросейсмічних сигналів, розробка математичних рівнянь та алгоритмів, які відображають фізичні та геологічні процеси, які відбуваються в мікросейсмічних сигналах.

Виклад матеріалу та результати. Первинними параметрами геомеханічного явища є його енергія (магнітуда), координати та вид. Найбільш характерними видами геомеханічних явищ є розширення - вибух і зсув - від тріщиноутворення до землетрусу. У результаті досягнення локальних напружень в масиві гірських порід межі міцності, початкове утворення тріщин розвивається в такі прояви, як область заколоутворення, вистріл відкритої поверхні скельних порід, обвал у гірських виробках, утворення воронки на поверхні, гірничий удар, відокремлення блоків та руйнування стелі та інші.

При моніторингу сейсмічної активності найбільш доступними параметрами є амплітуда A , тривалість T , частота ω , час t приходу сигналу явища. При використанні трьохкоординатних зондів як інформаційні параметри використовуються фази першого вступу сигналу, модуль вектора та співвідношення амплітуд за напрямками. При визначенні положення геомеханічного явища важливим параметром є відстань (радіус) R до гіпоцентру явища.

Приклад геомеханічного явища представлений на рис. 1. Також інші дослідження показують подібні форми геомеханічного явища [14,15].

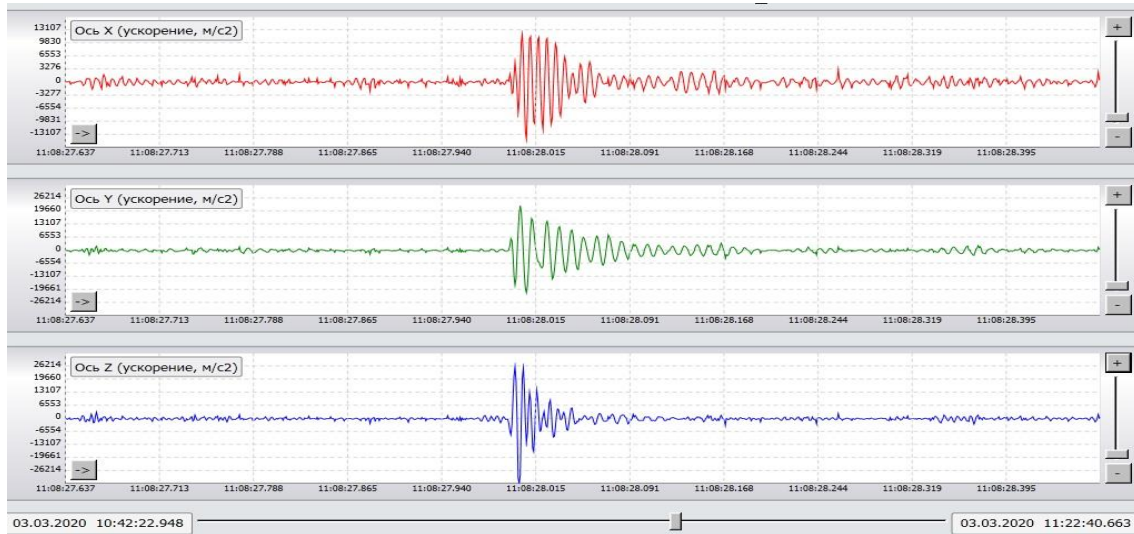


Рис. 1. Сигнал тріщини. $A_x = 13000$ од.ащ, $A_y = 22000$ од.ащ, $A_z = 26000$ од.ащ, $T = 250$ мс. Відстань близько 100 м

До основних показників мікросейсмічного сигналу відносяться: t_1 – час першого вступу первинних P і вторинних S хвиль (відносно епіцентру явища); T – тривалість мікросейсмічного сигналу; $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$ – тривалість коливання; A_{max} – максимальна амплітуда сигналу; ω_p – резонансна (основна) частота сигналу в точці вимірювання; E – умовна енергія сигналу (площа сигналу).

На рис. 2. наведено приклад трансформації мікросейсмічного сигналу з відстанню.

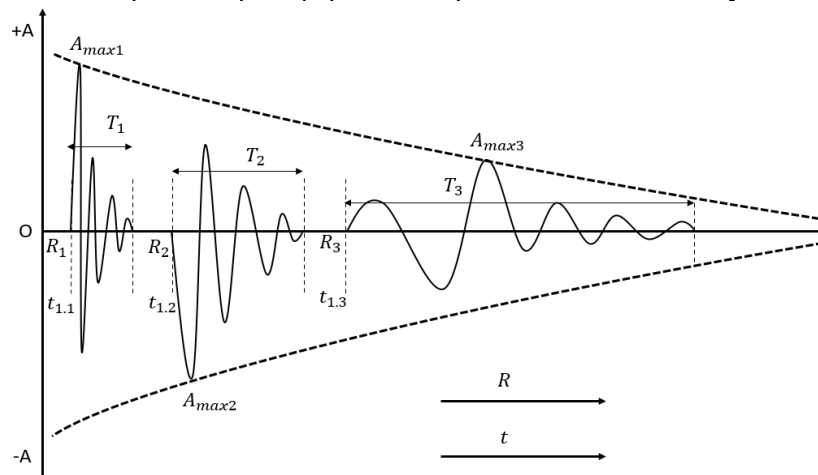


Рис. 2. Приклад трансформації мікросейсмічного сигналу з відстанню

Час першого вступу первинної P і вторинної S хвиль відносно часу явища в епіцентрі залежить від відстані R вимірювання і швидкостей первинної a_1 і вторинної a_2 хвиль $t_1 = \frac{R}{a_1}$; $t_2 = \frac{R}{a_2}$. Перша півхвиля має максимальну амплітуду A_{max} , яка може бути представлена в м/с, м/с² або в одиницях АЦП. Зі збільшенням відстані кількість коливань в сигналі збільшується і збільшується протяжність сигналу. Необхідно відмітити, що з відстанню протяжність сигналу збільшується також за рахунок збільшення різниці часу приходу первинної і вторинної хвиль і приходу відбитих, переломлених і поверхневих хвиль. Період одного коливання з відстанню збільшується, а частота коливань ω_p з відстанню зменшується $T_n = \frac{1}{\omega_p}$, що підтверджуються на рис. 3-6.



Рис. 3. Сигнал тріщини на відстані 25м. $A_y = 28214$ од.ащп, $T = 48$ мс

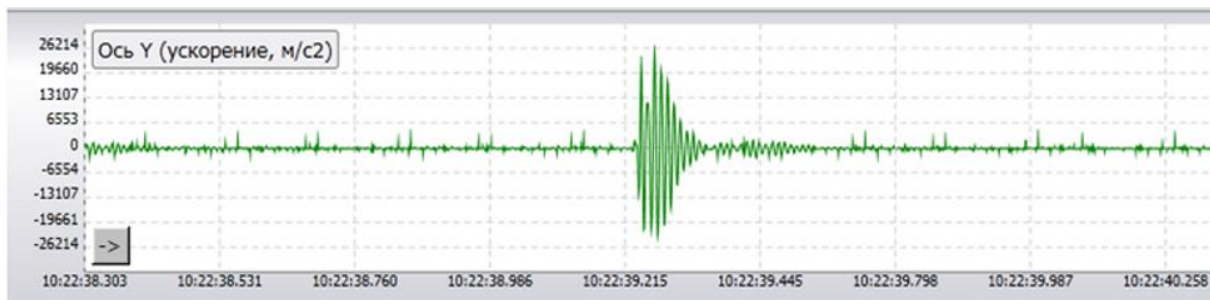


Рис. 4. Сигнал тріщини на відстані 40м. $A_y = 22214$ од.ащп, $T = 130$ мс



Рис. 5. Сигнал тріщини на відстані 60 м. $A_y = 26000$ од.ащп, $T = 150$ мс



Рис. 6. Сигнал тріщини на відстані 100 м. $A_y = 22000$ од.ащп, $T = 250$ мс

З відстанню максимальна амплітуда зменшується завдяки поглинання енергії хвиль. Інерційність масиву на шляху від джерела до точки вимірювання згладжує передній фронт сигналу (спочатку максимальну амплітуду має перша напівхвиля, за тим друга і третя і т.д.). Дані трансформації підтверджуються результатними експерименту [16]

«Резонансна» частота ω_p в точці вимірювання формується декількома факторами. По-перше, частотний спектр імпульсу в епіцентрі явища рівномірний з частотами від 0 до ∞ Гц. По-друге, з відстанню, за рахунок розподілених резонансних властивостей масиву (m – маса і γ – пружність) виникають затухаючі коливання. По-третє, вищі частоти поглинаються більше низькочастотних і з відстанню частота сигналу зменшується в залежності від добротності [16].

Енергія сигналу E (площа під огибаючою сигналу чи інтеграл модуля сигналу) $E = \int_0^t \sqrt{A^2(t)} \cdot dt$ використовується тільки для порівняння згасання сигналу і оцінки форми. Безрозмірна величина.

Для підтвердження таких трансформацій мікросейсмічного сигналу були виконані дослідження [16]. У табл. 1 представлені усереднені результати експериментальних досліджень амплітуди A та тривалості T сигналу при різних відстанях R до гіпоцентрів явищ при

стабілізації енергії явища $E_{я}$. Для імітації явищ виконувались вибухи однакової потужності (тротилі шашки 75г, 200г, 400г та заряди 1кгВР) на відомих відстанях. Також фіксувалися сигнали від технологічних вибухів потужністю до $5 \div 20$ тВР. Здійснювалися заходи з підтримання однакових умов завантаження та вибухання вибухової речовини (ВР). Реакції на вибухи різної потужності з затримкою вибухання перераховувалися на одиничні вибухи потужністю $200\text{кгВР} = 845000\text{Дж}$. Енергія вибухового перетворення 1кг тротилу = 1010 ккал = 4225,84 Дж, $400\text{гВВ} = 1690\text{ Дж}$, $200\text{гВВ} = 845\text{ Дж}$, $75\text{гВВ} = 316,938\text{ Дж}$

Таблиця 1

Результати експериментальних досліджень

відстань до явища, R , м.	Умова проведення дослідження			Вимірювальні параметри сигналу	
	час руху хвилі	заряд ВР, кг	енергія заряду $E_{з}$, Дж	амплітуда, A , м/с	тривалість, T , с
20	4мс	0,075	316	3,887	9,173
20	-//-	0,200	845	4,782	11,29
30	6мс	0,200	845	2,711	18,36
30	-//-	0,075	316	2,200	14,92
50	10мс	0,200	845	1,326	33,89
50	-//-	0,400	1690	1,474	37,68
70	14мс	0,400	1690	0,921	56,42
100	20мс	0,400	1690	0,558	86,57
200	40мс	0,400	1690	0,2116	198,8
400	80мс	0,400	1690	0,0802	456,9
400	-//-	1,000	4225	0,0900	512,1
600	0,12с	200,0	845000	0,0829	1353
1000	0,2с	200,0	845000	0,0405	2444
10000*	2,0с	200,0	845000	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$39,61 \cdot 10^3$

По результатах виконаних досліджень [16] було виведено залежності амплітуди від відстані (1) та тривалості явища від відстані (2), отримуємо зворотні залежності відстані від амплітуди (3) та відстані від тривалості явища (4) :

$$A = 47 \cdot \ln(E_{я} \cdot R^{-1.4}) \quad (1) \quad T = 0,046 \cdot \ln(E_{я} \cdot R^{1.2}) \quad (2)$$

$$e^{A/47} = E_{я} \cdot R^{-1.4}$$

$$e^{T/0,046} = E_{я} \cdot R^{1.2}$$

$$\frac{e^{A/47}}{E_{я}} = R^{-1.4}$$

$$\frac{e^{T/0,046}}{E_{я}} = R^{1.2}$$

$$R = \left(\frac{e^{A/47}}{E_{я}}\right)^{-1/1.4} \quad (3)$$

$$R = \left(\frac{e^{T/0,046}}{E_{я}}\right)^{1/1.2} \quad (4)$$

Отримані вирази дають можливість скласти динамічна модель трансформації сейсмічного сигналу з відстанню рис. 7, також рис. 11 показано залежність сигналу амплітуди, частоти і тривалості сигналу коливань від відстані. Умовні позначення параметрів сигналу на рис. 2 і на рис. 3 однакові.

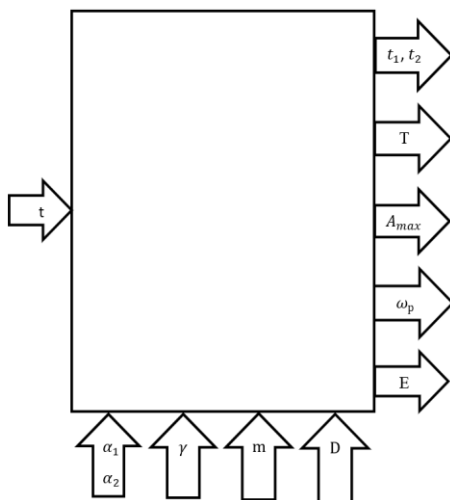


Рис. 7. Динамічна модель трансформації сейсмічного сигналу з відстанню

Збурюючою дією в масиві є руйнування тріщино утворенням модельоване і вигляді одиничного імпульсу $\beta(t)$. Руйнування має випадковий характер і відстань R від епіцентру явища до точки вимірювання невідома. На відміну від інших параметрів сейсмосигналу, цю відстань вимірювати немає можливості. Однією із задач моделей і є визначення відстані по інших параметрах сейсмосигналу (вирішення зворотної задачі). Геомеханічними параметрами масиву і відповідно налаштовувемими параметрами моделі є $a_1; a_2; \gamma; m; D$ – добротність масиву.

Статичні залежності моделей включають:

$$t_1 = \frac{R}{a_1}; t_2 = \frac{R}{a_2};$$

$$T = f_1(R) \equiv f_2(R, E_{я}, D) \equiv f_3((t_1 - t_2), E_{я}, D);$$

$$A_{max} = f(R, E_{я}, D);$$

$$\omega_p = f(m, \gamma),$$

$$E_c = \int A(t) \cdot dt$$

де $E_{я}$ – енергія явища; E_c – енергія сигналу.

Виникнення з часом коливань зумовлене розділеними резонансними властивостями масиву m, γ і поглинанням енергії коливань, і відповідно згасанням амплітуди.

Модель формування коливань в точках вимірювання може бути наглядно зображена в вигляді механічної системи рис. 8, де m – це маса масиву, яка коливається, γ – пружні властивості масиву, D – показник механічних втрат чи добротність. І при поширенні енергії в середовищі енергія переходить від одного умовного блоку масиву до іншого.

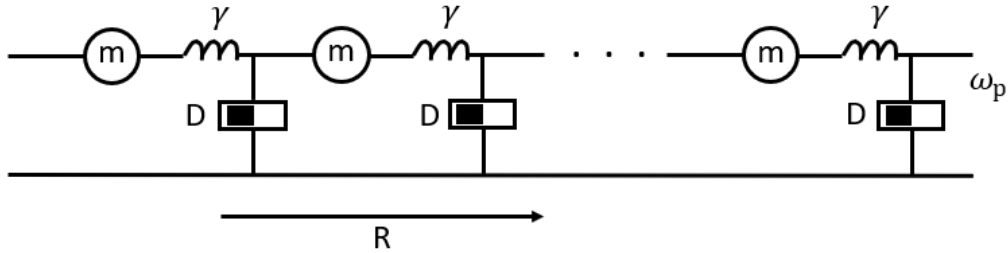


Рис. 8. Модель формування коливань в масиві

Частотно залежне розділене згасання сигналу в масиві може бути наглядно представлене на моделі, що зображена на рис. 9, де C – конденсатор (масив), який накопичує енергію або її випромінює.

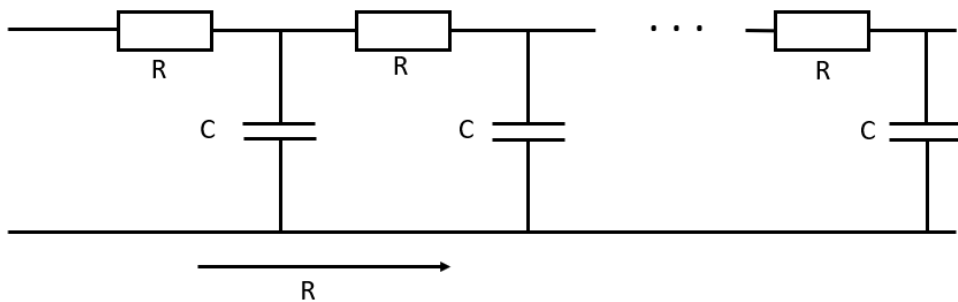


Рис. 9. Модель частотно залежного розділеного згасання сигналу в масиві

Модель залежності частоти і амплітуди мікросейсмічних коливань від відстані може бути зображена рис. 10. Через коливальний контур конденсатора і котушки утворюється певне значення частоти, а опір призводить до зменшення амплітуди коливань.

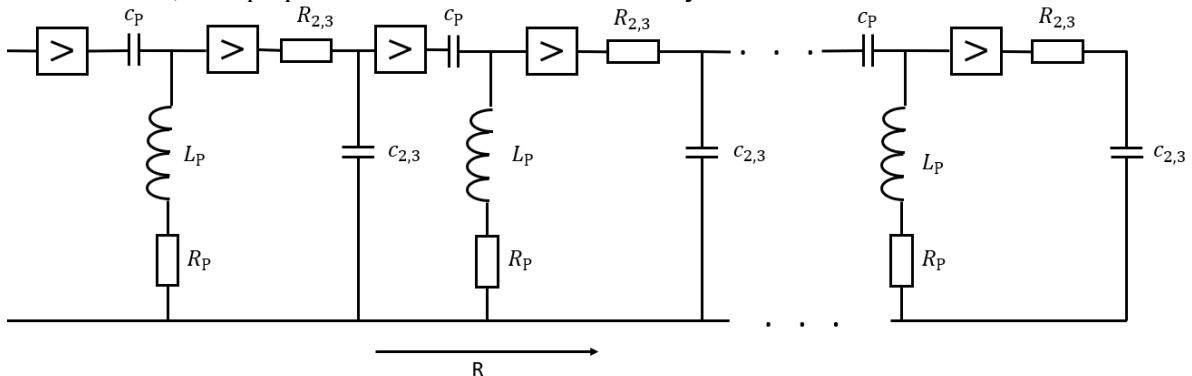


Рис.10. Модель залежності частоти і амплітуди мікросейсмічних коливань від відстані

(\square) повторювач $K=1$; $C_p; L_p; R_p$ – елементи коливального контуру; $R_{2,3}, C_{2,3}$ – елементи контурів частотного резонансного згасання.

Залежність вихідних показників сигналу від відстані мають вигляд рис. 11.

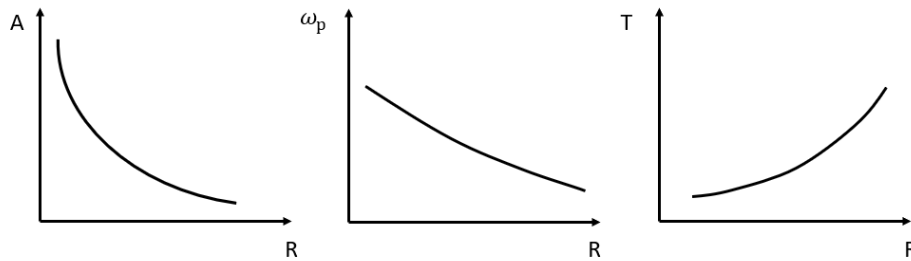


Рис. 11. Вигляд залежності сигналу залежності амплітуди, частоти і тривалості сигналу коливань від відстані

Висновки та напрямок подальших досліджень. На підставі виконаних досліджень залежності амплітуди і тривалості явищ від відстані було отримано:
 залежності відстані від амплітуди мікросейсмічного сигналу;
 залежності відстані від тривалості мікросейсмічного сигналу;
 створено динамічної моделі трансформації сейсмічного сигналу з відстанню;
 досліджено залежність частоти від відстані мікросейсмічного сигналу.

Отримані залежності дають можливість визначити відстань до геомеханічного явища.

Динамічна модель трансформації мікросейсмічного сигналу є важливим інструментом для розуміння процесів, які відбуваються у напружено-деформованому стані масиву. Призначення моделі важливо для формування паспортів явищ. Усі ці аспекти динамічної моделі трансформації мікросейсмічного сигналу допомагають в детальному вивченні геологічних процесів та розвитку більш точних методів передбачення та виявлення небезпек в геологічних системах. В цілому, ця модель відіграє важливу роль у розумінні геологічних явищ і має потенціал для подальшого розвитку та вдосконалення.

Список літератури

1. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>
2. Кузьменко, О.М., Петльованний, М.В. Стійкість штучного масиву при підземній розробці потужного рудного покладу на великій глибині. Збірник наукових праць Національного гірничого університету, (50), 56-62
3. Рыбалко Б.И. Факторы возникновения волн в массиве Научно-исследовательский горнорудный институт ГВУЗ «КНУ» УДК 622.834.52,53
4. Gerasimchuk O., Skachkov A., Shchokin V., Omelchenko O., Ezhov V. Properties of humatic reagent as a dust binding substance. Ukrainian journal of ecology. - 2022, 12(9), 30-37, doi:10.15421/2022_401.
5. Shchokin V. Methodology for Determining Emissions of Pollutants into Atmospheric Air by Open(1)Pit Mining Works. Inzynieria Mineralna, - 2023, (1), P.185-188
6. Рыбалко Б.И., Федоренко А.И., Чистяков Д.Е. Значимые геомеханические явления для систем непрерывного мониторинга состояния массивов горных пород ГИС. НИГРИ ГВУЗ «Криворожский национальный университет»
7. Гольдин С.В. Линейные преобразования сейсмических сигналов. М.:Недра, 1974. – 252 с.
8. Гурвич И. И., Боганик Г. Н. Сейсмическая разведка. Тверь, АИС, 2006. –744 с.
9. Марченко В.Б. Ортогональные функции дискретного аргумента и их приложение в геофизике. – К.: Наукова думка, 1992. – 212 с
10. Гурьянов В.В. Математическая модель плоских сейсмических ударных волн. Вестник Саратов. гос. техн. ун-та. 2007. №1. Вып. 2. С.7-14.
11. Рыбалко Б.И.,Здещиц В.М., Чистяков Д.Е., Федоренко А.И., Милейко Т.В., Калиниченко О.А. Экспертная идентификация геомеханических явлений по сигналам записей ГИС. УДК 622. 834. 52,53
12. Рыбалко Б.И., Пересулько С.В. Определение координат значимых событий результатов непрерывного мониторинга в процессе опытной эксплуатации ГИС. УДК 622. 834. 52,53
13. Рыбалко Б.И., Федоренко А.И., Чистяков Д.Е., Милейко Т.В. Особенности сейсмограмм для различных событий. УДК622. 012:504(477)
14. Bakai A.V. Implementation of microseismic monitoring for iron ore mines. 2022 IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 1049 012007
15. Бакай А.В. Частотне виділення інформативних мікросейсмічних сигналів. Матеріали науково-практичної конференції «інноваційний розвиток сучасної науки: нові підходи та актуальні дослідження» (26-27 березня 2021 р.) м. Запоріжжя
16. Рыбалко Б.И., Бакай А. В., Ляш С.И., Романенко А. О., Ткачук В. В. Патент 151906. Спосіб визначення відстані до геомеханічного явища.

Рукопис подано до редакції 25.03.24

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук, проф., А.В. ПЕТЕЛЬКА, магістрант,
Л.В. СКЛЯР, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ФІЛЬТРУВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНОГО МАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТУ ПРАТ «ЦГЗК» ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФАБРИКИ ОГРУДКУВАННЯ СИРОВИНОЮ ДЛЯ DRI ОБКОТИШІВ

Метою роботи є визначення можливості виробництва концентрату з якістю та вологою придатною до виробництва залізорудних обкотишів що є сировиною для технології прямого відновлення заліза (DRI) на вітчизняних підприємствах, зокрема, забезпечення масової частки вологи концентрату у керованому діапазоні від 8,2 до 9,5%, що дозволяє стабільно виробляти обкотиші з високими показниками якості.

Методами дослідження є експериментальні методи, що включають порівняння різних режимів роботи тканинних дискових вакуум-фільтрів ДУ-100-2,5 та керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90 що зневоднюють тонкоподрібнений залізорудний концентрат виробництва ПРАТ «ЦГЗК».

Наукова новизна визначається у новому підході до зневоднення залізорудного концентрату ПРАТ «ЦГЗК» для подальшого застосування, як сировини, для виробництва залізорудних обкотишів. Підхід включає використання керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90 для забезпечення стабільного випуску концентрату з масовою часткою вологи в керованому діапазоні.

Практична значимість дослідження полягає в тому що його результати можуть бути використані вітчизняними підприємствами для аналізу можливості та ефективності заміни наявного фронту тканинної фільтрації залізорудного концентрату на керамічні дискові вакуум-фільтри, параметри роботи яких дозволяють забезпечити залишкову вологу залізорудного концентрату, що придатна до застосування у огрудкуванні та обпалюванні DR обкотишів. Заміна обладнання та досягнення стабільних параметрів якості залізорудного концентрату дозволяє вступити на нові, високоприбуткові ринки збуту концентратів та обкотишів.

Результатами дослідження є висновок що застосування керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90 дозволяє забезпечити високу ефективність фільтрації, стабільність процесу, довговічність та екологічну чистоту. Зокрема, встановлено, що фільтри марки КДФ-90 забезпечують показники продуктивності та вологи концентрату на необхідному для виробництва обкотишів на рівні 0,6...0,8 т/м² та 8,2...9,5% відповідно. Застосування цих фільтрів дозволяє забезпечити стабільність та керованість процесу, зменшити витрати енергії та ресурсів.

Ключові слова: пряме відновлення заліза, DRI, залізорудні обкотиші, вакуум-фільтрація, ДУ-100-2,5, керамічні вакуум-фільтри, КДФ-90.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-137-144

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними завданнями. Зростання ефективності виробництва сталі та вимог до її якості призводить до пошуку нових високоефективних технологій її виробництва. Одним з таких рішень є технологія прямого відновлення заліза (DRI), що призводить до збільшення попиту на сировину що придатна для цієї технології. Вітчизняні підприємства, зацікавлені в участі у нових високоприбуткових ринках збуту залізорудних концентратів та обкотишів, але стикаються з проблемою виробництва сировини для DRI процесу.

Виробництво концентратів високої якості вимагає зменшення розмірів середньої зернини концентрату для розкриття зростків, що призводить до збільшення питомої поверхні концентратів, що надходять на фільтрацію. Для виробництва залізорудних обкотишів, придатних для DRI технології, важливо не тільки забезпечити якість концентрату, але й утримувати масову частку вологи концентрату у керованому діапазоні від 8,2 до 9,5%, що дозволяє стабільно виробляти обкотиші високої якості за формою, розміром, міцністю та зношуваністю [1-2].

При роботі дискових вакуум-фільтрів ДУ-100-2,5 на концентратах з масовою часткою заліза 70,0...70,5% та крупності 98-99% кл. 0,056 мм гірничо-збагачувальний комбінат зіткнувся з проблемою зниження ефективності фільтрації. Існуюче фільтруюче обладнання не дозволяло стабільно отримувати необхідну залишкову вологу концентрату. Це призвело до неможливості налагодити процес випуску сировини придатної до випуску DR обкотишів, а також до значних витрат енергії та ресурсів, особливо при обробці тонких концентратів у крупності 98-99% кл. 0,056 мм.

Для вирішення цих проблем в умовах ПРАТ «ЦГЗК» були проведені дослідження з удосконалення технології фільтрації залізорудного концентрату з впровадженням керамічних ва-

куум-фільтрів КДФ-90. Перевагами вакуум-фільтрації з керамічними фільтрами є висока ефективність фільтрації, стабільність процесу, довговічність та екологічна чистота.

Постановка завдання. Основне завдання полягає в розробці технології зневоднення концентратів високої тонини помолу та високої якості. Підвищення якості концентрату відбувається за допомогою операції тонкого грохочення. Рядовий концентрат подається на вібруючу деку грохоту з розміром отворів сита 0,074...0,1 мм, де під дією сил гравітації розділяється на підрешітний та надрешітний продукти. Надрешітний продукт повертається на дозбагачення у окрему схему, а підрешітний являється концентратом що потребує зневоднення. У цьому процесі неминуче зростає питома поверхня концентрату, що надходить на фільтрацію. Для виробництва залізорудних обкотишів, придатних для DRI технології, важливо не тільки забезпечити якість концентрату, але й утримувати масову частку вологи концентрату у керованому діапазоні від 8,2 до 9,5%, в залежності від потреб фабрики огрудкування, що дозволяє стабільно виробляти обкотиші високої якості за формою, розміром, міцністю та зношуваністю.

Тому, основне завдання дослідження полягає в удосконаленні технології фільтрації залізородного концентрату з впровадженням керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90. Перевагами вакуум-фільтрації з керамічними фільтрами є висока ефективність фільтрації, стабільність процесу, довговічність та екологічна чистота.

В ході виконання досліджень необхідно встановити чи дозволяють керамічні фільтри забезпечити показник вологи концентрату на необхідному для виробництва обкотишів рівні 8,2...9,5%.

Необхідно визначити фактори, що впливають на ефективність роботи керамічних вакуум-фільтрів, зокрема густину пульпи, рівень пульпи у ванні фільтрів, рівень вакууму у зонах набору та сушки, а також ефективність регенерації.

Аналіз досліджень і публікацій. У всіх варіантах виконання апаратів для зневоднення залізородного концентрату використовується значна кількість електроенергії для відокремлення вільної вологи від частинок магнетитового концентрату. Залежно від типу обладнання, що застосовується, залежить наскільки ефективно та з якими витратами енергії можливо зневоднити залізородний концентрат. Виділяють декілька типів фільтруючого обладнання [3-4]:

вакуумні фільтри – процес фільтрації матеріалу у яких проходить за допомогою створення вакууму з одної сторони фільтруючої поверхні та пульпи концентрату з іншої, застосовуються як тканинні, так і керамічні фільтруючі поверхні. Суспензія подається на фільтруючу поверхню, де під дією вакууму рідина проходить через фільтр, а тверді частинки осідають на його поверхні, утворюючи фільтруючий осад. Є одними з найбільш поширених та ефективних методів для зневоднення залізородних концентратів. Серед переваг можна виділити високу швидкість та ефективність зневоднення, можливість обробки великих об'ємів матеріалу, низьке енергоспоживання порівняно з іншими методами зневоднення, високу якість кінцевого продукту з мінімальним залишковим вмістом вологи. Також є і недоліки вакуумних фільтрів, а саме необхідність регулярного обслуговування та заміни фільтрувальних матеріалів, висока вартість початкового встановлення та технічного обслуговування, чутливість до змін у складі суспензії та концентрації твердих частинок;

прес-фільтри – принцип дії яких фільтрації рідини через фільтруючу поверхню за допомогою підвищеного тиску. Суспензія подається в закриті камери між фільтруючими пластинами. Тиск примушує рідину проходити через фільтруючий матеріал, залишаючи тверді частинки у вигляді осаду. Після фільтрації осад видаляється при розкритті камер. Є важливим обладнанням для фільтрації та зневоднення в багатьох галузях промисловості, включаючи обробку залізородних концентратів. До переваг прес-фільтрів відносять високу ефективність фільтрації, надійність і довговічність, гнучкість налаштування під різні типи суспензій, економічність. Недоліками є складність обслуговування, високу початкову вартість, довгий час циклу та циклічність;

центрифуги – основною силою що відділяє рідину від твердих часток є відцентрове прискорення. Даний тип обладнання поєднує відцентрову силу та фільтрацію через пористі матеріали. Рідина проходить через фільтрувальний матеріал під дією відцентрової сили, залишаючи тверді частинки на його поверхні. Перевагами центрифуг є висока швидкість розділення, висока ефективність зневоднення, гнучкість налаштування, автоматизація процесу. Серед недоліків

виділяють високу вартість придбання та експлуатації, складність обслуговування, високий рівень енергоспоживання для забезпечення необхідної швидкості обертання [5];

термічні сушарки – працюють за принципом подачі гарячого повітря до матеріалу що потребує зневоднення з одночасним перемішуванням за допомогою киплячого шару або обертання у барабані. Є незамінним варіантом коли потрібно досягти низької вологи матеріалу. До переваг відносять простоту конструкції та експлуатації, можливість сушіння великих об'ємів матеріалу, універсальність застосування для широкого типу матеріалів. Недоліками є втрати тепла, значні витрати енергоресурсів та потреба у суттєвому об'ємі робочого простору [5].

Швидкість видалення вологи визначається цілою низкою факторів: градієнтом тиску, параметрами взаємодії фаз, опором осаду, капілярними явищами, мікроструктурою порового простору, яка залежить від форми та розміру частинок, пористості та питомої поверхні та ін.

Визначення характеристик осаду, що мають значення при фільтруванні, вивчалися характеристики топології пір на шліфах, здійснювалося моделювання процесу видалення вологи з опадів із використанням класичних підходів [6-7].

Ці дослідження базуються на основах гідродинаміки та фізики процесу. Проте, розроблено нові рішення теоретичних та практичних питань із застосуванням спеціальних прийомів для інтенсифікації процесу фільтрації із застосуванням хімічних засобів для раціонального формування осаду. Такі аналітичні дослідження дають можливість встановити складний характер переміщення межі розділу фаз повітря - вода в осаді.

Раніше для зневоднення продукту залізної руди використовувалася звичайна вакуумна фільтрація, але зміна вимог до якості продукту, зниження якості руди, ускладнення мінералогії та збільшення енергетичних витрат зумовили пошук альтернативних, більш ефективних рішень для зневоднення. Одним з результатів пошуків стала керамічна фільтрація.

Керамічна фільтрація – це оптимальна технологія для зневоднення суспензій з високим та стабільним вмістом твердих речовин і частинками розміром від 30 мкм до 150 мкм. Ця технологія широко застосовується для концентратів основних металів та продуктів ферохрому, але її використання для зневоднення концентратів залізних руд відносно недавнє.

Керамічні фільтруючі диски - це вакуумні дискові фільтри, які складаються з випалених алюмінієвих секторних пластин з однорідними мікропорами. Мікропори створюють вакуум за допомогою капілярної дії, і, як тільки вони змочені, фільтруюче середовище пропускає тільки рідину під час процесу фільтрації. На поверхні диска формується ке́к, який видаляється за допомогою скребка. Значні енергозбереження пов'язані з відсутністю повітря, що проникає через керамічні диски. Інші зазначені переваги включають безперервну роботу, низькі експлуатаційні витрати, високу швидкість фільтрації, низьку залишкову вологу ке́ку та високу експлуатаційні характеристики. Матеріал з якого виготовлено фільтруючу поверхню стійкий до більшості хімікатів а також високих температур суспензії.

Автори [8] розглядають використання керамічної фільтрації для остаточного етапу зневоднення концентрату продукту на бразильському залізорудному підприємстві. Дослідження було спрямоване на покращення розуміння придатності технології керамічної фільтрації для повномасштабної експлуатації, виявлення факторів, які позитивно і негативно впливають на ефективність фільтра, та оцінку компенсуючих заходів, які можуть бути розглянуті для оптимізації продуктивності керамічних фільтраційних поверхонь. Додавання флокулянта при рН суспензії 7,0 дало найкращий результат з вмістом вологи продукту між 8% та 9%. Використання азотної та хлористої кислот для регенерації пластини покращило їх проникнення, тоді як використання вуглекислого газу та щавлевої кислоти погіршило проникнення. Результати показали, що потрібна продуктивність фільтрації 2240 кг/м²/год та вміст вологи у зневодненому концентраті 8% можуть бути досягнуті, за умови оптимізації умов підготовки та подачі суспензії, а також експлуатації та підтримання регулярності обслуговування.

На основі цього дослідження, керамічна фільтрація визнана придатною технологією для зневоднення залізорудного концентрату.

Розглядаючи процес фільтрації з точки зору витрат енергії автори статті [9] роблять висновок, що використання капілярних сил, притаманних керамічним вакуум-фільтрам, можуть зменшити витрати енергії та отримати повністю регеноване фільтрувальне середовище. Метою дослідження було отримання нової інформації про забруднення фільтрувального середовища в процесі обробки залізної руди, щоб у майбутньому покращити та розвинути процес регенерації.

За допомогою рентгенівської дифракції та скануючої електронної мікроскопії для визначення хімічного складу та морфології різних хімічних компонентів фільтрувального середовища, використаного для зневоднення магнетиту. Виявлено два типи блокування середовища, які відіграють важливу роль в кислому процесі зневоднення залізної руди: забруднення частинками шламу кристалізація оксалату кальцію. Відкладення були розчинені за допомогою хлоридної, азотної та сульфатної кислот та гідроксиду калію. Найкращі результати, тобто найвища кількість розчиненого кальцію та збільшення проникності фільтрувального середовища, були досягнуті за допомогою 2 моль/л азотної кислоти.

Автори [10] досліджують відкладання тривимірних частинок на чотирьох основних тканинних структурах. Відкладання частинок було вивчено чисельно, шляхом аналізу сил, що діють на частинки. Цей підхід був застосований для оцінки зміни прозорості фільтрату на початковому етапі фільтрації. Було кількісно проаналізовано вплив тканих структур, густин та співвідношення розміру частинок/пор на перехідну поведінку фільтрації. Симульовані результати показують, що період фільтрації на початковому етапі може бути поділений на три режими: стандартне блокування пор, проміжне блокування та формування кеку. Критична концентрація, запропонована попередніми дослідниками, також кількісно підтверджена в цьому дослідженні.

Науковці [11] досліджують вплив ультразвуку на очищення мембран в системі ультрафільтрації з гамма-алюмінієвими мембранами в присутності колоїдних частинок силікату. Оптимальне очищення відбувається, коли мембрана знаходиться поза, але близько до області кавітації. Збільшення тиску фільтрації збільшує стискаючі сили, що спричиняють колапс кавітації, і призводить до зменшення кількості бульбашок кавітації, які поглинають і розсіюють звукові хвилі, та збільшують проникнення звукових хвиль. Імпульсний ультразвук з короткими інтервалами імпульсів призводить до покращення потоку. Ці висновки можуть бути корисними для розробки ефективних методів очищення мембран.

Автори [12] досліджували вплив різних параметрів на ефективність керамічної капілярної фільтрації, яка є новою технологією і являється привабливим варіантом зневоднення суспензій в галузі переробки мінералів. Керамічна капілярна фільтрація виявила великий потенціал для застосування у зневодненні суспензій залізної руди. Вплив різних параметрів на ефективність процесу все ще обмежений. Досліджено вплив вмісту твердих частинок, рН, температури суспензії, дозування коагулянту та поверхнево-активних речовин на ефективність керамічної фільтрації суспензій залізної руди. Вміст твердих частинок - це параметр, який найбільше впливає на керамічну фільтрацію, а додавання коагулянту збільшує ефективність системи фільтрації при нижчому вмісті твердих частинок. Додавання жодного з вивчених поверхнево-активних речовин не рекомендується для керамічної фільтрації залізородного концентрату через значне зниження продуктивності пластин.

У роботі [13] наведено досвід застосування керамічних вакуум-фільтрів для етапу зневоднення концентрату продукту на залізородному підприємстві Anglo American Minas-Rio в Бразилії. Оцінка попередніх програм тестування, проведених на підприємстві, показала, що властивості суспензії, які сприяли досягненню найвищої продуктивності фільтрації та найнижчим показникам залишкової вологи кеку, включали високу концентрацію твердих речовин у живленні, нейтральний рН та додавання коагулянту. Умови експлуатації, які сприяли найвищому виходу продукту, хоча з високим вмістом залишкової вологи у кеку, включали використання максимального рівня вакууму, максимальної швидкості обертання диска та найбільшого рівня суспензії у ванні фільтру. Найнижчий вміст залишкової вологи кеку досягався при мінімальному вакуумі та рівнях живлення у ванні фільтру та при найвищій швидкості обертання. Єдиним фактором, який показав зниження залишкової вологи, збільшуючи при цьому продуктивність, був фактор збільшення швидкості обертання фільтруючого диска. Ультразвукове очищення, промивання та використання фільтруючих пластин хорошої якості також призвели до покращення ефективності фільтрації. Контрольоване додавання флокулянта сприяло хорошему виходу продукту. Ефективність фільтрації також підвищувалась при виділенні достатнього часу для проведення профілактичного та коригувального обслуговування, коротших інтервалів часу між кислотним промиванням, регенерацією та заміною пластин.

Випробування, проведені для цієї програми, підтвердили, що найвища продуктивність фільтрації досягалася при нейтральному рН, хоча великий рівень продуктивності фільтрації також міг бути досягнутий у тих випадках, коли вапно використовувалося для коригування су-

спензії до більш лужних значень рН. Максимальна продуктивність фільтру, з необхідним вмістом залишкової вологи кеку 8%, досягалася при нейтральній рН суспензії, використовуючи азотну кислоту для коригування рН, разом з додаванням невеликих кількостей флокулянта. Додавання флокулянта при більш лужних значеннях рН не мало такого успіху через зниження продуктивності вакуум-фільтру. Зниження температур до 30 °С призвело до зниження вакуумного тиску та зменшення проникнення пластини. Вищі температури суспензії 36 °С дозволила підвищити продуктивність фільтрації, що пов'язано зі зниженням в'язкості суспензії. Оксалатна кислота мала негативний вплив на рівень проникнення поверхні пластини при її регенерації, тоді як проникність покращувалася при використанні азотної або хлористої кислоти для регенерації.

Викладення матеріалу та результати. Вивчення статей та робіт, що наведено вище, допомогло розробити методику проведення експериментів з підбору оптимальних параметрів зневоднення суспензії залізородного концентрату. На фільтрацію направляється підрешітний продукт операції тонкого грохочення на ситах з розміром отворів -0,074 мм, цей продукт має вміст готового класу 98...99% кл. -0,056мкм.

Для визначення оптимального режиму роботи вакуум-фільтру були обрані пріоритетні показники мінімального рівня залишкової вологи кеку при максимальній виробничій потужності. В ході експерименту досліджувався вплив вихідних показників суспензії на роботу вакуум-фільтра: густина живлення та масова частка класу -0,056 мкм. Виходячи з цих показників корегувались значення параметрів роботи вакуум-фільтру: частота обертання дисків, рівень пульпи у ванні, частота обертання перемішувача, вакуум зони набору та вакуум зони сушки. Окремо вираховувалась оптимальна частота проведення регенерації за допомогою ультразвукових датчиків, та глибокої регенерації з додаванням розчину сірчаної кислоти.

Показники роботи керамічного вакуум-фільтру КДФ-90 наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Показники роботи керамічного вакуум-фільтру КДФ-90

Масова частка заліза загального у живленні, %	Фактична масова частка залишкової вологи у концентрату, %	Масова частка кл. -0,056 мм у живленні, %	Величина вакууму у зоні, бар		Швидкість обертання дисків, об/хв	Питома продуктивність, т/м ²	Розрахункова масова частка залишкової вологи, %	Δ
			набору	сушки				
70,00	8,0	98,3	0,77	0,77	0,30	0,428	8,22	0,221
69,80	8,5	95,2	0,79	0,79	0,30	0,438	8,08	0,419
70,80	9,7	98,0	0,85	0,88	0,85	0,936	9,58	0,115
70,31	8,0	98,0	0,85	0,88	0,50	0,704	8,93	0,925
70,38	9,6	97,8	0,85	0,89	0,75	0,805	9,24	0,361
70,08	10,4	98,4	0,68	0,71	0,70	1,076	9,80	0,598
70,48	9,4	99,0	0,58	0,89	0,90	0,487	8,50	0,896
70,59	8,3	97,6	0,62	0,86	0,80	0,534	8,52	0,221
70,99	8,9	98,4	0,61	0,88	0,60	0,724	8,90	0,001
71,38	8,7	98,0	0,57	0,88	0,60	0,664	8,72	0,024
70,78	9,7	98,7	0,90	0,57	0,90	1,026	9,93	0,232
70,69	9,0	99,4	0,88	0,60	0,90	0,840	9,54	0,536
70,78	9,2	99,2	0,91	0,74	0,90	0,690	9,18	0,022
70,59	9,9	98,6	0,89	0,41	0,75	1,000	9,83	0,065
70,68	9,6	99,1	0,86	0,71	0,80	0,894	9,57	0,031
70,98	9,5	99,6	0,86	0,83	0,50	0,912	9,49	0,007
70,17	9,2	99,0	0,86	0,89	0,90	1,150	10,14	0,942
Середнє відхилення розрахункової вологи кеку від фактичної								0,330

За результатами вимірювання величин параметрів роботи керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90, за допомогою інструментів Microsoft Excel, було виконано лінійний аналіз впливу кожного з параметрів на показник залишкової масової частки вологи концентрату: масова частка класу -0,056 мм, величина вакууму у зоні набору кеку, величина вакууму у зоні сушки кеку, швидкість обертання дисків вакуум-фільтру, рівень живлення у ванні фільтра, питома продуктивність апарату. Перелік вимірюваних параметрів, що впливають на масову частку залишкової вологи у концентраті наведені у табл. 2.

Вплив параметрів роботи керамічного вакуум фільтру на масову частку залишкової вологи у концентраті

Параметри роботи керамічного вакуум фільтру КДФ-90	Коефіцієнт впливу
Масова частка класу -0,056 мм у живленні фільтру	5,4049
Величина вакууму у зоні набору кеку	0,5424
Величина вакууму у зоні сушки кеку	-0,1950
Швидкість обертання дисків фільтру	0,3979
Питома продуктивність фільтру	2,2419

Завдяки знайденим коефіцієнтам було виведено загальну формулу, що прогнозує залишкову вологу концентрату за вищеперахованими вихідними показниками.

$$W_p = 5,4049 \times \beta_{-0,056} + 0,5424 \times P_{\text{наб.}} - 0,1950 \times P_{\text{суш.}} + 0,3979 \times n + 2,2419 \times q + 1,5618 \quad (1)$$

де $\beta_{-0,056}$ – масова частка класу - 0,056 у живленні фільтру, %; $P_{\text{наб.}}$ – величина вакууму у зоні набору кеку, бар; $P_{\text{суш.}}$ – величина вакууму у зоні сушки кеку, бар; n – швидкість обертання дисків вакуум-фільтру, хв^{-1} ; q – питома продуктивність вакуум фільтру, $\text{т/м}^2\text{год}$.

На наступному етапі досліджень було проведено перевірку адекватності розробленої моделі фільтрування концентрату. Порівняння фактичної та розрахункової масової частки залишкової вологи у концентраті наведено на рис. 1.



Рис. 1. Результати перевірки адекватності математичної моделі, яка характеризує зміння залишкової вологи у концентраті від параметрів роботи керамічного фільтру

Величина середнього відхилення розрахункової масової долі залишкової вологи у концентраті відносно фактичної склала 0,33%.

Аналіз результатів досліджень та перевірки адекватності математичної моделі дозволив встановити такі залежності зміння масової частки залишкової вологи у концентраті від параметрів роботи керамічного фільтру.

Величина масової частки залишкової вологи у концентраті змінюється прямопропорційно відповідно зі збільшенням або зменшенням масової частки класу мінус -0,056 мм у живленні фільтру, питомої продуктивності вакуум-фільтру, величини вакууму у зоні набору кеку та швидкості обертання дисків вакуум-фільтру,

Обернено пропорційна залежність масової частки вологи у концентраті від величини вакууму у зоні сушки кеку.

В ході виконання досліджень встановлено, що фільтри марки КДФ-90 забезпечують показники продуктивності та масову частку вологи у концентраті на необхідному для виробництва обкотитишів рівні - 0,6...0,8 т/м^2 та 8,2...9,5% відповідно.

На ефективність роботи керамічних вакуум-фільтрів впливають:

густина пульпи у ванні фільтрів – оптимальний діапазон 1950...2100 г/л;

рівень пульпи у ванні фільтрів – ванна повинна бути повністю заповнена з незначним переливом;

рівень вакууму у зонах набору та сушки кеку – максимальна продуктивність - досягається при вакууму у зоні набору кеку-0,85...0,93 бар, при цьому регулювання вологи відбувається за допомогою зміння величини вакууму у зоні сушки кеку в діапазоні -0,5...0,93 бар;

ефективність регенерації – відбувається за допомогою ультразвукових випромінювачів та азотної кислоти концентрацією 1%, що подається у фільтруючі елементи.

Згідно з результатами проведених досліджень встановлена можливість отримання концентратів з масовою часткою вологи у керованому діапазоні від 8,2 до 9,5% з продуктивністю 0,6...0,8 т/м² фільтруючої поверхні.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Удосконалена технологія фільтрації з використанням керамічних вакуум-фільтрів є перспективною у порівнянні з традиційними тканинними фільтрами, яка забезпечує стабільний випуск концентрату за масовою часткою вологи та приводить до зменшення витрат енергоресурсів.

Встановлено, що фільтри марки КДФ-90 забезпечують показники продуктивності та масової частки вологи у концентраті на необхідному для виробництва обкотишів рівні 0,6...0,8 т/м² та 8,2...9,5% відповідно.

Досліджено вплив різних факторів на ефективність роботи керамічних вакуум-фільтрів, зокрема густини пульпи, рівня пульпи у ванні фільтрів, рівня вакууму у зонах набору та сушки кеку.

На подальших етапах досліджень необхідно вивчити впливу рН суспензії, локального регулювання її температури, додавання коагулянтів та ПАР.

Доцільно вивчити параметри оптимізації процесу використання ультразвукових випромінювачів та кислот для регенерації фільтруючих елементів.

Список літератури

1. **Олійник Т.А.** Перспективи розвитку технологій збагачення залізних руд / **Т.А. Олійник** // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. – 2018. – Вип. 69(110). – С. 32-44.
2. **Tetiana Oliinyk, Liudmila Sklyar, Natalia Kushniruk, Nadiya Holiver, Barbara Tora**, 2023 – Ocena skuteczności technologii wzbogacania kwarcytu hematytowego, Inżynieria Mineralna z. 1(51), Wyd. Polskiego Towarzystwa Przeróbki Kopalni, Kraków, s. 33 – 44 <http://doi.org/10.29227/IM-2023-01-04>
3. **Білецький В.С., Олійник Т.А., Смирнов В.О., Скляр Л.В.** Техніка та технологія збагачення корисних копалин. Частина 3. Заключні процеси. – Кривий Ріг: Видавець ФОП. Чернявський Д.О. – 2019 – 230 с. ISBN 978-617-7553-97-6.
4. **Кравець В. Г., Білецький В. С., Смирнов В. О.**; Техніка і технологія збагачення корисних копалин. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 184 «Гірництво» / КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 286с.
5. **Смирнов В.О., Білецький В.С., Шолда Р.О.** Переробка корисних копалин. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2013. – 600 с.
6. **Назимко Е.И.** Дослідження мікроструктури кеку методами фрактальної геометрії // Наукові праці Донату: Серія гірничо-електромеханічна. – 2001. – Вип. 27. – С. 283-288.
7. **Назимко О.І., Гарковенко Є.Є., Науменко В.Г.** Аналітичне моделювання процесу видалення вологи з осадів/ **О.І. Назимко, Є.Є. Гарковенко, В.Г. Науменко** // Науково-технічний зб. Збагачення корисних копалин, 2012. – Вип. 49(90). – С. 120-125.
8. **Smith, J.** Optimal ceramic filtration operating conditions for an iron-ore concentrate / **J. Smith** – Minerals Engineering, 2018.
9. **Salmimies, R.** The scaling and regeneration of the ceramic filter medium used in the dewatering of a magnetite concentrate / **R. Salmimies**. – International Journal of Mineral Processing, 2013.
10. **Wei-Ming, L.** Effect of woven structure on transient characteristics of cake filtration / **L Wei-Ming**, – Chemical Engineering Science, 1997.
11. **Chen, D.** Ultrasonic control of ceramic membrane fouling by particles: Effect of ultrasonic factors / **D. Chen** – Ultrasonics Sonochemistry, 2006.
12. **Adail, M.** Influence of process variables on the ceramic capillary filtration of iron ore slurries / **M. Adail** – Minerals Engineering, 2022.
13. **Smith, J.** An Assessment of Ceramic Filtration for a Metallurgical Process / **J. Smith** – University of the Witwatersrand, Johannesburg, 2015.

Рукопис подано до редакції 27.03.24

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
А. А. ШАШКІНА, Є. Ю. БОБРОВ, аспіранти
Криворізький національний університет

МЕТОДИ АНАЛІЗУ ВІБРАЦІЙ ТА АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ В ПРОЦЕСІ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

Метою дослідження є аналіз методів дослідження віброакустичних сигналів бурової установки в процесі буріння свердловин.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного моделювання, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні застосування технології обробки сигналів вібрації та акустичної емісії бурової установки для визначення фізико-механічних властивостей гірської породи та технічного стану обладнання в процесі буріння свердловин.

Практичне значення полягає у визначенні комбінації інформативних характеристик віброакустичного сигналу бурової установки в процесі буріння свердловин для підвищення якості його моделювання та керування.

Результати. Складна динаміка бурової установки включає всі основні типи коливань в процесі буріння свердловин. Механізм акустичної емісії та вібрації однаковий у тому, що обидва вони виникають через коливальні рухи в середовищі. Різні режими вібрації, такі як крутильні, бічні та осьові, призводять до зменшення швидкості проникнення (ROP). Вони також можуть спричинити катастрофічні збої та, як мінімум, знос дорогих компонентів бурильної техніки. Вимірюваний супутній віброакустичний сигнал є інтегруючим джерелом, що містять певну інформацію про характер і поточний режим буріння гірської породи. Цей сигнал явно представлений у часовій області поведінкою його амплітуд або в частотній області його спектром. Інформація, що міститься в цьому сигналі, може бути виділена у формі певних характеристичних ознак у часовій, частотній або частотно-часовій області та використана для діагностики стану технологічного обладнання, визначення фізико-механічних характеристик гірської породи та ідентифікації технолого-мінералогічних різновидів руди в процесах розвідки і експлуатації родовищ корисних копалин. Налаштування керування процесом буріння свердловин з урахуванням поточного стану бурового устаткування та фізико-механічних характеристик породи дозволяє підвищити ROP та енергоефективність буріння.

Ключові слова: буріння свердловин, вібрація, акустична емісія, характеристичні ознаки, методи аналізу.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-144-153

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Складна динаміка бурової установки включає всі основні типи коливань в процесі буріння свердловин. Механізм акустичної емісії та вібрації однаковий у тому, що обидва вони виникають через коливальні рухи в середовищі. Різні режими вібрації, такі як крутильні, бічні та осьові, призводять до зменшення швидкості проникнення (ROP). Вони також можуть спричинити катастрофічні збої та, як мінімум, знос дорогих компонентів бурильної техніки. Разом з тим вони несуть певну інформацію про стан обладнання та характеристики гірської породи. Налаштування керування процесом буріння свердловин з урахуванням поточного стану бурового устаткування та фізико-механічних характеристик породи дозволяє підвищити ROP та енергоефективність буріння, а також зменшити інші матеріальні витрати. Але вирішення цієї задачі залишається проблемним питанням.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботі [1] розглянуто методи моніторингу стану технічного обладнання. Зазначається, що вибір відповідного методу залежить від характеру інформації, що використовується. Методика моніторингу стану використовується для виявлення суттєвих змін у техніці, що спостерігається. Ці зміни свідчать про розвиток несправності. Моніторинг вібрації - найбільш ефективний метод, який можна використовувати для виявлення механічних дефектів у будь-якому обладнанні, що обертається. Акустична емісія працюючого обладнання використовується для виявлення, визначення місцезнаходження та постійного моніторингу тріщин у багатьох видах конструкцій, трубопроводів і т. д. Методом термографії аналізується активне механічне та електричне обладнання щодо виявлення термічних або механічних дефектів. При моніторингу стану машин і механізмів також проводиться аналіз мастила на наявність певних мікроскопічних частинок, контроль корозії, збір та аналіз фрагментів зношених технологічних агрегатів та ін. У процесі моніторингу необхідно ідентифікувати і вибрати сигнал, що відноситься до компонента, що спостерігається. Наявність та тип несправ-

ності можуть бути виявлені в процесі експлуатації машини, її прогрес відстежуватиметься, отже, буде визначено залишковий термін їх служби.

У статті [2] розглянуто методи обробки віброакустичного сигналу від процесу дезінтеграції породи при обертальному бурінні. Пропонується використовувати вимірний супутній віброакустичний сигнал, що виникає в процесі буріння, як інформаційний ресурс. Процес дезінтеграції гірських порід роторним бурінням відноситься до тих технологічних процесів, математичне моделювання яких на основі відомих законів фізики не приводить до задовільних результатів. Тут можуть бути застосовані емпіричні підходи, які призводять до моделі, призначеної до деякого обмеженого простору. Важливою особливістю процесу дезінтеграції породи є відносно сильна стохастична складова віброакустичного сигналу, що при цьому виникає. Це потребує вибір відповідного методу для ефективної обробки вимірюваного сигналу.

У роботі [3] пропонується використовувати прості аналітичні вирази для визначення амплітуди різного виду вібрацій при механічній обробці деталей але для умов буріння свердловин вони можуть надати у кращому випадку лише загальну якісну оцінку процесів, що при цьому відбуваються.

У роботі [4] стверджується, що основними діагностичними параметрами віброакустичних сигналів є часові характеристики – кореляційна функція $R(\tau)$ та дисперсія $D[\xi(t)]$ процесу, а також його спектральні характеристики – частоти f_k його гармонійних складових та дисперсії σ_k^2 їх випадкових амплітуд γ_k . На додаток до зазначених характеристик, як діагностичні ознаки також використовуються огинаюча кореляційної функції, кепстральні характеристики, а в багатоканальних системах – взаємні кореляційні та спектральні характеристики [5-7].

Постановка завдання: аналіз методів визначення параметрів вібрації та акустичної емісії бурової установки в процесі буріння свердловин для отримання інформації про стан обладнання та характеристики гірської породи.

Викладення матеріалу та результати. Під час буріння свердловини бурильна колона знаходиться під динамічним навантаженням. Як правило, долото та бурильна колона обертаються за допомогою двигуна верхнього приводу на поверхні. Бурильна колона складається з бурильних труб і вузла нижньої частини свердловини (КНБК), з'єднаних між собою кріпильними з'єднаннями. Коли механічна енергія передається від поверхні до долота, це призводить до нелінійної взаємодії між бурильною колоною та свердловиною, що викликає вібрацію всіх складових бурової установки [8]. Комбінації маси, жорсткості та динамічних сил є факторами, які змушують систему вібрувати всіма можливими способами, а саме - аксіально, торсійно та латерально (рис.1) [9].

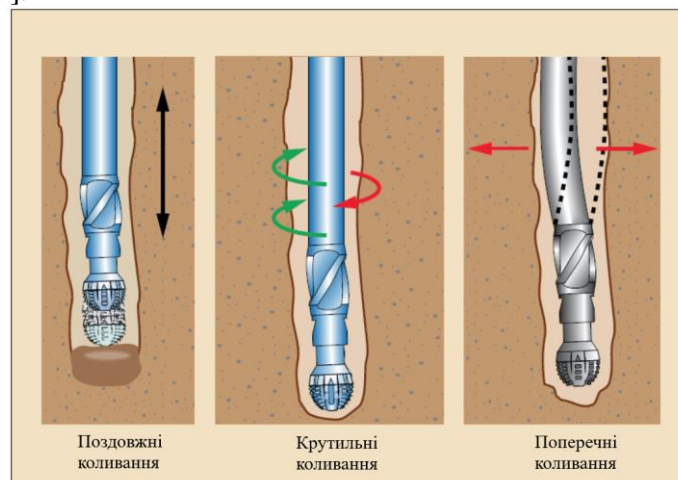


Рис. 1. Вібрації бурильної колони в процесі буріння свердловин

Основними причинами виникнення коливань є стрибкоподібний характер руйнування гірських порід та вибістість вибою свердловини, яка в свою чергу залежить від впливу бурильної колони на вибій при її поздовжніх і крутильних коливаннях, різких і частих змін параметрів режиму буріння, неоднорідності, тріщинуватості і різкої перемежності по твердості порід, що

розбурюються, різниці тиску під зубцями долота. Форма поверхні вибоїподібного вибою може бути різною, але найбільш поширеною є хвилеподібна [8].

Вібрація бурильної колони вважається однією з основних причин неефективного буріння. Завдяки підтримці оптимальних динамічних сил або робочих параметрів, таких як вага на долоті (WOB), швидкість обертання поверхні (RPM), крутний момент на долоті (TOB) і гідравліка долота, ROP та енергоефективність буріння можуть бути значно покращені. Серед різних режимів вібрації крутильна вібрація, що в основному спричинена нерівномірним обертанням долота в свердловині, часто вважається найбільш шкідливою під час буріння на низькій швидкості, що зрештою додає додаткові витрати [10].

Залежність втрат потужності на вібрацію N_{vib} за наявності осьового зусилля ($P \neq 0$) від частоти обертання ω та довжини H бурового ставу може бути виражена у вигляді [11-13]

$$N_{vib} = B(\omega^2 + k_1\omega + k_2) = D\omega^2 + E\varphi(\omega), \quad (1)$$

де B, k_1, k_2, D, E - коефіцієнти пропорційності.

Граничні частоти обертання бурового ставу, з яких починаються інтенсивні вібрації: $\omega_1 \approx 1 \cdot c^{-1}$ (при $P \neq 0$) і $\omega_1 \approx 0,8 \cdot c^{-1}$ (при $P = 0$).

Узагальнена оцінка вібрації може проводитись за віброшвидкістю

$$v_{vib} = 2\pi vA, \quad (2)$$

де v, A - відповідно частота та амплітуда вібрації.

Для визначення непродуктивних втрат енергії та коефіцієнта корисної дії системи буріння важливу роль відіграє оцінка вібропотужності

$$N_{vib} = v_{vib}P_{vib}, \quad (3)$$

де P_{vib} - сила, що змушує вібрацію.

При збільшенні частоти обертання ω характер зростання вібрацій бурового ставу може бути різним. Спостерігаються випадки плавного чи стрибкоподібного зростання вібрації [14]. Таким чином, з точки зору динаміки, реальна пружна система бурового верстата - це складна коливальна система з розподіленими інерційними та пружними параметрами, що має безліч власних частот коливань [15].

Віброакустичні сигнали є стохастичними коливаннями, тому при побудові їх математичних моделей використовуються методи теорії випадкових процесів [4]. В даний час найбільш поширеною моделлю віброакустичних сигналів є стаціонарні випадкові процеси з дискретним спектром, які можуть бути представлені в комплексній формі в наступному вигляді [16]

$$\xi(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \gamma_k e^{i2\pi f_k t}, \quad (4)$$

де γ_k - незалежні однаково розподілені комплексні випадкові величини, які мають математичні очікування $M[\gamma_k] = 0$, а дисперсії $D[\gamma_k] = \sigma_k^2$.

Кореляційна функція процесу (1) є майже періодичною функцією і дорівнює

$$R(\tau) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma_k^2 e^{i2\pi f_k \tau}. \quad (5)$$

З формули (2) випливає, що дисперсія процесу (1) дорівнює

$$D[\xi(t)] = R(0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sigma_k^2. \quad (6)$$

Дисперсії σ_k^2 випадкових амплітуд γ_k гармонійних складових із частотами f_k визначають спектр випадкового процесу (1).

Вимірюваний супутній віброакустичний сигнал є інтегруючим джерелом, що містить певну інформацію про характер і режим поточного буріння гірської породи [2]. Цей сигнал явно представлений у часовій області поведінкою його амплітуд або в частотній області його спектром. Інформація, що міститься в цьому сигналі, може бути виділена у формі певних характеристик ознак у часовій, частотній або частотно-часовій області та використана для діагностики стану технологічного обладнання, визначення фізико-механічних характеристик гірської породи та ідентифікації технолого-мінералогічних різновидів руди в процесах розвідки і експлуатації родовищ корисних копалин. На рис. 2 наведена робоча схема процедури аналізу сигналу вібрації та акустичної емісії бурової установки для вирішення цієї задачі [2].

Аналіз у часовій області включає візуалізацію та аналіз віброакустичних сигналів у часі [17]. Метод візуального перегляду форми хвилі у часі не слід недооцінювати, оскільки таким чином можна отримати багато інформації, що включає наявність амплітудної модуляції, перехідних процесів і високочастотних компонентів [18]. Однак простий аналіз віброакустичних сигналів не дозволяє відокремити варіації інформаційних складових від шумових даних. Таким чином, потрібен метод обробки сигналу, щоб отримати важливу інформацію із сигналів у часовій області шляхом перетворення необроблених сигналів у відповідні статистичні параметри, такі як пік, RMS, амплітудний коефіцієнт, ексцес та ін.

Пік – це максимальне значення сигналу протягом вимірюного часу, яке можна визначити як [18]

$$\text{peak} = |v(t)|_{\max}. \quad (7)$$

При наявності текстурно-структурних неоднорідностей гірської породи, пікові значення віброакустичного сигналу будуть змінюватися. У разі несправності несправностей бурового обладнання пікове значення отримуваних сигналів збільшується. Серйозність і тип несправності можна оцінити за амплітудами відповідних піків.

Середньоквадратичне значення (RMS) відображає потужність вібрації. Це найпростіший і ефективний метод виявлення несправностей бурового обладнання, особливо дисбалансу в обертових машинах [19]. Однак цей метод більше підходить для використання у стаціонарному режимі роботи устаткування та аналізу однієї форми синусоїди [17]. RMS є кращим за піковий метод через чутливість останнього до шуму (рис. 3) [20].

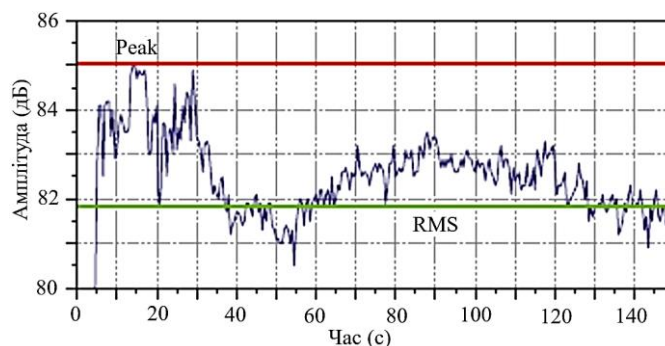


Рис. 3. Середньоквадратичне значення (RMS) та пік віброакустичного сигналу

Для будь-якої безперервної функції $f(t)$ в інтервалі $T_2 - T_1$ середньоквадратичне значення може бути представлено

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} f(t) dt}. \quad (8)$$

Метод RMS має два недоліки [21]. По-перше, на середньоквадратичні значення віброакустичного сигналу не впливають ізольовані піки, що знижує його чутливість до неоднорідностей гірського масиву типу тріщин і пір. Крім того, на нього також незначно впливають короткі спалахи вібрацій низької інтенсивності.

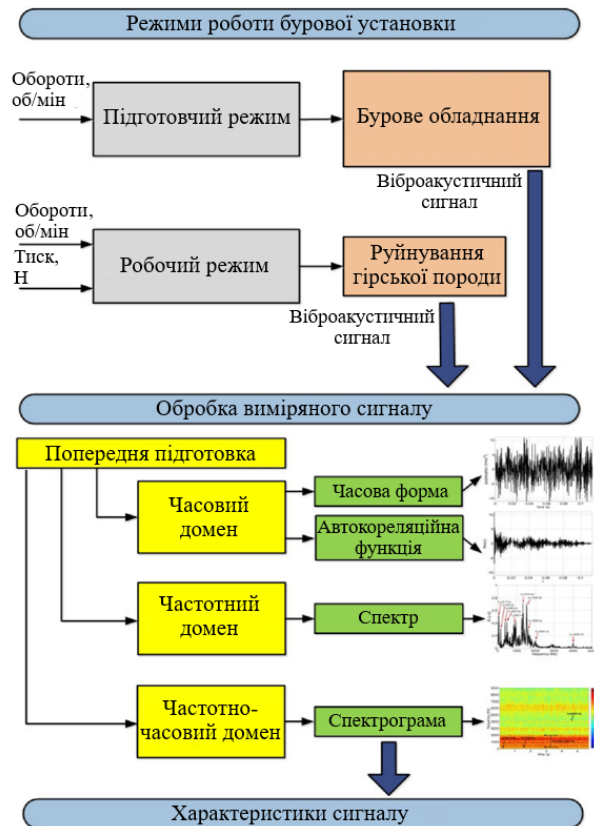


Рис.2. Схема процедури аналізу сигналу вібрації та акустичної емісії бурової установки

Крест-фактор - це відношення пікового значення вхідного сигналу до середньоквадратичного значення, яке представлено таким чином [17]:

$$\text{CrestFactor} = \frac{\text{peak}}{\text{RMS}}. \quad (9)$$

Для чистої синусоїди пік-фактор дорівнює $\sqrt{2} = 1.414$, а для нормально розподіленого випадкового шуму значення буде приблизно 3. Порівняно з піковими та середньоквадратичними значеннями, пік-фактор зазвичай використовується, коли вимірювання проводяться на різних швидкостях обертання, оскільки він не залежить від швидкості. Крест-фактори також надійні лише за наявності значної імпульсивності [20].

Ексцес E є мірою гостроти піку у розподілі випадкових величин. Для будь-якого розподілу величин можна розрахувати значення середньої величини. У даному контексті коефіцієнт ексцесу показує, чи перебувають більшість значень розподілу в безпосередній близькості до середньої величини, або вони розподілені віддалено від неї. Ексцес не чутливий до швидкості обертання або навантаження бурового обладнання, і його ефективність залежить від наявності значної імпульсивності в сигналі [17,22].

$$E = \frac{\sum(x_i - M^4)}{N\sigma^4} - 3, \quad (10)$$

де M – середнє арифметичне; σ - стандартне відхилення.

Для нормального розподілу величин значення ексцесу дорівнює нулю. Якщо значення ексцесу належить до діапазону позитивних чисел, аналізований розподіл величин є відносно гострим. В іншому випадку (негативний коефіцієнт) аналізований розподіл є відносно згладженим.

Для аналізу форми розподілу також може бути застосований такий показник як *асиметрія* A

$$A = \frac{\sum(x_i - M)^3}{N\sigma^3}. \quad (11)$$

У програмах моніторингу стану механічного обладнання ексцес зазвичай є кращим, ніж крест-фактор, але останній використовується більш широко. Це пов'язано з тим, що лічильники, які можуть реєструвати значення крест-фактора є більш доступними порівняно з вимірювачем ексцесу.

Аналіз у частотній сфері. Аналіз у частотній області включає аналіз фізичних сигналів чи часових рядів даних із частоти [17,19]. Він показує кількість сигналів, що у заданій смузі частот у певному діапазоні частот. Більшість реальних сигналів можна розбити на комбінацію унікальних синусоїд. Кожна синусоїда буде виглядати як вертикальна лінія в частотній області, де висота та положення лінії представляють амплітуду та частоту відповідно. При аналізі частотної області амплітуда наноситься на графік відносно частоти та порівнюється з часовою областю, а виявлення резонансної частотної складової легше. Кілька характеристик сигналу, які не можна визначити у часовій області, можна спостерігати за допомогою аналізу частотної області. Однак частотний аналіз не підходить для сигналів, частоти яких змінюються з часом.

FFT (*Швидке перетворення Фур'є*). Перетворення Фур'є (FT) перетворює сигнал у часовій області в частотну область, створюючи спектр. FT виконується відповідно до виразу [17].

$$F(w) = Ff(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-iwt} dt \quad (12)$$

де w - частота, а t - час.

Перетворення назад у часову область із частотної області можна здійснити шляхом зворотного перетворення Фур'є (IFT). Ця процедура виконується відповідно з формулою

$$f(t) = F^{-1}(F(w)) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} F(w)e^{iwt} dw. \quad (13)$$

FFT - це ефективний і широко використовуваний алгоритм для отримання дискретизованих сигналів часу. FFT графік безвідмовних промислових машин складається лише з одного піку, який представляє власну частоту працюючої машини. Характеристичні ознаки процесу буріння свердловин можна отримати завдяки наявності на графіку інших піків, окрім піку власної частоти.

Кепстральний аналіз заснований на визначенні функції зворотного перетворення Фур'є від логарифму спектра потужності сигналу [23]

$$C_s(q) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \ln|S(w)|^2 e^{i w q} dw, \quad (14)$$

де $S(w)$ – спектр вхідного сигналу, q – кепстральний час.

Цей аналіз можна використовувати для виявлення будь-якої періодичної структури в спектрі, такої як гармоніки, бічні смуги або відлуння [24]. Зокрема, такий підхід дозволяє виявляти низькі гармонічно пов'язані частоти. Існує чотири типи кепстра: справжній кепстр, комплексний кепстр, кепстр потужності та фазовий кепстр. Кепстр потужності є найбільш широко використовуваним кепстром у діагностиці та моніторингу стану машин.

Аналіз огинаючої, також відомий як амплітудна демодуляція або демодульований резонансний аналіз. [17,25]. Цей метод відокремлює низькочастотний сигнал від фонового шуму [19]. Аналіз огинаючої складається зі смугової фільтрації та етапу демодуляції, який виділяє огинаючу сигналу, а його спектр, можливо, містить необхідну діагностичну інформацію [26]. Проблема цього підходу полягає у визначенні найкращої смуги частот для огинання. Для безперебійної роботи аналізу огинаючої потрібен чіткий фільтр і точне визначення смуги частот для фільтрації [18].

Аналіз спектру пов'язаний із FFT таким чином, що цей метод часто використовується в спектральному аналізі для перетворення сигналу з часової області в частотну [27]. Порівняння спектру слід проводити за логарифмічною шкалою амплітуд (дБ), оскільки зміни на логарифмічній осі можуть визначити стан вібрації. Однак доводиться мати справу з невеликими коливаннями швидкості обертання машини [18]. Аналіз спектру – це комплексний аналіз, який все ще вимагає експертних навичок для використання діагностичних можливостей спектрального аналізу. У порівнянні з кепстральним аналізом спектральний аналіз не надає жодної інформації щодо часової локалізації частотної складової [28]. Було помічено, що цей підхід може давати згладжені спектральні оцінки сигналів вібрації з високою роздільною здатністю порівняно з підходом FFT [29].

Аналіз у частотно-часовій області. Він включає методи, що використовуються одночасно в часовій і частотній областях. Цей аналіз передбачає вивчення двовимірного сигналу. Часова та частотна області інтегровані в аналіз частотно-часової області [17]. Згадані вище підходи до аналізу віброакустичного сигналу (методи часової та частотної областей) здебільшого покладаються на припущення, що не можна виявити локальні особливості в часовій та частотній областях одночасно [30]. Таким чином, такі методи непридатні для аналізу нестационарних сигналів. Під час обробки сигналів, природа яких швидко змінюється з часом, часто корисно враховувати частотний вміст коротких сегментів сигналу. Це дає змогу сформулювати більш загальний спектр як двовимірну функцію, що залежить не тільки від частоти, але й від положення в часі.

Спектрограма як основа частотно-часового аналізу є одним із важливих інструментів технічної діагностики. Спектрограма відображає зміни в спектрі потужності сигналу в часі. У разі оцінювання віброакустичного сигналу частотно-часовий аналіз може бути корисним для вивчення змін спектральних властивостей сигналу через зміну властивостей об'єкта, що контролюється. Графічне представлення спектрограми можна розуміти як високоінтегроване джерело інформації. Інформаційна цінність такого подання висока порівняно з більш простими формами інформації. Спектрограма може бути виражена як часова послідовність її спектрів потужності, де ці спектри потужності мають структуру $N/2$ векторів елементів [2]

$$S_{xx}(f_k, j) = \left[S_{xx}(f_0, j), S_{xx}(f_1, j), \dots, S_{xx}\left(f_{\frac{N}{2}-1}, j\right) \right]. \quad (15)$$

Елементи $S_{xx}(f_k, j)$ спектру потужності є середніми значеннями файлів, пов'язаними з j -м моментом часу та k -м компонентом частоти потужності сигналу f_k . Параметр N представляє кількість вибірок у сегменті цього сигналу.

Вейвлет - перетворення WT [31] - це лінійне перетворення, що розкладає сигнал часу на вейвлети, які є локальними функціями часу, оснащеними заданим частотним вмістом. Замість синусоїдальних функцій в якості основи використовуються вейвлети [30]. Вейвлет-перетворення для безперервного сигналу щодо вейвлет функції визначається виразом [17,32]

$$T(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt, \quad (16)$$

де ψ^* - означає комплексне спряжене для ψ ; параметр $b \in R$ відповідає часовому зрушенню, і називається параметром положення, параметр $a > 0$ задає масштабування та називається параметром розтягування; $w(a) = \frac{1}{\sqrt{a}}$ - вагова функція.

Відповідно до структури сигналу необхідно вибрати певну основу вейвлету, щоб уникнути оманливих результатів діагностики. WT забезпечує кращу часову локалізацію на високих частотах порівняно з STFT, є кращим інструментом при роботі з нестационарними сигналами та при аналізі перехідних процесів [33].

Розподіл Вінгнера–Вілля (WVD). Це окремий випадок розподілу класу Коена, який дає частотно-часову щільність енергії, обчислену шляхом кореляції сигналу з часовою та частотною трансляцією самого себе [34]. WVD сигналу $x(t)$ представлено як [17]

$$W_x(t, w) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) \cdot x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \cdot e^{-j\tau w} d\tau \quad (17)$$

де x^* - спряжена величини x ; τ - змінна затримки.

WVD має кілька переваг, таких як краща роздільна здатність, ніж STFT, відмінна точність, і функція вікна не потрібна для його аналізу [35].

Направлений розподіл Вігнера (dWD) був спеціально розроблений для аналізу перехідних комплексних сигналів і застосований в обертових машинах [36]. Результати показали, що акустичні сигнали були більш ефективними для раннього виявлення несправностей порівняно з вібраційними сигналами. Використовуючи цей запропонований метод, можна отримати більш надійні результати діагностики в ситуації, коли складно відстежити гармоніки [17].

Перетворення Гільберта–Хуанга (ННТ). Процедура ННТ складається з емпіричного розкладання сигналів (EMD) і перетворення Гільберта. Шляхом поєднання цих двох методів можна отримати спектр Гільберта для визначення характеристик стаціонарних, нестационарних і перехідних сигналів [30, 37]. За допомогою цього методу складний багатокомпонентний сигнал розбивається на ряд функцій внутрішнього режиму (IMF). Використовуючи техніку EMD, складний сигнал можна реконструювати за допомогою IMF, виражених як [17]

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} c_i(t) + r_n(t) dt, \quad (18)$$

де $c_i(t)$ – IMF; $r_n(t)$ - залишковий сигналом, який представляє повільно змінний або постійний тренд сигналу [30].

ННТ має кілька переваг, таких як низький час обчислення, і він не пов'язаний з будь-якою згорткою [35]. Однак EMD, яка є основною частиною ННТ, має певні недоліки. Можна неправильно витлумачити результат через незавидні IMF, створені в області низьких частот. Крім того, сигнали низькочастотних компонентів не можуть бути розділені.

Короткочасне перетворення Фур'є (STFT). Технологія STFT має здатність протидіяти обмеженням FFT і в основному застосовується для виділення вузькосмугового частотного вмісту в нестационарних або зашумлених сигналах [17]. У методі STFT початковий вібраційний сигнал розбивається на часові сегменти за допомогою вікна, а потім FT застосовується до кожного сегменту часу [35]

$$\text{STFT}(f, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) w(t - \tau) e^{-2\pi f t} dt, \quad (19)$$

де $x(t)$ - інтерпретований сигнал, а $w(t)$ - віконна функція з центром у часі T .

STFT залежить від ширини вікна. Велика ширина вікна вибирається для отримання більшої точності частоти, тоді як для підвищення точності в часі бажана мала ширина вікна. Основним недоліком цього підходу є те, що він не може досягти високої роздільної здатності в часовій і частотній області одночасно.

Спектральна густина потужності (PSD). PSD можна застосовувати для вимірювання амплітуди коливальних сигналів у даних часового ряду та визначення енергетичної сили частот, що може бути корисним для подальшого аналізу [17]. Зі складного спектру можна обчислити односторонню PSD як

$$\text{PSD}(f) = \frac{2|X(f)|^2}{(t_2 - t_1)}, \quad (20)$$

де $t_2 - t_1$ – часовий діапазон, а $X(f)$ – комплексний спектр вібрації в часовому діапазоні, який можна виразити в одиницях $(m/s^2/Hz)$.

PSD можна також безпосередньо розрахувати в частотній області, якщо використовується ШПФ вібраційного сигналу, застосовуючи таку формулу [38]

$$\text{PSD} = \frac{(\sigma_{RMS})^2}{f}, \quad (21)$$

де G_{RMS} середньоквадратичне прискорення на певній частоті.

PSD може аналізувати дефектні смуги частот, не стикаючись із проблемою зміни ковзання, і не обов'язково зосереджується на одній конкретній гармоніці [39]. Він вимагає дуже мало обчислювальної потужності і може бути безпосередньо обчислений FFT або шляхом перетворення автокореляційної функції [35].

Наведені вище методи аналізу віброакустичного сигналу, що виникає при бурінні свердловин, можуть бути практично реалізовані завдяки чисельним програмно-технічним продуктам як універсального, так професійно-спрямованого призначення. Далі розглянуто приклад аналізу вібраційного сигналу, отриманого в процесі зміни RPM бурової установки, за допомогою програмного пакету Matlab 2023b [40].

На рис. 4 наведено результати аналізу зазначеного сигналу у часовій (а), частотній (б) та частотно-часовій (в) областях. У табл. 1 наведена інформація щодо характеристичних параметрів аналізованого сигналу у часовій області, а у табл. 2 - параметри аналізованого сигналу вібрації в частотній та частотно-часовій областях.

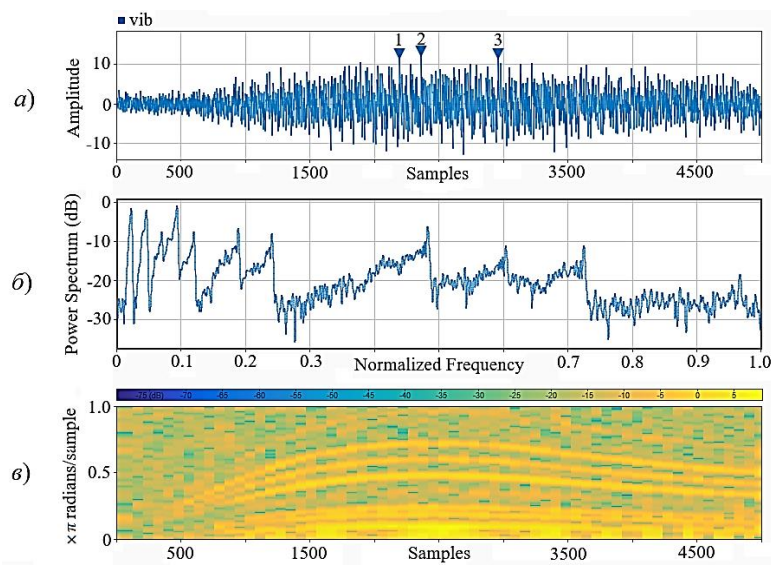


Рис. 4. Результати аналізу сигналу вібрації бурової установки в процесі зміни робочого режиму у часовій (а), частотній (б) та частотно-часовій областях (в)

Таблиця 1

Параметри аналізованого сигналу вібрації бурової установки у часовій області

Параметр	Value Min/ Max	Mean	Median	RMS	Peak 1 Values/ Times	Peak 2 Values/ Times	Peak 3 Values/ Times
Значення	-1.28e+1/ 1.20e+01	-2.10e-15	-5.548e-2	3.10e+00	1.13e+01/2197	1.20e+01/2363	1.14e+01/2962

Таблиця 2

Параметри аналізованого сигналу вібрації в частотній та частотно-часовій областях (RBW = 0.001954)

Спектр				Спектрограма					
Y-Axes Limits		Frequency Limits, $\times \pi$ radian/sample		Time Limits, samples		Frequency Limits, $\times \pi$ radian/sample		Power Limits	
Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
-3.7e+1	9.08e-1	0	1	1.85e+2	4.96e+3	1.35e-1	8.15e-1	-7.946	8.881

Результати виконаного аналізу свідчать про можливість використання досліджених методів для формування комплексу характеристичних ознак віброакустичного сигналу бурової установки з метою діагностики стану її технічних складових та оцінки фізико-механічних характеристик гірської породи безпосередньо в процесі буріння.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Проаналізовано методи обробки сигналів вібрації та акустичної емісії бурової установки для визначення фізико-механічних властивостей

гірської породи та технічного стану обладнання в процесі буріння свердловин. Вимірюваний супутній віброакустичний сигнал є інтегруючим джерелом, що містить певну інформацію про поточний режим буріння гірської породи. Цей сигнал явно представлений у часовій області поведінкою його амплітуд або в частотній області його спектром. Інформація, що міститься в цьому сигналі, може бути виділена у формі певних характеристичних ознак у часовій, частотній або частотно-часовій області та використана для діагностики стану технологічного обладнання, визначення фізико-механічних характеристик гірської породи та ідентифікації технологічно-мінералогічних різновидів руди в процесах розвідки і експлуатації родовищ корисних копалин. В свою чергу, налаштування керування процесом буріння свердловин з урахуванням поточного стану бурового устаткування та фізико-механічних характеристик гірської породи дозволяє підвищити ROP та енергоефективність буріння [41].

Напрямок подальших досліджень є синтез моделі процесу буріння гірської породи залізородних родовищ, оцінка ефективності різних комбінацій вимірюваних параметрів та обчислювальних алгоритмів, розробка алгоритму оптимізації процесу буріння.

Список літератури

1. **Kumar, S., Lokesha, M., Kumar, K., Srinivas, K.** Vibration-based fault diagnosis techniques for rotating mechanical components: A review article. IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng. 2018, 376, 012109.
2. **Flegner, P., Kačur, J., Durdán, M., Laciak, M.** Evaluation of the Acceleration Vibration Signal for Aggregates of the Horizontal Drilling Stand. Appl. Sci. 2022, 12, 3984. <https://doi.org/10.3390/app12083984>.
3. **Amit S. Wani, Gayatri S. Sagavkar, Vaibhav K. Bhate.** Vibration analysis of drilling operation. International Journal of Students Research in Technology & Management, Vol 1(2), April 2013, pp. 163-175. www.giapjournals.com Page 163.
4. **Babak, V., Beregun, V., Krasilnikov, A.** Methods and means of vibrodiagnostics of units of cogeneration installations. - Special Issue of e-Journal of Nondestructive Testing (eJNDT) ISSN 1435-4934 **Vol. 22(11)**. <http://www.ndt.net/?id=21640>.
5. Вібрації у техніці: Довідник, в 6-ти т. Ред. рада: В.М. Челомей (голова). М., Машинобудування, 1981, Т. 5. Вимірювання та випробування. За ред. М.Д. Генкіна, 1981, 496 с.
6. **Яворський І.М.** Математичні моделі та аналіз стохастичних коливань. Львів, ФМІ НАНУ, 2013, 804 с.
7. **С.В. Бабак, М.В. Мислович, Р.М. Сисак, К. Статистична діагностика електротехнічного устаткування: Монографія.** - Ін-т електродинаміки НАН України, 2015, 456 с.
8. **А. С. Новіков, Д. Ю. Серіков.** Деякі особливості роботи бурових доліт та практичні прийоми при їх використанні. - СФЕРА. НАФТА ІГАЗ, 2/2020 (76).
9. Drillstring Vibrations and Vibration Modeling. - 2010 Schlumberger, 10-DR-0263. <https://www.slb.com/-/media/files/drilling/brochure/drillstring-vib-br>.
10. **Parimal Patil, Catalin Teodoriu.** Analysis of Bit-Rock Interaction During Stick-Slip Vibration Using PDC Cutting Force Model. - September 2013, Oil Gas European Magazine 39(3):124
11. **Бритарев В.А., Замишляєв В.Ф., Баранникова І.В., Бритарев І.В.** Механічне обладнання для кар'єрів. Частина I. Бурові верстати відкритих розробок. - МГТУ, 1998.
12. **Жуковський А.А., Нанкін Ю. А., Сушинський В.А.** Привід та система управління бурових верстатів для кар'єрів. - Надра, 1990. - 223 с.: іл.
13. **Зайченко С.Г.** Дослідження та вибір методів зниження вібрації при бурінні вибухових свердловин у міцних породах верстатами типу СБШ-250. - Дис. канд. тех. наук. - 1977.
14. **Кантович Л. І., Дмитрієв В. Н.** Статика та динаміка бурових шарошечних верстатів. - Надра, 1984, 200 с.
15. **Егамбердієв І.П.** Методи оцінки технічного стану бурових верстатів/монографія - Навої: вид-во ім. Алішер Навої, 2019, 186 с. ISBN 978-9943-5884-4-8.
16. Гіхман І.І., А.В. Скорохід. Введення у теорію випадкових процесів. - Наука, 1977, 567 с.
17. **Mohamad Hazwan Mohd Ghazali, Wan Rahiman.** Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review. - Shock and Vibration, Volume 2021, Article ID 9469318, 25 pages. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>.
18. **I. Howard.** A review of rolling element bearing vibration detection, diagnosis and prognosis. - Report for the Defence Science and Technology Organization Canberra (Australia). Report no. DSTO-RR-0013, October. Victoria, Tech. Rep., DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory., 1994, Tech. Rep.
19. **M. Vishwakarma, R. Purohit, V. Harshlata, P. Rajput.** Vibration analysis & condition monitoring for rotating machines: a review, Materials Today: Proceedings, vol. 4, no. 2, pp. 2659–2664, 2017.
20. **A. Aherwar, M. S. Khalid.** Vibration analysis techniques for gearbox diagnostic: a review. - International Journal of Advances in Engineering & Technology, vol. 3, no. 2, pp. 4–12, 2012.
21. **Mehrbod Khoshouei, Raheb Bagherpour, Mohammad Hossein Jalalian, Mojtaba Yari.** Investigating the acoustic signs of different rock types based on the values of acoustic signal RMS. - Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin), 2020, pp. 29-38. DOI: 10.17794/rgn.2020.3.3.
22. **J. Runesson.** Vibration analysis for condition monitoring of mechanical presses. - Lund University, Lund, Sweden, 2019, Master's Thesis.
23. **Y. Liu, Z. Jiang, H. Haizhou, J. Xiang.** Asymmetric penalty sparse model based cepstrum analysis for bearing fault detections. - Applied Acoustics, vol. 165, p. 107288, 2020.
24. **N. Aiswarya, S. Suja Priyadharsini, K. Moni.** An efficient approach for the diagnosis of faults in turbo pump of liquid rocket engine by employing fft and time-domain features. - Australian Journal of Mechanical Engineering, vol. 16, no. 3, pp. 163–172, 2018.

25. **R. B. Randall**, Frequency Analysis. - Bruel and Kjaer, Copenhagen, Denmark, 1987.
26. **D. Abboud, J. Antoni, S. Sieg-Zieba, M. Eltabach**. Envelope analysis of rotating machine vibrations in variable speed conditions: a comprehensive treatment. - Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 84, pp. 200–226, 2017.
27. **J. Trout**. Vibration analysis explained. - 2020.
28. **S. S. Aralikkatti, K. Ravikumar, H. Kumar**. Fault diagnosis of single point cutting tool using spectrum, cepstrum and wavelet analysis. - Proceedings of the 1st International Conference on Manufacturing, Material Science and Engineering, pp. 1–9, Telangana, India, August 2019.
29. **M.-J. E. Salami, A. Gani, T. Pervez**. Machine condition monitoring and fault diagnosis using spectral analysis techniques. - Proceedings of the 1st International Conference on Mechatronics, pp. 690–700, Kuala Lumpur, Malaysia, June 2001.
30. **Z. Feng, M. Liang, F. Chu**. Recent advances in time-frequency analysis methods for machinery fault diagnosis: a review with application examples. - Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 38, no. 1, pp. 165–205, 2013.
31. **Y. Wei, Y. Li, M. Xu, W. Huang**. A review of early fault diagnosis approaches and their applications in rotating machinery. - Entropy, vol. 21, no. 4, p. 409, 2019.
32. **Addison P.S.** The Illustrated Wavelet Transform Handbook. - IOP, 2002.
33. **B. Bao Liu, S.-F. Ling, Q. Qingfeng Meng**. Machinery diagnosis based on wavelet packets. - Journal of Vibration and Control, vol. 3, no. 1, pp. 5–17, 1997.
34. **V. Climente-Alarcon, J. A. Antonino-Daviu, M. Riera-Guasp, R. Puche-Panadero, L. Escobar**. Application of the Wigner-Ville distribution for the detection of rotor asymmetries and eccentricity through high-order harmonics. - Electric Power Systems Research, vol. 91, pp. 28–36, 2012.
35. **D. Goyal, B. S. Pabla**. The vibration monitoring methods and signal processing techniques for structural health monitoring: a review. - Archives of Computational Methods in Engineering, vol. 23, no. 4, pp. 585–594, 2016.
36. **Y.-S. Han, C.-W. Lee**. Directional Wigner distribution for order analysis in rotating/reciprocating machines. - Mechanical Systems and Signal Processing, vol. 13, no. 5, pp. 723–737, 1999.
37. **N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long et al.** The empirical mode decomposition and the hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. - Proceedings of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, vol. 454, no. 1971, pp. 903–995, 1998.
38. **K. Mollazade, H. Ahmadi, M. Omid, R. Alimardani**. An intelligent combined method based on power spectral density, decision trees and fuzzy logic for hydraulic pumps fault diagnosis. - International Journal of Intelligent Systems and Technologies, vol. 3, no. 4, pp. 251–263, 2008.
39. **J. Cusid, L. Romeral, J. A. Ortega, J. A. Rosero, A. Garcia Espinosa**. Fault detection in induction machines using power spectral density in wavelet decomposition. - IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 55, no. 2, pp. 633–643, 2008.
40. **Brandt, Anders**. Noise and Vibration Analysis: Signal Analysis and Experimental Procedures. - Chichester, UK: John Wiley and Sons, 2011.
41. **Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А., Паранюк Д. І.** Методи оптимізації процесу буріння свердловин. – Кривий Ріг: Гірничий вісник. 2020. Вип. 107. С. 96-101.

Рукопис подано до редакції 29.03.24

UDC 622.1

V. V. PEREGUDOV, Dr. Eng., Prof., Head of Department, Kryvyi Rih National University

A. V. BOLOTNIKOV, Ph.D., Director, Collective Enterprise "Academic House"

Y. V. PEREGUDOV, Ph.D., Researcher, LLC "Kryvbasproject"

A. O. ROMANENKO, Ph.D.; Chief Researcher, Collective Enterprise "Academic House"

O. V. ROMANENKO, Dr. Eng., Deputy Director for Scientific Affairs

Limited liability company "Mining and civil engineering"

D. A. DEMCHENKO, Leading engineer, Limited liability company "Mining and civil engineering"

ANALYSIS AND IMPROVEMENT OF THE METHODOLOGY FOR TRACTIVE CALCULATIONS OF OPEN-PIT RAIL TRANSPORT

Purpose. Based on the existing Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits, an improved methodology is proposed for efficient traction calculations of industrial open-pit railway transport using MS Excel; this opens up opportunities for further research, design, and analysis of industrial open-pit railway transport movement.

Research methods. Thanks to the inclusion in Appendix B to the Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits, the reader can find a methodology for conducting traction calculations for industrial open-pit railway transport. In this article, the authors focused on the methodology, providing detailed explanations and conducting a thorough analysis of its key aspects. The inclusion of this material opens up new opportunities for understanding and improving traction calculation processes in the field of industrial open-pit railway transport, as well as laying the groundwork for further research and development in this area.

Scientific novelty. For the first time, a deep analysis of the traction calculation algorithm for industrial open-pit railway transport, described in the methodology of the current Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits, has been conducted. After careful analysis, flaws and inaccuracies in the mentioned methodolo-

gy were identified. It was determined that the calculation example provided in the methodology of the current Norms of Technological Design was executed incorrectly. In light of this, recommendations, adjustments, and corrections have been provided in this study to improve the traction calculation algorithm for industrial open-pit railway transport.

Practical implementation. The methodology discussed in the article can be utilized as a powerful tool in the process of designing and conducting research for performing efficient traction calculations in the field of industrial open-pit railway transport using the MS Excel spreadsheet software. This provides a practical and effective approach to achieving accurate and reliable results in carrying out the specified tasks.

Results. Following the analysis, a detailed explanation of the traction calculation algorithm was provided, errors were identified and corrected, and adjustments were made to the methodology for conducting efficient traction calculations for industrial open-pit railway transport using the MS Excel spreadsheet software.

Keywords: methodology, traction calculations, industrial open-pit railway transport, MS Excel.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-153-158

Problem and its connection to scientific and practical tasks. In the present day, an integrated approach is used in the Krivoy Rog iron ore basin for transporting ore, which includes a combination of road-rail and conveyor transport. This article pays special attention to the examination of the current use of railway transport in conditions that have arisen as a result of the long-term evolutionary development of mining operations in quarries and dumps. The key aspects of traction calculations for industrial open-pit railway transport are identified and analyzed.

The problem arising in the context of using railway transport in the mining sector lies in the need to optimize traction calculations and develop effective approaches to the planning and operation of transportation infrastructure.

The practical significance of this problem lies in improving the efficiency of transportation processes and reducing the costs associated with their implementation, which can lead to increased productivity and competitiveness of mining enterprises. The analysis and improvement of traction calculation methodology are key elements in optimizing the operation of industrial open-pit railway transport.

Research and Publication Analysis. The main reference point for conducting efficiency calculations of railway transport is the Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits [1]. This key document sets standards and methodologies for calculations necessary in the mining transport sector. It serves as a foundational guide that defines requirements and norms in the field of technological design, taking into account the specifics of open-pit mining of mineral deposits. These norms provide an important basis for determining optimal parameters and approaches in the planning and operation of railway transport in the mining sector.

It is important to note that the website <http://www.kipdiit.dp.ua>, referenced in the Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits [1], is currently unavailable. According to these norms, the mentioned website hosts ready-made Microsoft® Office Excel tables with embedded formulas for solving various tasks related to traction calculations and other technological performance calculations for railway transport. Simultaneously, the specified norms [1, pages 204-220] contain a detailed description of the structure of these Microsoft® Office Excel electronic tables.

It should be mentioned that traction calculations for industrial open-pit railway transport have been addressed previously [2-11], but the most detailed methodology for traction calculations of industrial open-pit railway transport is provided in Appendix B of the Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits [1, pages 204-220].

The article makes a significant contribution to the development of the contemporary understanding of this issue by addressing certain aspects and proposing new approaches.

Problem Statement. Based on the existing Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits [1], the authors of the article propose an improved methodology for efficient traction calculations of industrial open-pit railway transport using MS Excel. This opens up opportunities for further research, design, and analysis of industrial open-pit railway transport movement.

Teaching Material and Results. We will conduct a detailed analysis, correction, and improvement of the methodology for traction calculations of industrial open-pit railway transport provided in Appendix B of the Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits [1, pages 204-220].

For calculations, we will adopt the same input data as in [1, pages 206-209].

The methodology outlined in [1, pages 204-220] does not include traction calculations in MS Excel for different types of tracks (fixed and movable), meaning that calculations are only possible when the entire track is either fixed or movable. This is a drawback of the methodology.

To conduct traction calculations using MS Excel, [1] provides an example calculation based on the proposed Methodology B. In the example, traction units ОИЭ2 with cast iron brake blocks and 12 dumpcars 2BC-105 - variant 3 with composite brake blocks are used for transporting mined mass (loaded wagons) by railway transport on a fixed track without the use of magnetic rail brakes [1; page 206, table 24; page 213].

Traction calculations using MS Excel in the methodology [1, pages 204-220] are proposed to be performed according to the algorithm. A detailed explanation of this algorithm is absent in the methodology and is provided in this article. It should also be noted that this article addresses only the data that require commentary and the data regarding which errors and inaccuracies have been made.

The algorithm involves conducting traction calculations by determining the train motion parameters through stepwise integration. Each i -th integration step represents an interval of track of a specified length dS_i . In the example, the first and second steps are 5 meters, the third step is 10 meters, and the fourth and fifth steps are 15 meters, with subsequent steps having an interval of 50 meters. (In section B.10.10 of the methodology [1, page 206], it is indicated that the integration interval dS_i should not be less than 50 meters. The authors of this article consider this statement to be incorrect; on the contrary, the integration interval dS_i should be no more than 50 meters.) The parameters for each i -th integration step are calculated in MS Excel rows. The parameters for the zeroth step are located in the 16th row of the MS Excel table; the parameters for the first step are in the 17th row, for the second step in the 18th row, and so on. Thus, the i -th step is located in the MS Excel table in the row with the number $(i+16)$, where the value of i is not less than zero. In our opinion, considering the modern capabilities of computers and to increase the accuracy of calculations, it is advisable to set the track length dS_i equal to 1 meter for each i -th integration step.

It should also be noted that all formulas from the 17th row are then copied to the lower rows using the usual method (for example, by using the Ctrl+C and Ctrl+V commands). The number of integration steps is determined by the total length of the track section for which the train motion traction calculation is performed.

Initially, the corresponding input data is entered into the respective cells. In row 2 of the MS Excel table, the data specified by the methodology [1, pages 206-207], as presented in Table 1, is entered.

Table 1

Input data (values) entered into the 2nd row of the MS Excel table, as specified by the methodology [1, pages 206-207]

Indicator Name	Value	Cell for entry
P - locomotive (ОИЭ2) mass, t [1, page 194, table B.16] <i>Attention, in [1, page 206, table B.24] mistakenly refers to table B.12, not B.16 !</i>	368	B2
Q - mass of wagons, t [1; page 213; page 194, table B.16] <i>Attention !!! In the given example, M_{c.n} = 2470t. 2470t:12 units = 205.83t/wagon From [1, page 222, figure Г.1]: wagon tare weight = 47t.; 205.83t - 47t = 158.83t. Thus, the wagons are overloaded. Each wagon carries not 105t, but 158.83t. To avoid such situations, the authors of this article propose entering the value of the maximum permissible weight of wagons Q_{max} into cell AN2. (See table 2)</i>	2470	C2
V_n - initial velocity on the section, km/h	0	D2
a'_0 - the 1st empirical coefficient of approximation to determine w'_0 - the basic specific resistance of locomotives depending on the speed for the traction mode. For the ОИЭ2 locomotive (Industrial electric locomotive and traction unit with alternating current) [1, p. 181-182, table B.2, formula B.1] <i>Attention !!! In [1, p. 206, table B.24], reference is made incorrectly to table B.20 instead of table B.2.</i>	2,6	E2
b'_0 - the 2nd empirical coefficient ...	0,07	F2
c'_0 - the 3rd empirical coefficient ...	0,0025	G2
a''_0 - the 1st empirical coefficient of approximation to determine w''_0 - the main specific resistance to motion of loaded cars (dumpcars) depending on the speed V . For cars (dumpcars) 2BC105. [1, p. 183, table B.3, formula B.5]. <i>Attention, there is a typographical error in table B.3 [1, p. 183]: it indicates BC105 instead of 2BC105.</i>	3,6	H2

b''_0 - the 2nd empirical coefficient... <i>Attention, in [1, p. 206, table B.24] this row is missing (omitted)!!!</i>	0,04	I2
c''_0 - the 3rd empirical coefficient ...	0,0	J2
a_ψ - the 1st empirical coefficient for determining $\Psi_{R,i}$ (the calculated coefficient of wheel-rail adhesion at the beginning of the i -th integration step). (For the locomotive ОПЭ2 - industrial electric locomotives with alternating current on permanent tracks) [1, p. 191-192, table B.13, formula B.18]	0,21	K2
b_ψ - the 2nd empirical coefficient ...	7	L2
c_ψ - the 3rd empirical coefficient ...	53	M2
d_ψ - the 4th empirical coefficient ...	3	N2
e_ψ - the 5th empirical coefficient ...	0	O2
n_ψ - the 1st empirical coefficient for determining $\Psi_{R,i}$ - the calculated coefficient of wheel-rail adhesion on curved track sections with a radius $R_i < 500$ m, at the beginning of the i -th integration step. (For the locomotive ОПЭ2 - industrial electric locomotives with alternating current on fixed tracks) [1, p. 192, table B.14, formula B.19]	250	P2
m_ψ - the 2nd empirical coefficient ...	1,55	Q2
n_ψ - the 3rd empirical coefficient ...	500	R2
z_ψ - the 4th empirical coefficient ...	1,1	S2
R_z - the limiting value of the radius R , beyond which the reduction of the coefficient of adhesion is no longer considered, m [1; p. 192, table B.14; p. 207, table B.24]	500	T2

In this and subsequent tables, we provide detailed explanations of the algorithm, which is missing in [1, pp. 204-220].

Furthermore, for convenience, in row 2 of the MS Excel table, data not provided by the methodology [1, pp. 204-220] are suggested to be entered (Table 2). For clarity, in cell W1, the text "Additional input data not provided by the methodology [1, pp. 204-220]:" is entered.

Table 2

Input data (values) to be entered in the 2nd row of the MS Excel table, which are not specified in the methodology [1, pp. 178-203]

Indicator Name	Value	Cell for entry
Additional input data:		W2
T_l - locomotive type [1; p. 206, table B.24; p. 213]	ОПЭ2	X2
$T_{ж.л}$ - locomotive power supply type [1, p. 194, table B.16 and p. 217, table B.27]	AC (Alternating Current)	Y2
$N_{о.лок}$ - number of units (sections) composing the locomotive (traction unit and two motorized dumpcars) [1; p. 213; p. 217, table B.27], units	3	Z2
$N_{в.с.лок}$ - number of axles in one section (3 sections) of the ОПЭ2 locomotive (from [1, p. 186, table B.6]; 68800:4300:4 = 4), units	4	AA2
$N_{лок.к.заг}$ - total number of brake pads in one section of the locomotive (ОПЭ2) [1, p. 186, table B.6]	16	AB2
$T_{з.л}$ - type of locomotive brake pads	Cast iron	AC2
$M_{з.в}$ - wagon loading indicator. If the wagons are empty then $M_{з.в} = 1$. If the wagons are loaded $M_{з.в} = 2$.	2	AD2
$T_{ваз}$ - type of wagons (dumpcars). [1, p. 186, table B.6]	2BC105 3rd variant (к)	AE2
$T_{з.в}$ - type of wagon (dumpcar) brake pads.	Composite	AF2
$N_{ваз}$ - number of wagons (dumpcars), units [1; p. 213]	12	AG2
$N_{в.с.ваз}$ - total number of axles in one wagon (dumpcar) [1, p. 186, table B.6], [9]	6	AH2
$N_{в.с.ваз.кр}$ - number of axles on the end of one wagon (dumpcar) [1, p. 186, table B.6], [9]	4	AI2
$N_{в.с.ваз.с}$ - number of axles in the middle of one wagon (dumpcar) [1, p. 186, table B.6], [9]	6	AJ2
$N_{в.к.заг}$ - total number of brake pads in one wagon (dumpcar) [1, p. 186, table B.6], [9]	16	AK2
$N_{в.к.кр}$ - number of brake pads for the end axles of one wagon (dumpcar) [1, p. 186, table B.6], [9]	8	AL2
$N_{в.к.с}$ - number of brake pads for the middle axles of one wagon (dumpcar) [1, p. 186, table B.6], [9]	8	AM2
Q_{max} - maximum weight of wagons, t [1; p. 213; p. 194, table B.16] Dumpcars 2BC105 - variant (к) $(47\text{ t} + 105\text{ t}) \cdot 12\text{ wagons} = 1824\text{ t}$	1824	AN2

Additional input data (Table 2), not covered by the methodology [1, pages 204-220], is recommended to be entered into the MS Excel spreadsheet for both calculations and for monitoring and automatic retrieval of corresponding input data from reference tables, using the VLOOKUP function and the HLOOKUP function.

The authors of this article propose the following: Following the path taken, in column AN, starting from cell AN17, enter the value of $K_{mun.k}$ - the coefficient characterizing the type of track (if it is a fixed track, then $K_{mun.k} = 1$, if it is a movable track, then $K_{mun.k} = 1.3$).

In row 5 of the MS Excel table, data specified in the methodology [1, pages 207-208].

In row 4 of the MS Excel table, the corresponding indicator names are entered (not provided in [1, pp. 204-220]) for clarity, which are listed in row 5. Additionally, for clarity, more detailed explanations can be included in the notes.

In row 8 of the MS Excel table, the data provided by the methodology [1, p. 208].

In row 7 of the MS Excel table, the corresponding names of indicators (for clarity) are entered, which are entered in row 8. Additionally, for clarity, more detailed information can be provided in the notes.

The following values of speeds $V_{m.o.j}$, are entered into cells C10 ... Q10, taken from [1, pp. 217-220, Table B.27]: 0; 5; 10; 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 60; 70; 80; 90.

The corresponding values of traction force $F_{m.o.j}$ (kgf) from the locomotive's traction characteristics are entered into cells C11 ... Q11: 126600; 126600; 126600; 126600; 126600; 99000; 63000; 40500; 27900; 20400; 15900; 10500; 7800; 0; 0.

Values within the range of traction force limitation can be set equal to F_{zp} (total traction force of the locomotive during starting from rest, kgf [1, pp. 180-181, Table B.1; pp. 196, Table B.17]), as they will be calculated during the calculation process.

It should be noted that in the example provided in [1, p. 209, Table B.24], F_{zp} is given as 126600 kgf, but F_{zp} (total traction force of the locomotive during starting from rest, kgf [1, p. 196, Table B.17]) is stated as $F_{zp} = 120000$ kgf. The authors consider the correct value to be given in [1, p. 209, Table B.24], and there is a typographical error in [1, p. 209, Table B.24], and the correct value should be indicated as 120000, not 126600. However, to ensure that the calculation results correspond to those presented in the table shown in [1, p. 215, Fig. B.1], incorrect data should be entered into cells C11 ... Q11, namely: 126600; 126600; 126600; 126600; 126600; 99000; 63000; 40500; 27900; 20400; 15900; 10500; 7800; 0; 0.

Additionally, it should be noted that the traction force of the locomotive on sections limited by coupling $F_{o.z\psi}$ is determined based on the formulas [1, p. 192, Formulas B.20 and B.21]:

for straight track sections

$$F_{o.z\psi i} = 1000 \cdot P \cdot \Psi_{\pi, i}$$

where P - locomotive mass (OE2), t; [1, p. 194, Table B.16], (input data, cell B2); $\Psi_{\pi, i}$ - calculated coefficient of wheel-rail adhesion at the beginning of the i -th integration step. (For locomotive OE2 – industrial AC electric locomotives on standard gauge tracks) [1, pp. 191-192, Table B.13, Formula B.18]

$$\Psi_{\pi, i} = a_{\psi} + (b_{\psi} : (c_{\psi} + d_{\psi} \cdot V_i) - e_{\psi} \cdot V_i),$$

where a_{ψ} , b_{ψ} , c_{ψ} , d_{ψ} , e_{ψ} - empirical approximation coefficients (for locomotive OE2 – industrial AC electric locomotives on standard gauge tracks) [1, pp. 191-192, Table B.13, Formula B.18] (Table 1, cells K2 ... O2); V_i - train speed at the beginning of the i -th integration step, km/h;

for curved track sections

$$F_{o.z\psi i} = 1000 \cdot P \cdot \Psi_{R, i}$$

$\Psi_{R, i}$ - during locomotive movement on the calculated and steepest grades under electric traction on curved track sections with a radius less than 500 m, and under diesel traction - less than 800 m, the adhesion coefficient Ψ_i is reduced to the value $\Psi_{R, i}$, which is determined by the formula

$$\Psi_{R, i} = \Psi_i \cdot (h_{\psi} + m_{\psi} \cdot R_i) : (n_{\psi} + z_{\psi} \cdot R_i)$$

where h_{ψ} , m_{ψ} , n_{ψ} , z_{ψ} - empirical approximation coefficients (for locomotive ОПЭ2 – industrial AC electric locomotives on standard gauge tracks) [1, pp. 191-192, Table B.13, Formula B.18] (see Table 1, cells P2 ... S2); R_i – radius of curvature at the beginning of the i -th integration step, m.

Data provided in Table 7 as specified in [1, p. 209] are entered into cells S10 ... X10 of the MS Excel table.

The direct traction calculation starts from the 17th row. In the 16th row, initial values of "0" are set for cells C16, T16, U16, AG16, AJ16. The formula "=D2" is entered into cell Q16, and the initial design mark in meters is entered into cell AN16. The integration step is set in column B, starting from cell B17 and onwards. Since the speed changes rapidly during the train's acceleration, according to the methodology [1, p. 209], it is recommended to set the integration step at the beginning to 5, 5, 10, 15, 15 (in meters), and then - 50 m. In the authors' opinion, it is recommended to set the integration step

for the first 100 m to 1 m, and then to 2 m, which improves the calculation quality. The formula " $=C16+B17$ " is entered into cell C17 to calculate the traveled distance and then copied down the column C, starting from row 18.

If the length of any profile element is not a multiple of 50 m, then the integration step is recorded in the corresponding cell to be less than 50 m. In columns B and C, the number of rows to be filled is determined by the length of the section. At the end of the section, the integration step value should be "0". In column A, starting from cell A17, the values of the radius "1000" are recorded, which does not reduce the traction. Then, the values of curve radii in meters are recorded in the respective cells of the column according to the section plan. Starting from the 17th row, the straightened longitudinal profile gradients in thousandths are recorded in column D. Negative values are specified for descents. In the 17th row, formulas for calculating auxiliary coefficients (conditional constants) are entered in column E and onwards according to Table [1; pp. 209-212, table B.25].

Conclusions and Future Research Directions. A detailed analysis of the implementation algorithm of traction calculations for industrial quarry railway transport, as outlined in [1, pages 204-220], has been provided for the first time. The analysis revealed deficiencies and errors inherent in the methodology. It has been demonstrated that the sample calculations presented in [1, pages 206-216] were performed incorrectly. Recommendations, corrections, and improvements have been suggested to enhance the algorithm for executing traction calculations for railway transport.

Currently, the website <http://www.kipdiit.dp.ua>, referenced in the Standards for Technological Design of Mining Enterprises with Open Pit Mining of Mineral Deposits [1], is unavailable. According to these standards, this website hosted ready-made Microsoft® Office Excel tables with formulas for performing traction calculations for railway transport.

The algorithm for calculating specific resistance to train movement has been enhanced to enable traction calculations that account for the type of track (fixed, movable) on track sections.

For convenience, data not provided in the methodology of traction calculations [1, pages 204-220] have been proposed to be included in Table MS Excel (Table 2). Explanations not covered in the methodology [1] have also been suggested for clarity.

Incorrectness of the initial data regarding excessive loading of wagons in cell C2 of the MS Excel table [1, page 206] has been identified.

Data on Q_{max} , regarding the maximum weight of all loaded wagons (dumpcars), have been entered into cell A12 of the MS Excel table for comparison with Q , the weight of the train composition (excluding the locomotive), thus preventing excessive loading of wagons (dumpcars).

The absence of a row in [1, page 206, Table V.24] for entering data into cell I2 has been noted.

An error in the initial data has been detected. In [1, page 208, Table B.24], incorrect data were mistakenly entered ($a_{8,8} = 3.18$), whereas according to [1, page 185, Table B.4], $a_{8,8} = 1.406$.

To automate the search and entry of corresponding initial data into cells of the MS Excel table, sourced from reference tables provided in the methodology [1, pages 204-220], the use of the VLOOKUP (Vertical Lookup) and HLOOKUP (Horizontal Lookup) functions has been proposed.

References

1. SOU-N MPP 73.020-078-2:2008 Normy tekhnolohichnoho proektuvannia hirnychodobuvykh pidpriemstv iz vidkrytyh sposobom rozrobky rodovyshch korysnykh kopalin. Chastyna 2. Vidkryti hirnychy roboty. Tom 1. (2008) Ministerstvo promyslovoi polityky Ukrainy.
2. **Renhevyich A.A.** Raskhod karyernoho elektrovoznogo transporta.- Dnipropetrovsk: DHI, 1976. – 30 s.
3. **Akimov, V. I.** Sbornik zadach po tyagovym raskhetam. – Homel: BelIIZhT, 1988. – 31 s.
4. **Renhevyich O.O., Denyshchenko O.V.** Eksploatatsiyni rozrakhunky transportnykh kompleksiv kry'yiriv: Dnipropetrovsk: Natsionalnyi himychnyi universytet, 2005. – 99 s.
5. **Frenkel S. Ya.** Tekhnika tyahovykh raskhetov / S. Ya. Frenkel. – Homel :BelHUT, 2009. – 73 s.
6. Osnovy elektrychnoi tyahy: navch. posibnyk / V. Kh. Daleka, P. M. Pushkov, V. P. Andriichenko, Yu. V. Mineieva; Khark. nats. akad. mis'k. hosp-va. – Kh. : KhNAMH, 2012. – 312s.
7. Tyahovye raskhety dlya uchastka zheleznoi dorogi : ucheb.-metod. posobiye / **P. A. Sakharov**; pod red. **S. Ya. Frenkelya**; M-vo transp. i kommunikatsii Respub. Belarus', Belorus. gos. un-t transp. – Homel : BelHUT, 2016. – 107 s.
8. Transportni systemy i tekhnolohii: Zbiryk naukovykh prats Derzhavnoho universytetu infrastruktury ta tekhnolohii/ Gol. red. **O. M. Horobchenko**. Kyiv: DUIT, 2020. Vyp. 35. – 229 s.
9. **A. O. Sulym , A. M. Strynzha, O. O. Borodai, V. V. Fedorov** .Tekhnichni kharakterystyky ta shliakhy udoskonalennya vahoniv-dumpkariv dlya promyslovoho transportu// "Reikovyi rukhomyi sklad". Zbiryk naukovykh prats DP "UkrNDIV". 2021. Vyp. 23, S. 54-73.
10. Pravila tyahovykh raskhetov dlya poezdnoi raboty promyshlennykh elektrovozov i tyahovykh ahrehatov postoyannoho toka. 2-e izd. Moskva : Promtransniiproekt, 1977. Vyp. 4322. 88 s.
11. Pravila tyahovykh raskhetov dlya poezdnoi raboty promyshlennykh elektrovozov i tyahovykh ahrehatov peremennoho toka. 2-e, izd. Moskva : Promtransniiproekt, 1977. Vyp. 4323. 78 s.

Рукопис подано до редакції 29.03.24

К.М. КОВБИК, асистент
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОТІКАННЯ ПРОЦЕСУ ВИПУСКУ ПРИ ВІДПРАЦЮВАННІ НАСИЧЕНИХ ВОДОЮ РУД У ЛАБОРАТОРНИХ УМОВАХ В ЗАЛЕЖНОСТІ ВІД ЗМІН ФРАКЦІЙНОГО СКЛАДУ

Метою статті. Експериментально визначити рівень втрати при випуску насичених водою руд з моделі, прослідкувати кореляцію показників втрат в залежності від зміни фракційного складу руди. Оскільки в результаті виконаного аналізу літературних джерел встановлено, що деяка частина покладів Криворізького залізорудного басейну знаходиться в складних гідрогеологічних умовах, а також при застосуванні технології гідро руйнування постає питання випуску руди в умовах обводнення родовища. Розгляд можливості покращення показників випуску в таких умовах - є актуальним питанням.

Методи досліджень. Фізичне моделювання випуску руди в лабораторних умовах. Врахування при досліді показників насичення руди водою (обводнення) та зміна фракційного складу застосованого матеріалу.

Наукова новизна. Експерименти показали що в результаті випуску насиченою водою руди збільшуються втрати руди в залежності від її насичення 5%, 5,5%, 6%, 7%, і можливість стабільного випуску ускладнюється, і випуск руди при її насиченні в 9% для лабораторних умов є неможливим. Встановлені закономірності випуску насичених водою руд, а також можливості покращення показників випуску в таких умовах в залежності від змін фракційного складу рудної маси.

Практична значимість. Удосконалено методику випуску насичених водою руд в лабораторних умовах. Створення методики розрахунку рівня втрат при розробці покладів обводнених багатих залізних руд, дає можливість застосування ресурсозберігаючих технологій гідро руйнування як альтернативу класичному буро вибуховому методу руйнування масиву гірських порід, або прогнозування рівня втрат при раптовому потраплянню води очисний простір.

Результати. Виконано досліді по випуску обводненої рудної маси, визначений рівень втрат при випуску руди з поодиноким отвором. Проведено досліді зі зміною фракційного складу і впливом на втрати корисної копалини.

Ключові слова: випуск руди, обводнені родовища, гідровиймання, гідроруйнування, випуск руди, обводнені руди, насиченість руд, методика випуску, шахтна вода, підземна розробка.

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-158-164

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями Моделювання процесу випуску насиченої водою рудної маси дає змогу візуально та практично удосконалити процес випуску руди та розробити рекомендації що до відпрацювання покладів. Великий внесок в вивчення процесу випуску і явищ зробив Малахов Г.М. [1]. Виконавши велику кількість дослідів на різноманітних моделях з матеріалами які мають різні сипучі властивості з метою моделювання реальних умов підземних підприємств. З часом процес моделювання випуску вдосконалювався та включаючи більше перемінних для підвищення точності дослідів [2, 3].

Випуск насиченої водою руди підземних підприємств Кривого Рогу ускладнений процесу процес [4], що в свою чергу знижає продуктивність вибою та безпеку ведення праці, спричиняючи значний негативний економічний ефект [4, 5].

Для підвищення ефективності і стабілізації процесу випуску обводненої рудної маси необхідно впроваджувати ряд додаткових процесів:

встановлення додаткових вентиляційних установок в шахті, для належного рівня вентиляції і зниженню показника вологості повітря;

використання додаткового дренажу, або монтаж нових дренажних установок для контролю рівня води на підземному виробництві;

даткові витрати на моніторинг рівня і хімічного складу підземних вод;

впровадження додаткових заходів безпеки для працівників в таких умовах.

Випуск обводненої рудної маси в підземних умовах це – складний технологічний процес, з необхідністю використання спеціальних підготовчих етапів, та адаптованих технологічних рішень [5].

Отже, вивчення процесу випуску насиченою водою рудної маси, має на собі мету, визначення рівня втрат, а також дати можливість удосконалити системи та оптимізувати їх для ефек-

тивного використання в умовах обводнення родовищ. Дане питання є – актуальним для умов Криворізького залізорудного басейну.

Аналіз досліджень і публікацій Криворізький залізорудний басейн є складно структурним, зі значними змінами геомеханічних, та фізико-хімічних властивостей по всій довжині покладу. Кривий Ріг вносить значний вклад в розвиток країни так як в ньому зосередженні видобувні та переробні підприємства [5,6]. При розробці покладів багатих залізних руд підземним способом робочі горизонти шахти перетинають водоносні горизонти, що при своєчасному дренажуванні не викликає проблем. В процесі розробки виникають ситуації коли вода раптово потрапляє в робочий простір, з поверхні або система дренажу не працює належним чином [5, 7]. Стабільний розвиток гірничо-видобувної галузі залежить від можливості підприємств відпрацьовувати подібні поклади [6] та ефективно вести очисні роботи в складних гірничо-геологічних і гідрогеологічних умовах, для досягнення максимального економічного ефекту [5-7]. Тому питання відпрацювання обводнених покладів та розвиток систем розробки в таких умовах є – актуальним.

Постановка задачі. Експериментально визначити рівень втрати при випуску насичених водою руд з моделі, прослідкувати кореляцію показників втрат в залежності від зміни фракційного складу руди.

Викладення матеріалу та результати. Досліди виконувались на моделі через одну випускную воронку рис.1, імітуючи умови камерної системи розробки, без засмічення руди налягаючими пустими породами. Відповідно до масштабу використовувалась гематит-мартитова руди відповідної фракції. Змінним параметром є насичення руди водою, а також відсоткове відношення фракційного складу.

Пропонована модель яка зображена на рис. 1 являє собою конструкцію з дерев'яними стінками та прозорим склом з координатною сіткою розмірами 5×5 см. Випускний отвір має радіус 1,7 см. Макет виконаний в масштабі 1:100.

Для дослідів було обрано фракції: 7 -5 мм; 5- 3 мм; 3 -2 мм; 2-1мм (табл. 1).

Таблиця 1

Гранулометричний склад сухого 5% рудного матеріалу I (контрольний дослід)

Фракція. (мм)	7-5	5-3	3-2	2-1	Σ
Вага. (г)	2970	4700	425	425	8520
Відсоток (%)	34,86	55,16	4,99	4,99	100

Висота моделі 40 см що відповідає 40 м згідно масштабу моделювання. Було визначено що для засипання моделі на вказану висоту слід використати 8520 г, сухої (5%) просіяної руди. Для імітації обводнення руда рівномірно змочувалась створюючи ефект її насичення водою.

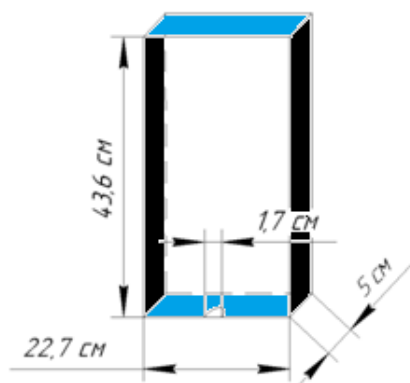


Рис. 1 Схематичне зображення моделі для випуску руди

Насичення рудною маси водою, це сформоване поняття, яке характеризує співвідношення маси вологої руди до її повністю сухої аналогу розділеного на масу сухої руди та помножену на сто. Отриманий результат буде відображатися у відсотках та має вигляд формули 1.

$$H_p = \frac{M_b - M_c}{M_c} \times 100, \quad (1)$$

де H_p – відсоток насичення руди водою (вологість); M_c – маса сухої руди; M_b – маса мокрої руди

В подальшому руда насичувалась водою поки на вагах не було зафіксована розрахована маса. Збільшення насичення водою на 1% має наступний вигляд

$$M_b = 8520 \frac{1}{100} + 8520 = 8610 \text{ (г)}$$

Необхідно змочувати руду доки на вагах не буде досягнута відмітка в 8610 ваги мають похибку ± 5 г (рис.2).



Рис. 2 Насичена на 1% руда на вагах



Рис. 3 Завантажений макет насиченою водою руди 6%

За такою методикою здійснювався випуск рудної масив. Дані по першій серії дослідів занесені до табл. 2.

Таблиця 2

Зведені результати першої серії дослідів

Насичення водою %	Висота утворення гребнів (середнє значення)	Кут руху руди (град)	Втрати %
5	16.8	65	18,57
5.5	17.5	68	23,7
6	19.8	70	26,3
7	22.6	74-73	31,3

Методика буде вдосконалюватися за для досягнення найбільшої відповідності результатів до реальних умов.

Наступний етап полягає в зміні гранулометричного складу руди. Має на меті ціль – дослідження впливу якості подрібнення в умовах обводнення родовища. Пропонується наступна зміна гранулометричного складу (табл. 3).

Таблиця 3

Змінений гранулометричний склад сухого рудного матеріалу

II					
Фракція. (мм)	7-5	5-3	3-2	2-1	Σ
Вага. (г)	2885	4785	425	425	8520
Відсоток (%)	33,86	56,16	4,99	4,99	100
III					
Фракція. (мм)	7-5	5-3	3-2	2-1	Σ
Вага. (г)	2800	4870	425	425	8520
Відсоток (%)	32,86	57,16	4,99	4,99	100
IV					
Фракція. (мм)	7-5	5-3	3-2	2-1	Σ
Вага. (г)	2714	4955	425	425	8520
Відсоток (%)	31,86	58,16	4,99	4,99	100
V					
Фракція. (мм)	7-5	5-3	3-2	2-1	Σ
Вага. (г)	2629	5040	425	425	8520
Відсоток (%)	30,86	59,16	4,99	4,99	100
VI					
Фракція. (мм)	7-5	5-3	3-2	2-1	Σ
Вага. (г)	2544	5126	425	425	8520
Відсоток (%)	29,86	60,16	4,99	4,99	100

Була змінений відсоткове відношення фракції 7-5мм до 5-3мм, як імітування підвищення якості подрібнення та зменшення виходу негабариту. Випуск виконувався в вище зазначеній послідовності, тобто суха рудна маса знову змочувалась моделюючи процес насичення її водою, і випускалась.

На основі виконаних дослідів є можливість вивести закономірності і графіки залежностей, процесів які перебігають під час випуску обводненої рудної маси.

Основні величини і показники по яким виводяться графіки залежностей занесені до табл. 4.

Таблиця 4

Зведені результати дослідів

Перша серія дослідів (контрольна). Відсоток вмісту фракції 5-3мм - 55.16%			
Насичення водою %	Висота утворення гребнів (середнє значення)	Кут руху руди (град)	Втрати %
5	16.8	65	18,57
5.5	17.5	68	23,7
6	19.8	70	26,3
7	22.6	74-73	31,3
Друга серія дослідів. Відсоток вмісту фракції 5-3мм - 56.16%			
Насичення водою %	Висота утворення гребнів (середнє значення)	Кут руху руди (град)	Втрати %
5	16.8	65	18,57
5.5	17.3	67	23,3
6	19.3	69	25,2
7	22	73-74	30,4
Третя серія дослідів. Відсоток вмісту фракції 5-3мм - 57.16%			
Насичення водою %	Висота утворення гребнів (середнє значення)	Кут руху руди (град)	Втрати %
5	16.8	65	18,57
5.5	17,2	67	22,74
6	19.1	68-69	24,78
7	21,7	72	29,73
Четверта серія дослідів. Відсоток вмісту фракції 5-3мм - 58.16%			
Насичення водою %	Висота утворення гребнів (середнє значення)	Кут руху руди (град)	Втрати %
5	16.8	65	18,57
5.5	17,1	67	22,25
6	18,9	68	24,35
7	21,5	71	29,18
П'ята серія дослідів. Відсоток вмісту фракції 5-3мм - 59.16%			
Насичення водою %	Висота утворення гребнів (середнє значення)	Кут руху руди (град)	Втрати %
5	16.8	65	18,57
5.5	17	66-67	21,78
6	18,7	68	23,75
7	21,3	70	28,79
Шоста серія дослідів. Відсоток вмісту фракції 5-3мм - 60.16%			
Насичення водою %	Висота утворення гребнів (середнє значення)	Кут руху руди (град)	Втрати %
5	16.8	65	18,57
5.5	17	66-67	21,48
6	18,5	68	23,47
7	21	70	28,54

Завдяки налипанню м'яких часток руда втрачає свої текучі властивості. Процес злежування проходить набагато швидше оскільки руда втрачає власну об'ємну вагу, і набирає вологи у разі змішування її з водою, та набирає збільшує свій об'єм. Це дає змогу спрогнозувати збільшення об'єму відбитої руди в камері під час процесу відвійки, якщо гірничо-технологічні умови вимушують вести відбірку та випуск обводненого масиву. Відсоток насичення руди водою можливо розрахувати формулою 1. Для цього необхідно зволожений рудний кусок зважити, а далі просушити його – це дасть змогу спрогнозувати орієнтовні втрати від насичення руди водою, та скорегувати показники вилучення руди із блоку. Також в даному випадку зміна фракційного складу позитивно впливає на процес випуску обводненої рудної маси, втрати в такому випадку зменшились у порівнянні з початковими експериментом (7%) з 31,3% до 28,54% . Графік втрат руди під час випуску зображений на рис. 4

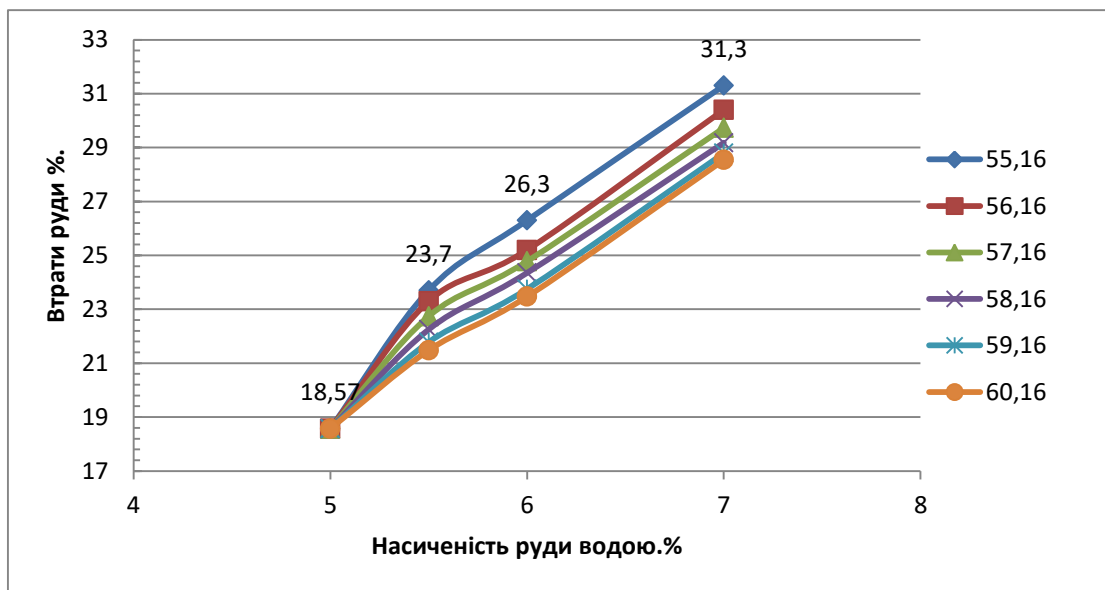


Рис 4. Графік залежності втрат руди при випуску від насичення руди водою та зміни основного фракційного складу 7-5мм та 5-3мм

Як видно із графіку, насиченість водою має суттєвий негативний наслідок на кількість вилученої рудної маси. Це пов'язано із тим що від обводнення руда змінює свої текучу властивості і кути випуску. Це приводить до утворення «мертвих» зон навколо випускного отвору які характеризуються висотою гребнів Встановлена залежність втрат від насичення руди водою.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Набула подальшого розвитку теорію випуску руди, а саме випуск насиченої водою (обводненої) руди, вплив на показники вилучення і основні параметри випуску.

Вперше встановлена залежність вилучення руди з поодинокого отвору від насичення руди водою.

Визначений вплив фракційного складу на процес та параметри випуску руди в умовах її насичення водою,.

Уперше доказано в лабораторних умовах що можливо покращити процес випуску обводненої рудної маси за рахунок покращення якості подрібнення, або зміни фракційного складу в блоці.

В майбутньому планується розробити рекомендації для випуску обводненої рудної маси.

Список літератури

1. Малахов Г. М. (1971) *Особенности разработки рудных месторождений на больших глубинах и пути повышения эффективности разработки руд Кривбасса*, Сб. «Пути повышения эффективности подземной добычи руды в Криворожском бассейне», Кривой Рог, КГРИ. – с. 5-41.
2. Колосов, В.О., Маланчук, З.Р., Письменний, С.В., Ковбик, К.М. (2018) *Моделирование физических процессов горючего массива в лабораторных условиях на статических моделях* Гірничий вісник: науково-технічний збірник. Кривий Ріг. Вип. 104. – с. 55–62.
3. Тарасюгін, В.М., Косенко, А.В. (2017) *Фізичне моделювання технологічного процесу випуску руди для умов глибоких горизонтів шахт Кривбасу*. Розвиток промисловості та суспільства: матеріали міжнародної науково-технічної конференції. Кривий Ріг. КНУ, 2017. с. 67.
4. Ковбик, К.М., Калініченко, В.О. (2023) *Методика моделювання випуску насичених водою багатих залізних руд в умовах криворізького залізрудного басейну*. Гірничий вісник, вип. 111. с. 18-22.
5. Ступник, Н.И., Кудрявцев, М.И., Басов А.М. (2010). *Пути совершенствования технологи подземной разработки богатых руд Кривбасса*. Вісник Криворізького технічного університету. – с. 23-26.
6. Тарасюгін, В.М., Косенко, А.В. (2018) *Обгрунтування ресурсозберігаючих технологічних процесів при підземному видобутку різносортих залізних руд Кривбасу*. Вісник КНУ. Вип. 46. с. 152–159. (Index Copernicus, Research Bible)
7. Калініченко, В.О., Косенко, А.В., Хівренко, О.Я. (2017) *Дослідження показників вилучення руди на основі фізичного моделювання її випуску для умов глибоких горизонтів шахт Кривбасу*. Качество минерального сырья. Т.1. с. 143–155.

Рукопис подано до редакції 29.03.24

V. TEMCHENKO, Postgraduate Student
Dnipro University of Technology

EFFECT OF CHANGING THE SHAPE OF THE RAREFACTION CHAMBER OF A DEVICE FOR REMOVING WATER FROM THE ROPE SURFACE ON AIR FLOW PARAMETERS: A TECHNICAL NOTE

Abstract. The study of the interaction of air flow with a water film is an under-researched topic, and therefore this study is relevant for the academic community. The analysis and modelling results complement existing knowledge and expand the understanding of processes in this area. The purpose of this study was to compare the parameters of the air flow generated in the device for removing water from the surface of the mine hoist rope when changing the shape of the rarefaction chamber, which can increase the efficiency of the device. In the study, a computer experiment was performed to create models of the rarefaction chamber of the device for removing water from the rope surface with different shapes of the device surface. The experiment itself was conducted in SolidWorks Flow Simulation software. The study found that changing the shape of the rarefaction chamber substantially affects the air flow parameters in the device for removing water from the rope surface. At a ratio of $D/D1=1.6...2.5$, flow stability and effective water removal along the entire length of the rope were observed. Specifically, it was found that the value $D/D1=1.6$ is particularly optimal, as this pressure is as close as possible to the intensity of water removal, ensuring an even flow distribution and minimal energy consumption. This allows the device to operate at high efficiency, reducing the risk of uneven water removal and increasing the reliability of the lift. The resulting uneven air flow has a negative impact on the integrity of the water film on the rope surface and, as a result, on the removal of water from the surface of the mine hoist rope. The study of this problem allows expanding the understanding of the effect of air flow on the water film on the rope surface and contributes to the development of more efficient water removal devices, which is the practical value of this study.

Keywords: water film; mine hoisting unit; intensity of water removal; efficiency

doi: 10.31721/2306-5435-2024-1-112-164-168

Introduction. The study of the design of devices for removing water from the surface of the rope is an important and relevant problem since a series of technical and operational problems constantly arise during the operation of a mine hoisting unit due to the influence of external and internal factors. One of these problems is the increase in air humidity in the mine, which is caused by the influence of precipitation on the surface and groundwater in the mine. Increased humidity leads to the formation of condensation, which settles on various surfaces in the mine, including the surfaces of mine hoists. Condensation on the surface of the ropes in a shaft hoist is particularly dangerous, as moisture from the shaft gets onto the brake pulleys and other essential elements of the hoist. This can lead to corrosion of metal parts, impaired brake pulley adhesion, and a reduction in the overall efficiency and safety of the hoist. As a result, there is a risk of frequent malfunctions and emergency shutdowns, which negatively affects the mine's profitability and the feasibility of its operation in general. Considering that a mine hoist is an essential and indispensable element of a mine's technological process, it is imperative to ensure its uninterrupted and efficient operation.

The principle of operation of the device is based on the interaction of air flow with a film of water on the rope. The water carried out of the rope is in the form of microscopic water droplets, which are transported by the air flow in the rarefaction chamber to the outlet nozzles. R. Peeters *et al.* (2021) covered the topic of the interaction between air flow and water film. Specifically, the paper discussed the production of water from air, and of particular interest was the Water from Air technology, which includes three phase transitions of water, including the condensation process, as water vapour interacts with the air flow, but unlike the device for removing water from the surface of a rope, the task here is to absorb water from the air rather than remove it from a particular object.

There is no method for simulating the interaction between air flow and a water film, and therefore it is necessary to resort to simplifications and replace them with corresponding mathematical models. SolidWorks Flow Simulation uses the finite volume method, which depends on the correct choice of mesh accuracy in the finite volume. J. Tan (2019), investigating the finite volume upwind method for solving convection and diffusion equations with the Dirichlet boundary on a rectangular grid, provided a detailed mathematical analysis of this issue. Furthermore, S. Salmat *et al.* (2023) investigated the

accuracy of grid use on the example of centrifugal fans. The findings of these studies were used to determine the optimum simulation parameters.

The operating mode of the device for removing water from the rope surface is under the condition of laminar air flow, and therefore the values at which laminar flow turns into turbulent flow are a significant component of this study. Thus, N. Agarwal & G. Bhutani (2021) investigated and analysed the use of adaptive and fixed meshes for two models, and then determined the most effective mesh parameters for turbulent flow modelling. Furthermore, the researchers paid special attention to alternative computing methods.

The purpose of this study was to determine the best air flow parameters and its effect on the intensity of water removal from the rope surface when changing the shape of the rarefaction chamber.

Materials and methods. Various technological solutions are used to reduce the impact of air humidity, one of which is a device for removing water from the surface of mine hoist ropes. This device is designed to remove water from the surface of ropes using the energy of rarefied air, which eliminates the need for rope centring and facilitates the maintenance of the device.

The principle of operation of the device is to remove the water film from the rope surface using compressed air in the rarefaction chamber. The rarefaction chamber is created by a fan unit that removes air from the system. A pipeline connects the rarefaction chamber and the fan unit, to which water separators are connected. The device diagram is presented in Figure 1.

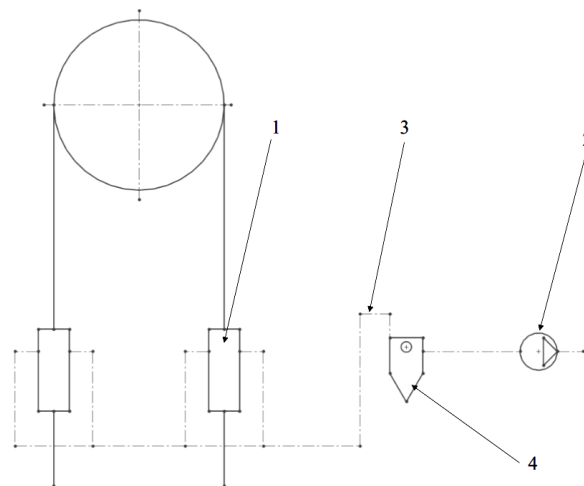


Fig. 1. Diagram of the device for removing water from the rope surface Source: developed by the author of this study

In existing devices, design imperfections were identified due to the instability of air flow during operation. This results in zones with values that are considerably higher or lower than the fan dispersion value. Several ways to improve the design have been proposed to address this problem (Zinoviev & Zinovieva, 2010):

1. Changing the shape of the rarefaction chamber. Using a computer parametric study, it is possible to find the optimum chamber model wherein the air flow is stable and the fan dispersion at all points of the rope is minimal. This will ensure an even distribution of air flow along the entire length of the rope, which will contribute to the effective removal of moisture.

2. Changing the equipment parameters. Replacing the fan unit with a more powerful one can improve the uniformity of air flow. However, this leads to an increase in energy consumption, which is not always economically feasible (Temchenko, 2024).

The first option, albeit requiring a rarefaction chamber with a complex surface, is better in terms of energy consumption. Improving the efficiency of the structure can significantly increase the reliability of the mine hoist and prevent frequent breakdowns. This is the most promising way to improve the design, unlike the second, where improving the device's parameters involves replacing the fan with a more powerful one. It is advisable to find the required design using parametric design systems, which allow exploring variable design parameters such as nozzle or rarefaction chamber diameters, different pressure and volume flow rates. These systems include SolidWorks with the Flow Simulation software package. Among the analogues of this package is ANSYS, which has high accuracy in calculations. However, considering all the advantages of this product, SolidWorks Flow Simulation is more

suitable for performing design research and optimisation tasks, and therefore this tool was used in the present study (Biletskyi, 2021). The experiment was based on an existing device that was used at the Kozacha mine, with known technical characteristics (Zinoviev, 2004). Two models were built based on this device: one with a straight inclined surface and the other with a parabolic surface.

Results. The experiment involves finding the relationship between the shape of the rarefaction chamber and the required airflow parameters. For this, the diameters of the end and central part of the model with a parabolic surface (Fig. 2) were changed. The surface shape is defined by a regular parabola and is bounded by the rim of the central $y = ax^2 + b$ part of the chamber and its end.

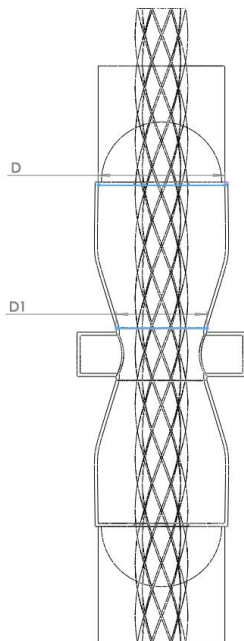


Fig. 2. Model of a rarefaction chamber with a parabolic shape Source: developed by the author of this study

A chamber with a straight inclined surface was considered as a special case of a chamber with a parabolic surface. Since the parabola is bounded by the end and the rim, changing their parameters changes the parabola itself. The internal diameters of the end face and rim were taken as parametric changes. The simulation (Fig. 3) is intended to approximate the real operating conditions of the device, and therefore a model of the dome was built to help simulate the environment. The initial parameter “ambient pressure” was applied to its surface. Furthermore, an external volume per flow rate tool was applied to the outlet plugs, which was 0.23 m³/s. The selection of the grid accuracy involves considering the specifics of the model and the method of grid construction and calculation. Thus, the finite volume method has difficulties in constructing a finite volume mesh in places bounded on both sides by curved surfaces. For this model, a particularly problematic area is the central part, which is bounded by a parabolic surface and a rope. The grid in this experiment was built automatically, without any changes, and its accuracy level was 4. This accuracy allows the mesh to adapt to the curved surface of the device (Barth *et al.*, 2017).

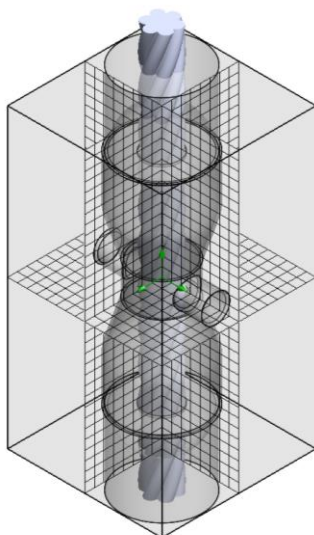


Fig. 3. Computational model of the rarefaction chamber Source: developed by the author of this study

Rope surface water removal devices are characterised by the intensity of water removal from the rope surface

$$In = \frac{8\sqrt{2}\pi^3 B C_p}{3\sqrt{3}} \Lambda d_r \sqrt{\Delta p^*}, \quad (1)$$

where Λ – the effective length of interaction of the air flow with the water film on the rope surface; B – the coefficient characterising the operation of the rope dewatering equipment; C_p – the coefficient of the rope perimeter; ρ – the density of the water film on the rope surface; Δp^* – the fan depression value, which is equal to the difference between the ambient pressure and the pressure at the inlet to the chuck formed by the fan and is equal to $\Delta p = P_{AT} - P_a$; d_r – the rope diameter.

Since this value depends on the geometric shape of the device and the square root of the fan dispersion, the required shape can be searched using the dispersion value, which for the Kozacha mine is 5,000 Pa. This means that the values should be as close to 95,000 Pa as possible, but not exceed it, otherwise water removal cannot take place due to the lack of rarefaction.

The effect of changing the shape of the rarefaction chamber on the air flow was sufficient and meets the necessary requirements for removing water from the rope surface. Specifically, it was found that with a ratio $D/D1=1.6...2.5$, the value of water removal from the rope surface will be approximately the same at any point of the rope. The bar chart (Fig. 4) shows the pressure drop as the shape approaches the cylindrical shape. In this case, the flow is stable, although the air flow is laminar. How-

ever, the disorderly movement creates rarefaction areas, which can lead to a decrease in the efficiency of the device.

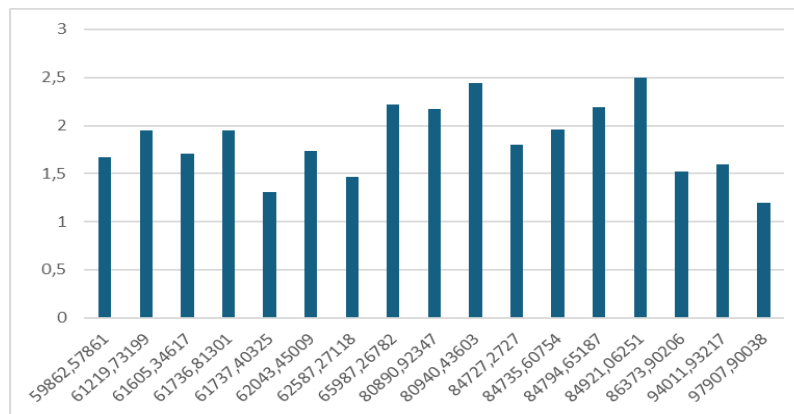


Fig. 4. Histogram of the chamber pressure versus the ratio of its diameters

Source: developed by the author of this study

Re: При макетуванні необхідно замінити кому в дробових числах зліва від діаграми на крапку (згідно правил англ. мови). Крім того, всі числа, що знизу, повинні бути прописані наступним чином: 59,862.57861; 61,219.73199 і так далі. Тобто ціле число повинно бути розділене комою через кожні три символи, починаючи з правої сторони. Коми знову замінюються на крапки

As mentioned above, the change in shape affects the flow stability and the fan dispersion value along the entire length of the rope. Approximation of the parabolic shape to a more spherical shape stabilises the flow, and therefore that the intensity of water removal from the rope surface along its entire length stays approximately the same. Thus, at $D/D1=1.6$ (Fig. 5), the rope pressure value is as close as possible to the value of the intensity of water removal from its surface, while the air flow moves steadily.

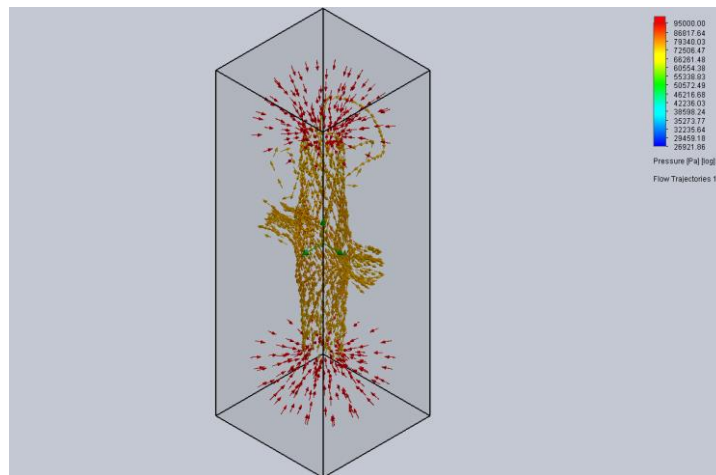


Fig. 5. Air flow trajectory. **Source:** developed by the author of this study

Notably, the most favourable conditions are observed at values from $D/D1=1.6...2.5$, but only with the optimum shape of the chamber itself and with sufficient distance of the nozzles to the rope. Their proximity to the rope causes a pressure drop on the graph and goes beyond the optimum design of the device for removing water from the rope surface, even with optimum $D/D1$ ratios.

Discussion. There is almost no research on removing water from the rope surface. The only researcher in this area was S. Zinoviev (2004), who developed a device for removing water from the rope surface and the methodology for its construction. It was he who proposed a formula for removing water from the surface of the rope. Considering this, the proposed change in the shape of the rarefaction chamber does not affect its operation parameters, while stabilising the air flow.

The principle of operation of the device is based on the interaction of air flow with a film of water. Y. Liu *et al.* (2017) investigated the effect of airflow on water droplets on an aircraft wing, which allowed them to extrapolate to a device for removing water from the surface of a rope and select the correct parameters for simulation. This study is close to the present one and describes the behaviour of

the air flow. Even though the presented study employed a computer experiment to simplify the process of water film rupture and its removal by air flow, the parameters of this process coincide with the findings from the practical experiment.

F. Touron *et al.* (2015) investigated horizontal straightforward layer-by-layer two-phase flow in a channel with a rectangular cross-section, using the Reynolds number as parameters. Considering this, in some cases the results of the research do not coincide with the stated ones. Considering the behaviour of the water film at certain parameters of this study, as well as the fact that the device for removing water from the rope surface operates at Weber number parameters greater than 3 but less than 10, it can be assumed that the inaccuracies are conditioned by the parameters falling outside this range.

F. Piscaglia *et al.* (2013) evaluated the SGS models for modelling internal combustion engines. Although the principle of operation of the engines is fundamentally different compared to the water removal device, the behaviour of the topological grid of finite volumes is analogous to that in the present study.

Thus, research related to the removal of water from the rope surface is extremely limited. However, the conducted analysis suggests that the parameters of the device can change depending on the conditions, such as the Weber number. Comparison with other studies, specifically, studies of two-phase flow and topological mesh modelling, indicates the possibility of inaccuracies due to parameters going beyond certain limits.

Conclusions. The experiment showed that changing the shape of the rarefaction chamber affects the air flow. At a ratio $D/D1=1.6...2.5$, the value of water removal from the rope surface stays stable at any point of the rope. At a value $D/D1=1.6$, the pressure is as close as possible to the intensity of water removal from the rope surface. Thus, the findings of this study showed that optimising the shape of the rarefaction chamber is the most promising way to increase the efficiency of water removal from the surface of mine hoisting ropes. This ensures a stable air flow and minimal energy consumption, which contributes to the reliability and safety of the lifting system. Notably, this study had to simplify the process of water film breaking and consider this as the movement of air flow with an increased humidity parameter, which can affect the accuracy of the results. The prospects for further research on this subject are to conduct experiments with real objects and to theoretically substantiate the processes that occur in the system. The interaction of fluid flows and the water film is particularly noteworthy, as this topic is understudied.

References

1. Agarwal, N., & Bhutani, G. (2021). Computational modelling of turbulent flows using an adaptive mesh finite element method: A benchmarking study. In S.K. Saha & M. Mukherjee (Eds.), *Recent advances in computational mechanics and simulations* (pp. 307-322). Singapore: Springer. doi: 10.1007/978-981-15-8315-5_27.
2. Barth, T., Herbin, R., & Ohlberger, M. (2017). Finite volume methods: Foundation and analysis. In *Encyclopedia of computational mechanics*. New York: John Wiley & Sons. doi: 10.1002/9781119176817.ecm2010.
3. Biletskyi, V.S. (2021). *Modelling in oil and gas engineering*. Kharkiv, Lviv: New World – 2000.
4. Liu, Y., Chen, W.-L., Bond, L.J., & Hu, H. (2017). An experimental study on the characteristics of wind-driven surface water film flows by using a multi-transducer ultrasonic pulse-echo technique. *Physics of Fluids*, 29(1), article number 012102. doi: 10.1063/1.4973398.
5. Peeters, R., Vanderschaeghe, H., Rongé, J., & Martens, J.A. (2021). Fresh water production from atmospheric air: Technology and innovation outlook. *iScience*, 24(11), article number 103266. doi: 10.1016/j.isci.2021.103266.
6. Piscaglia, F., Montorfano, A., & Onorati, A. (2013). Towards the LES simulation of IC engines with parallel topologically changing meshes. *SAE International Journal of Engines*, 6(2), 926-940. doi: 10.4271/2013-01-1096.
7. Salmat, S., Sari, D.Y., Fernanda, Y., & Prasetya, F. (2023). SolidWorks Flow Simulation: Selecting the optimal mesh for conducting CFD analysis on a centrifugal fan. *Journal of Engineering Researcher and Lecturer*, 2(3), 94-103. doi: 10.58712/jerel.v2i3.104.
8. Tan, J. (2019). An upwind finite volume method for convection-diffusion equations on rectangular mesh. *Chaos, Solitons & Fractals*, 118, 159-165. doi: 10.1016/j.chaos.2018.09.011.
9. Temchenko, V. (2024). *Device for removing water from ropes*. In *The 64th international scientific and practical conference "Science and Education"* (pp. 86-88). Ottawa: Pegas Publishing.
10. Touron, F., Labraga, L., Keirsbulck, L., & Bratec, H. (2015). Measurements of liquid film thickness of a wide horizontal co-current stratified air-water flow. *Thermal Science*, 19(2), 521-530. doi: 10.2298/TSCI120602212T.
11. Zinoviev, S. (2004). *Substantiation of the parameters of equipment for dewatering ropes of mine hoisting units*. (Doctoral dissertation, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine).
12. Zinoviev, S., & Zinovieva, Ya. (2010). *Modeling of three-dimensional non-axisymmetric flows in the chambers of devices for dewatering ropes*. In *9th international scientific and technical student conference*. Donetsk: Donetsk National Technical University.

Рукопис подано до редакції 29.03.24

АНОТАЦІЇ

УДК [624.046.5:622.012]:536.75

Андрєєв Б.М., Бровко Д.В., Хворост В.В., Кононенко В.В., Козарієв В.Я., Гапоненко К.А., В.Д. Бровко Розробка моделі моніторингу технічного стану будівель та споруд поверхневого комплексу гірничодобувних підприємств на основі ланцюга Маркова

Мета. Підвищення експлуатаційної надійності та безпеки об'єктів гірничорудної промисловості, шляхом удосконалення наявної та розроблення нових методик визначення залишкового ресурсу. Це можливо досягти шляхом аналізу причин виникнення найпоширеніших видів типових дефектів будівель і споруд гірничорудної промисловості та на основі отриманих результатів провести оцінку залишкового ресурсу використовуючи ймовірнісні методи, які базуються на ланцюгах Маркова.

Методи. Використання загальнонаукових методів дослідження: статистичних, теорії ймовірностей, теорії інформації, теорії ланцюгів Маркова, формалізації, аналізу (зокрема ретроспективного) - під час побудови рішення на рівні окремих конструктивних елементів; основних принципів організації систем і системного аналізу - під час побудови моделі діагностування.

Наукова новизна. Розроблена методика, яка базується на використанні ланцюгів Маркова, дозволяє не лише ретельно аналізувати історію дефектів та їх взаємозв'язки, але й враховувати ймовірність виникнення нових дефектів в конструктивних елементах на основі попередніх даних, що в свою чергу надає можливість управління технічним станом будівельних конструкцій.

Практична значимість. Запропонована методика аналізу та оцінки залишкового ресурсу, заснована на ланцюгах Маркова, відображає глибоке розуміння складних процесів, що відбуваються у будівлях та спорудах гірничорудної галузі. Вона не лише дозволяє покращити ефективність обстеження та діагностики об'єктів, але й спрощує цей процес, знижуючи трудові затрати та вартість робіт. Це може призвести до збільшення швидкості і точності прийняття рішень щодо технічного обслуговування та ремонту, а також зменшити ризик аварійних ситуацій.

Результати. Запропоновано нову методику визначення залишкового ресурсу та категорії технічного стану будівель та споруд на основі використання ланцюгів Маркова. Сформульовано пропозиції щодо систематизації взаємозв'язку підсистем, їх технічного стану та відносної надійності об'єкту в цілому.

Ключові слова: об'єкти поверхні шахт, надійність, цепі Маркова, системи елементів конструкції, залишковий ресурс, категорії технічного стану

Andreev B.M., Brovko D.V., Khvorost V.V., Kononenko V.V., Kozariev V.Ya., Haponenko K.A., Brovko V.D. Development of a Markov chain-based model for monitoring the technical state of buildings and structures of the surface complex of mining enterprises

Purpose. To improve the operational reliability and safety of mining facilities by updating the existing methods and developing new ones for determining the residual life; to analyse the causes of the most typical defects in mining buildings and structures and, based on the results, to estimate the residual life using probabilistic methods based on Markov chains.

Research methods. General scientific research methods were used: statistical, probability theory, information theory, Markov chain theory, formalisation, analysis (including retrospective) - during solution development at the level of individual structural elements; basic principles of system organisation and system analysis - during the construction of a diagnostic model.

Results. A new method of determining the residual life and the categories of technical state of buildings and structures based on a Markov chain is proposed. Recommendations for systematising the interconnection of subsystems, their technical state and relative reliability of the facility as a whole are formulated.

Scientific novelty. Scientific novelty. The developed methodology, based on Markov chains, allows not only to thoroughly analyze the history of defects and their interrelationships, but also to take into account the probability of new defects in structural elements based on previous data, which in turn makes it possible to manage the technical condition of building structures.

Practical significance. The proposed methodology for analysing and assessing the residual life based on Markov chains reflects in-depth perceptions of the complex processes occurring in buildings and structures of the mining industry. The Markov chain-based methodology both increases the efficiency of inspection and diagnostics of facilities and simplifies this process, reducing labour costs and workload. As a result, it improves the speed and accuracy of maintenance and repair decisions, thereby reducing the risk of accidents.

Keywords: surface structures of mines, reliability, Markov chains, systems of structural elements, residual life, categories of technical state.

УДК 691.3

Сахно С.І., Попруга Д.В., Мокряк Г.В. Особливості роботи бетонної балки з базальтовою арматурою

В роботі порівнюються деформативні та міцнісні характеристики бетонної балки армованої сталевією та базальтовою арматурою

Метою роботи є виявлення переваг і недоліків застосування базальтової стрижневої арматури шляхом аналізу поведінки цифрових моделей армованої бетонної балки.

Методи досліджень. Методом скінчених елементів досліджувалась математична модель бетонної армованої балки. Для обчислення параметрів бетону використовувалась модель Друккера-Прагера, для сталевієї арматури – білінійна деформативна модель.

Наукова новизна. Застосування методу скінчених елементів дозволило виявити розподілення напружень в бетоні та композитній арматурі, розрахувати коефіцієнти використання несучої здатності арматури.

Практичне значення. Проведений в роботі аналіз недоліків та переваг базальтової арматури дозволяє проєктувальникам визначитись з областю її застосування в конструкціях.

Результати. В роботі розроблена математична модель армованої бетонної балки. Формування моделі відбувалось в програмному комплексі ANSYS Student. Для аналізу використовувались деформативні та міцнісні характеристики моделей. Для моделей із композитної арматури прийнято два варіанти діаметрів стрижнів: відповідні діаметри композитної та сталеві арматури однакові та відповідні діаметри композитної арматури розраховували із умов однакових початкових деформацій зі сталеві арматурою. Наведено методику підбору діаметру композитної арматури, яка має однакові деформації зі сталеві арматурою. За результатами моделювання для різних моделей зіставляли прогини балки, відносні деформації бетону, аксіальні напруження стиску і розтягу в бетоні, аксіальні напруження в стрижнях верхнього і нижнього поясу, ступінь використання несучої здатності матеріалу стрижнів. В роботі визначено, що прогини балки з базальтовою арматурою значно більші ніж у балки зі сталеві арматурою. При цьому напруження бетону в балці з базальтовою арматурою майже вдвічі більші ніж в балці зі сталеві арматурою. Напруження розтягу і стиску в базальтовій арматурі в 1,8 рази, а в базальтовій арматурі збільшеного діаметру в 3,6 рази менші ніж в моделі зі сталеві арматурою. За однакових навантажень максимальний коефіцієнт використання у сталеві арматури, мінімальний – у моделі з базальтовою арматурою збільшеного діаметру. Коефіцієнти використання несучої здатності базальтової арматури в п'ять разів, а базальтової арматури збільшеного діаметру в десять разів нижчі ніж у сталеві арматури.

Ключові слова: бетон, базальтова арматура, метод скінчених елементів, деформації, міцність.

Sakhno S.I., Popruha D.V., Mokryak H. V. Peculiarities of the work of a concrete beam with basalt armature

Objective of research. The work compares the deformation and strength characteristics of a concrete beam reinforced with steel and basalt armature.

Research methods. A mathematical model of a reinforced concrete beam was studied using the finite element method. The Drucker-Prager model was used to calculate concrete parameters, and the bilinear deformation model was used for steel reinforcement.

The purpose of the work is to identify the advantages and disadvantages of using basalt rod reinforcement by analyzing the behavior of digital models of reinforced concrete beams.

Scientific novelty. Application of the finite element method made it possible to identify the distribution of stresses in concrete and composite armature and to calculate the coefficients of armature bearing capacity utilization.

Practical meaning. The analysis of the advantages and disadvantages of basalt armature is carried out in this work. It allows designers to decide on the area of its application in structures.

Results. The work developed a mathematical model of a reinforced concrete beam. Model formation took place in the ANSYS Student software package. The deformation and strength characteristics of the models were used for the analysis. For composite armature models, two options for rod diameters were taken: the corresponding diameters of composite and steel armature are the same, and the corresponding diameters of composite armature were calculated from the conditions of the same initial deformations with steel reinforcement. The method of selecting the diameter of the composite armature, which has the same deformations as the steel one, is given. According to the simulation results, beam deflections, relative deformations of concrete, axial compressive and tensile stresses in concrete, axial stresses in the rods of the upper and lower belts, and the degree of the bearing capacity utilization for the material for the rods were compared for different models.

In the paper, it is determined that the deflections of beams with basalt armature are significantly larger than those of beams with steel armature. At the same time, concrete stresses in a beam with basalt armature are almost twice as high as in a beam with steel armature. Tensile and compressive stresses in basalt armature are 1.8 times lower, and in basalt armature of increased diameter, they are 3.6 times lower than in the model with steel armature. Under the same loads, the maximum coefficient of use is for steel armature, and the minimum is for the model with basalt armature of increased diameter. The bearing capacity utilization coefficients of basalt armature are five times lower, and basalt armature with increased diameter is ten times lower than that of steel armature.

Key words: concrete, basalt armature, finite element method, deformations, strength.

УДК 622.647.2

Горбачов Ю.Г., Хруцький А.О., Громадський А.С., Чумак Ю.І. Обґрунтування раціональних параметрів опор ковзання безроликів стрічкових конвеєрів

Мета. Метою роботи є удосконалення конструкції опор ковзання стрічкових конвеєрів для переміщення крупношматкових вантажопотоків. Необхідність перевезення величезних обсягів вантажів у гірничій та гірничозбагачувальній галузях промисловості вимагає широкого використання високопродуктивних транспортних засобів безупинного типу, насамперед стрічкових конвеєрів. З огляду на те, що вони не пристосовані для транспортування гірничої маси зі шматками крупністю більше 300-350 мм, важливого значення набувають спеціальні конструкції такого обладнання, у тому числі безроликові з ковзною стрічкою. Таким чином, важливість та актуальність теми дослідження не викликає жодних сумнівів.

Методи дослідження. Використання конвеєрів з ковзною стрічкою забезпечує можливість реалізації спокійного, малодинамічного режиму транспортування крупношматкових вантажів, кращі умови роботи стрічки та скорочення загальної вартості конвеєра за рахунок відмови від чисельних конструкцій дорогих та недостатньо надійних роликів-опор. Проведені дослідження підтвердили, що використання дешевих і доступних антифрикційних матеріалів для виготовлення довгомірних елементів ковзання дозволить отримати високоефективні конструкції конвеєрних установок для подібних умов експлуатації. Для досягнення мети роботи потрібно запропонувати доцільну конструктивну схему опор ковзання, яка забезпечує найкращі умови роботи конвеєра. Виходячи з цього, зроблено висновок про необхідність обґрунтування раціональних параметрів елементів ковзання.

Наукова новизна. Досліджено та розроблено раціональну конструкцію опор ковзання безроликового стрічкового конвеєра для транспортування крупношматкових вантажопотоків, що відрізняється простотою, технологічністю виготовлення, зручністю проведення монтажних і демонтажних операцій, а також пристосованістю до роботи в умовах змінних навантажень на стрічку.

Практична значимість. Практичне впровадження запропонованої пропозиції забезпечить розширення області використання стрічкового конвеєрного транспорту у важких умовах видобувних і переробних підприємств гірничорудної промисловості.

Результати. Обґрунтовано та розроблено технічне рішення опорних антифрикційних елементів стрічкового конвеєра з ковзною стрічкою, що дозволяє транспортування крупношматкових вантажів з підвищеною швидкістю та зменшеними витратами енергії.

Ключові слова: технологічний процес транспортування гірничої маси стрічковими конвеєрами з опорами ковзання, антифрикційні елементи зі зниженим коефіцієнтом тертя ковзання.

Horbachov Iu., Khrutskiy A., Hromadskiy A., Chumak Iu. Justification of the rational parameters of sliding resistance rollerless belt conveyors

Goal. The purpose of the work is to improve the design of the sliding supports of belt conveyors for the movement of bulk cargo flows. The need to transport huge volumes of cargo in the mining and mining industries requires the widespread use of high-performance non-stop vehicles, primarily belt conveyors. Due to the fact that they are not suitable for transporting mining mass with pieces larger than 300–350 mm, special designs of such equipment, including roller-less ones with a sliding belt, are of great importance. Thus, there is no doubt about the importance and relevance of the research topic.

Research methods. The use of conveyors with a sliding belt provides the possibility of realizing a calm, low-dynamic mode of transportation of bulky goods, better working conditions of the belt and reduction of the overall cost of the conveyor due to the rejection of numerous structures of expensive and insufficiently reliable roller supports. The conducted studies confirmed that the use of cheap and affordable anti-friction materials for the manufacture of long-dimensional sliding elements will allow obtaining highly efficient designs of conveyor installations for similar operating conditions. To achieve the goal of the work, it is necessary to propose an appropriate structural scheme of the sliding supports, which provides the best conditions for the conveyor. Based on this, a conclusion was made about the need to justify the rational parameters of sliding elements.

Scientific novelty. The rational design of the sliding supports of the rollerless belt conveyor for the transportation of bulk cargo flows has been researched and developed, which is characterized by simplicity, manufacturability, ease of assembly and disassembly operations, as well as adaptability to work under conditions of variable loads on the belt.

Practical significance. The practical implementation of the proposed proposal will ensure the expansion of the area of use of belt conveyor transport in difficult conditions of mining and processing enterprises of the mining industry.

Results. The technical solution of the supporting anti-friction elements of the belt conveyor with a sliding belt was substantiated and developed, which allows the transportation of bulky goods with increased speed and reduced energy consumption.

Keywords: the technological process of transporting mining mass by belt conveyors with sliding supports, anti-friction elements with a reduced coefficient of sliding friction.

УДК [005.21:330.322]:[336.14:352]

Слободянюк Н.О., Короленко Р.В. Теоретико-правові засади формування інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів в умовах децентралізації державної влади України

Мета. Метою статті є семантичний аналіз дефініцій «децентралізація», «інвестиційний потенціал», що складає теоретичну основу інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів, а також систематизація, конкретизація його ресурсних складових та ризиків впливу різної етіології, обґрунтування ефективних інструментів зростання інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів відповідно до прийнятих правових засад його функціонування та розвитку в умовах децентралізації.

Методи дослідження. В статті використано методи: узагальнення й системний метод, аналіз і синтез, семантичний аналіз, абстрактно-логічний аналіз, метод порівняльного аналізу.

Наукова новизна. Набуло подальшого розвитку науковий підхід трактування сутності інвестиційно-стратегічного потенціалу місцевих бюджетів в умовах децентралізації, що визначає їх здатність формувати сприятливий інвестиційний клімат в умовах дії ризиків різної етіології, в тому числі ризиків бюджетної децентралізації, можливість залучати реальні інвестиційні потоки стратегічного значення, нарощувати фінансову спроможність з метою вирішення нагальних соціально-економічних завдань відповідно до прийнятої стратегії розвитку регіону задля досягнення показників національної безпеки.

Практичне значення. Основні наукові положення статті можуть бути доведені до рівня методичних розробок й практичних рекомендацій для обізнаності громадськості, бізнесу та державних структур щодо питань залучення інвестиційних ресурсів до місцевих бюджетів в умовах децентралізації.

Результати. Досліджено та конкретизовано суть бюджетної децентралізації як механізму пошуку додаткових джерел власних ресурсів місцевих бюджетів через розширення доступу до інструментів вітчизняного й міжнародного фінансового ринку, обґрунтовано позитивний вплив реформи децентралізації на інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів. Ідентифіковано, систематизовано існуючі ризики впливу на інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів, виокремлено групу ризиків бюджетної децентралізації. Надана оцінка динаміці змін кількості договорів ДПП за 2022-2023 рр., обґрунтовано фактори, що стримують їх ефективну реалізацію. Досліджено вплив міжнародних донорів на інвестиційно-стратегічний потенціал місцевих бюджетів.

Ключові слова: місцевий бюджет, децентралізація, інвестиційно-стратегічний потенціал, ДПП, інвестиції.

Slobodyanyuk N.O., Korolenko R.V. Theoretical and legal foundations of the formation of the investment and strategic potential of local budgets in the conditions of decentralization of the state power of Ukraine

Purpose. The purpose of the article is a semantic analysis of the definitions "decentralization", "investment potential", which constitutes the theoretical basis of the investment-strategic potential of local budgets, as well as systematization, specification of its resource components and risks of influence of various etiologies, substantiation of effective tools for increasing the investment-strategic potential of local budgets in accordance with the accepted legal principles of its functioning, development in conditions of decentralization.

Research methods. The article uses methods: generalization, system method, analysis, synthesis, semantic analysis, abstract-logical analysis, method of comparative analysis.

Scientific novelty. A scientific approach to the interpretation of the essence of the investment-strategic potential of local budgets in conditions of decentralization has been developed, which determines their ability to form a favorable investment climate in conditions of risks of various etiologies, the ability to attract real investment flows of strategic importance, to build up the financial capacity. economic tasks in accordance with the adopted regional development strategy with the aim of achieving national security indicators.

Practical significance. Basic scientific provisions can be used for practical recommendations on informing the public, business, state structures on attracting investment resources to local budgets in conditions of decentralization.

Results. Budgetary decentralization has been studied as a mechanism of additional sources of own resources of local budgets and expansion of access to instruments of the domestic, international financial market. The risks of influence on the investment and strategic potential of local budgets have been systematized. An assessment of the dynamics of changes in the number of PPP contracts for 2022-2023 is provided, and the factors restraining their effective implementation are substantiated. The influence of international donors on the investment and strategic potential of local budgets has been studied.

Key words: local budget, decentralization, investment and strategic potential, investments.

УДК 622.7:004.8

Ляшок В.Г., Тиханський М.П. Інтелектуальні засоби у процесах подрібнення як потужний інструмент автоматизації

Мета дослідження Мета даного дослідження полягає в досягненні вдосконалення процесу подрібнення корисних копалин в контексті виробничих потреб ПАТ "Північний ГЗК" за допомогою інтелектуальних методів, зокрема нейронних мереж. Застосування інтелектуальних засобів, таких як нейронні мережі, має на меті підвищення якості, точності та ефективності процесу подрібнення. Очікується, що результатом дослідження буде розробка та впровадження нових алгоритмів та методів, які забезпечать оптимальне використання ресурсів, зниження витрат та підвищення загальної продуктивності процесу подрібнення в гірничій промисловості.

Методи дослідження. Для виконання було використано: вивчення наукових досліджень та літератури в галузі застосування інтелектуальних методів у процесах подрібнення матеріалів, аналіз технологічних схем та процесів подрібнення на ПАТ "Північний ГЗК", розробка та моделювання систем для оптимізації параметрів подрібнення.

Наукова новизна. Дослідження впроваджує новітні методи інтелектуального аналізу даних, зокрема застосування штучних нейронних мереж, для оптимізації процесу подрібнення корисних копалин. Використання нейронних мереж у гірничій промисловості є новим та стрімким напрямком досліджень і відкриває широкі можливості для підвищення ефективності та точності процесів обробки руди в гірничо-збагачувальному секторі.

Практична значимість. Впровадження розроблених методів та моделей у практику подрібнення корисних копалин на ПАТ "Північний ГЗК" може призвести до підвищення якості та ефективності процесу, зменшення часу простою та оптимізації витрат енергії. Це може мати значний позитивний вплив на економічну ефективність підприємства та загальний рівень виробництва корисних копалин.

Результати. Ця робота продемонструвала, як динамічне моделювання може використовуватися для оцінки ефектів від модифікації процесу і прогнозування фактичної продуктивності. Незважаючи на складність динамічного моделювання, воно має вищий потенціал у прогнозуванні фактичної продуктивності. Розроблені системи, використані у цій роботі, стануть корисними інструментами для подальших досліджень у галузі автоматизації для покращення показників.

Ключові слова: збагачення, нейронні мережі, інтелектуальні засоби, регулятор, автоматизація, подрібнення, моделювання, ГЗК.

Liashok V.G., Tykhanskyi M.P. Intelligent tools in grinding processes as a powerful automation tool

Purpose of the study: The purpose of this study is to achieve improvement of the mineral grinding process in the context of the production needs of PJSC "Northern GOK" using intelligent methods, in particular neural networks. The use of intelligent tools, such as neural networks, is aimed at improving the quality, accuracy and efficiency of the grinding process. The research is expected to result in the development and implementation of new algorithms and methods that will ensure optimal use of resources, reduce costs and increase the overall productivity of the grinding process in the mining industry.

Research methods. The following methods were used: study of scientific research and literature in the field of application of intelligent methods in the processes of grinding materials, analysis of technological schemes and grinding processes at PJSC "Northern GOK", development and modelling of systems for optimisation of grinding parameters.

Scientific novelty. The study introduces the latest methods of data mining, including the use of artificial neural networks, to optimise the process of grinding minerals. The use of neural networks in the mining industry is a new and rapidly growing area of research and opens up great opportunities for improving the efficiency and accuracy of ore processing in the mining and processing sector.

Practical significance. Implementation of the developed methods and models into the practice of grinding minerals at PJSC Northern Mining can lead to an increase in the quality and efficiency of the process, a reduction in downtime and optimisation of energy consumption. This can have a significant positive impact on the economic efficiency of the enterprise and the overall level of mineral production.

Results. This paper has demonstrated how dynamic modelling can be used to evaluate the effects of process modifications and predict actual performance. Despite the complexity of dynamic modelling, it has a higher potential for predicting actual performance. The developed systems used in this paper will be useful tools for further research in the field of automation to improve performance.

Keywords: beneficiation, neural networks, intelligent tools, regulator, automation, grinding, modelling, mining and processing plants.

УДК 658.511: 629.113

Монастирський Ю. А., Максименко І. С. Дослідження закономірностей зміни витрат палива автосамоскидами дизель-тролейвозами на залізорудних кар'єрах

Мета. Підвищення ефективності роботи кар'єрного автомобільного транспорту за рахунок зменшення витрат палива шляхом встановлення дизель-тролейвозного обладнання на кар'єрні автосамоскиди.

Методи дослідження. Положення теорії автомобілів та транспортних процесів і систем, методи теорії планування експериментів, аналіз літературних джерел, наукове узагальнення раніше виконаних досліджень.

Наукова новизна. На підставі дослідження процесу транспортування вантажів кар'єрними автосамоскидами та дизель-тролейвозами встановлені закономірності зміни витрат палива кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю 90, 130 та 220 тон від довжини траси, закономірності зміни питомих витрат палива дизель-тролейвозами від довжини траси при різних частинах тролейної ділянки та закономірності зміни питомих витрат палива від питомої частини тролейної ділянки при різних довжинах трас руху.

Практична значимість. Результати досліджень будуть використані при оцінці доцільності використання та прогнозування роботи дизель-тролейвозів на базі кар'єрних автосамоскидів вантажопідйомністю від 90 до 220 т.

Результати. Встановлені закономірності зміни лінійних витрат палива від довжини їздки з вантажем кар'єрними автосамоскидами з електромеханічною трансмісією. Середні розрахункові лінійні витрати палива для автосамоскидів вантажопідйомністю 90 т складають 10-12 л/км, 130 т – 16-18 л/км, 220 т – 24-26 л/км. Менші значення відповідають трасам більшої довжини за рахунок меншої питомої частини витрат палива під час непродуктивних операцій транспортного циклу. Встановлена параболічна залежність питомих витрат палива дизель-тролейвозу від довжини траси руху та лінійна залежність питомих витрат палива дизель-тролейвозу від тролейної частини ділянки маршруту. Встановлено, що абсолютна довжина траси руху впливає не дуже суттєво на питомі витрати палива, більш суттєвий вплив має частина тролейної ділянки в загальній довжині траси. При збільшенні тролейної частини траси з 30 до 70 % на найдовшій трасі величина відносних витрат палива зменшується з 0,76 до 0,41. Для зменшення витрат палива при впровадженні дизель-тролейвозів необхідно мати траси максимальної довжини з максимальною довжиною тролейної ділянки, це може призвести до зменшення загальних витрат палива у 2,5 рази.

Ключові слова: кар'єр, транспорт, автосамоскид, дизель-тролейвоз, витрати палива, дорожні умови експлуатації.

Monastyrskiy Y.A., Maksymenko I. S. Study of regularities of changes in fuel consumption by dumpers trolley diesel machine at iron ore quarries

Goal. Increasing the efficiency of quarry road transport by reducing fuel consumption by installing diesel trolley-carrying equipment on quarry dump trucks.

Research methods. Provisions of the theory of cars and transport processes and systems, methods of the theory of planning experiments, analysis of literary sources, and scientific generalization of previously performed research.

Scientific novelty. Based on the study of the process of transporting goods by quarry dump trucks and trolley diesel machine, the patterns of changes in fuel consumption of quarry dump trucks with a carrying capacity of 90, 130, and 220 tons depending on the length of the track, the patterns of changes in specific fuel consumption depending on the length of the track at different parts of the trolley section and the patterns of changes in specific fuel consumption were established fuel consumption from a specific part of the trolley section at different lengths of traffic routes.

Practical significance. The results of the research will be used in assessing the feasibility of using and predicting the operation of trolley assist based on quarry dump trucks with a carrying capacity of 90 to 220 tons.

The results. The regularities of changes in linear fuel consumption along the length of driving with a load by quarry dump trucks with an electromechanical transmission have been established. The average estimated linear fuel consumption for dump trucks with a carrying capacity of 90 t is 10-12 l/km, 130 t – 16-18 l/km, 220 t – 24-26 l/km. Smaller values correspond to routes of longer length due to a smaller specific part of fuel consumption during non-productive operations of the transport cycle. The parabolic dependence of the specific fuel consumption of a trolley assist car on the length of the route and the linear dependence of the specific fuel consumption of a trolley assist car on the trolley section of the route were established. It was established that the absolute length of the traffic route does not significantly affect the specific fuel consumption, the part of the trolley section in the total length of the route has a more significant influence. When the trolley part of the track increases from 30 to 70% on the longest track, the value of relative fuel consumption decreases from 0.76 to 0.41. To reduce fuel consumption when introducing trolley assist, it is necessary to have routes of the maximum length with the maximum length of the trolley section, this can lead to a reduction of the total fuel consumption by 2.5 times.

Keywords: quarry, transport, dump truck, trolley assist, fuel consumption, road operating conditions.

УДК 622.7

Олійник Т.А., Булах О.В., Скляр Л.В., Олійник М.О. Особливості збагачення гематитових руд підземного видобутку Кривбасу в крупності 1-0 мм

Мета. Метою даної роботи є проведення досліджень сухим способом на залізних рудах підземного видобутку з визначенням технологічних показників на вібраційному полігармонічному гравітаційному сепараторі.

Методи дослідження. Мінералогічний, хімічний аналізи. Гранулометричний склад матеріалу визначався за допомогою ситового аналізу, обробка та узагальнення матеріалу дозволили створити оптимальні умови розділення мінеральних зерен за крупністю на похилій поверхні вібраційного полігармонічного гравітаційного сепаратора.

Наукова новизна. На підставі визначення параметрів сепарації гематитових кварцитів підземного видобутку Кривбасу і особливостей їх мінерально-технологічного складу встановлено, що ефективність процесу класифікації у повітряному середовищі за граничним зерном 1 мм вище 97 % може бути досягнута за рахунок використання полігармонічного високочастотного розсіву з визначеним кутом нахилу декі, що дозволило отримати товарний залізорудний концентрат з масовою часткою заліза загального 65,32% при його виході 57,48% та вилученні заліза загального у концентрат 61,91%.

Практична значимість. Дослідження та промислові випробування зі збагачення залізних руд підземного видобутку Кривбасу сухим способом з використанням вібраційного полігармонічного гравітаційного сепаратора показали доцільність, перспективність, високу ефективність та можливість реалізації на гірничо-збагачувальних комбінатах, які здійснюють переробку рядової залізородної сировини з отриманням концентрату зі значною часткою корисного компонента, що забезпечує можливість отримання високоякісної продукції.

Результати. В результаті проведених промислових випробувань сепарації мінеральної сировини у повітряному середовищі за рахунок використання полігармонічного високочастотного розсіву доведено можливість отримання з гематитових руд підземного видобутку Кривбасу високоякісного залізородного концентрату крупністю 1-0 мм 57,48 % за виходом з масовою часткою заліза загального 65,32 % і масовою часткою оксиду кремнію 5,9 % . Ефективність сепарації при цьому 97,37 %.

Ключові слова: видобуток підземний, сепаратор полігармонічний високочастотний, розділення, крупність, склад гранулометричний, поверхня просіювальна, ефективність.

Oliinyk T.A., Bulakh O.V., Skliar L.V. Oliinyk M.O. Peculiarities of enrichment of hematite ores of underground extraction of Krivbass in size 1-0 mm

Purpose. The purpose of this work is to conduct dry method studies on iron ores of underground mining with the vi-value of technological indicators on a vibratory polyharmonic gravity separator.

Research methods. Mineralogical, chemical analysis. The particle size distribution of the material was determined using sieve analysis, processing and generalization of the material made it possible to create optimal conditions for the separation of mineral grains by size on the inclined surface of the vibratory polyharmonic gravity separator.

Scientific novelty. On the basis of determination of separation parameters of hematite quartzites of underground extraction of Krivbass and peculiarities of their mineral-technological composition, it was established, that the efficiency of the classification process in an air medium at a boundary grain of 1 mm above 97% can be achieved by using a polyharmonic high-frequency scattering with a predetermined deke angle, which made it possible to obtain a commercial iron ore concentrate with a mass fraction of iron of the total 65,32% at its yield of 57.48% and extraction of total iron into the concentrate of 61.91%.

Practical significance. Researches and industrial tests on enrichment of iron ores of underground you-product of Krivbass by a dry way with use of a vibratory polyharmonic gravitational separator are still-halls expediency, perspective, high efficiency and possibility of realization on mining and processing plants which carry out processing of ordinary iron ore raw materials with obtaining of concentrate with considerable share of useful component, providing possibility of obtaining high-quality products.

Results. As a result of industrial tests of separation of mineral raw materials in the air due to the use of polyharmonic high-frequency dispersion, the possibility of obtaining from hematite ores of underground extraction of Krivbass high-quality iron ore concentrate with a size of 1-0 mm 57.48% in yield with a mass fraction of iron of the total 65.32% and a mass fraction of silicon oxide of 5.9% was proved. The separation efficiency is 97.37%.

Keywords: underground mining, high-frequency polyharmonic separator, separation, fineness, granulometric composition, screening surface, efficiency.

УДК 669.054.83

Савельєв С.Г., Ярош Т.П., Бабаєвська О.В., Кондратенко М.М., Бабошко Д.Ю. Аналіз металургійних методів утилізації червоного шламу

Відзначено різноманітність методів утилізації червоного шламу – побічного продукту глиноземного виробництва, світове накопичення якого неухильно збільшується, посилюючи негативний вплив на оточуюче природне середовище. Показано, що переважна більшість найбільш ефективних методів утилізації базується на поєднанні піро- та гідрометалургійних способів. Проаналізовано основні науково-практичні результати ряду досліджень металургійних методів утилізації червоного шламу, опублікованих у провідних фахових виданнях протягом кількох останніх років. Зроблено висновок про економічну доцільність комплексного вилучення з червоного шламу цінних металів – заліза, алюмінію, титану, скандію. Відзначено необхідність проведення дослідно-промислових випробувань технологій безвідходної переробки червоного шламу з урахуванням його характеристик.

Метою роботи є порівняльний аналіз металургійних методів утилізації червоного шламу з метою визначення розробок, найбільш перспективних для промислової реалізації.

Методи наукового дослідження. У роботі використані загальнологічні методи наукового дослідження – аналіз і синтез, аналогія, узагальнення.

Наукова новизна роботи. На основі проведеного аналізу встановлено, що найбільш ефективними методами металургійної переробки червоного шламу, які забезпечують найбільший ступінь вилучення металів, є такі, що в оптимальному співвідношенні поєднують процеси піро- і гідрометалургії при мінімальних витратах енергії та викидах шкідливих речовин в оточуюче середовище.

Практична значущість роботи полягає в розширенні уявлень щодо можливих напрямів вирішення проблеми масштабної утилізації червоного шламу, отриманні висновків, які дають необхідну науково-технічну інформацію для ефективного практичного застосування найбільш результативних методів металургійного використання червоного шламу та вказують перспективні шляхи продовження досліджень у цьому напрямку.

Результати роботи свідчать про те, що сучасний рівень розробок металургійних методів утилізації червоного шламу вже наблизився до положення, яке дозволяє впевнено визначати економічно ефективні, технологічно досконалі безвідходні прийоми переробки цієї цінної техногенної сировини. Широке промислове впровадження безвідходних металургійних методів утилізації червоного шламу не тільки зменшить собівартість виробництва глинозему і відповідно алюмінію, але й суттєво покращить екологічну ситуацію в районах розташування підприємств алюмінієвої промисловості.

Ключові слова: червоний шлам, утилізація, пірометалургія, гідрометалургія, технологія, відновлення, вилуговуван-

ня, ефективність.

Saveliev S.G., Yarosh T.P., Babaievska O.V., Kondratenko M.M., Baboshko D.Yu. Analysis of metallurgical methods of red mud utilization

The variety of methods of disposal of red sludge - a by-product of alumina production, the global accumulation of which is steadily increasing, increasing the negative impact on the surrounding natural environment - is noted. It is shown that the vast majority of the most effective disposal methods are based on a combination of pyro- and hydrometallurgical methods. The main scientific and practical results of a number of studies of metallurgical methods of red mud utilization, published in leading professional publications over the past several years, have been analyzed. A conclusion was made about the economic expediency of complex extraction of valuable metals from red mud - iron, aluminum, titanium, scandium. The necessity of conducting research and industrial tests of technologies for waste-free processing of red sludge, taking into account its characteristics, was noted.

The purpose of the work is a comparative analysis of metallurgical methods of red mud disposal with the aim of determining the most promising developments for industrial implementation.

Methods of scientific research. The work uses general logical methods of scientific research - analysis and synthesis, analogy, generalization.

Scientific novelty of the work. On the basis of the conducted analysis, it was established that the most effective methods of metallurgical processing of red mud, are those that provide the greatest degree of metal extraction, are those that combine pyro- and hydrometallurgy processes in an optimal ratio with minimal energy consumption and emissions of harmful substances in environment.

The practical significance of the work lies in the expansion of ideas regarding the possible directions of solving the problem of large-scale utilization of red sludge, obtaining conclusions that provide the necessary scientific and technical information for the effective practical application of the most effective methods of metallurgical use of red sludge and indicate promising ways of continuing research in this direction.

The results of the work indicate that the current level of development of metallurgical methods for the utilization of red sludge has already approached a position that allows us to confidently determine economically effective, technologically perfect waste-free methods of processing this valuable man-made raw material. Widespread industrial implementation of waste-free metallurgical methods of red mud utilization will not only reduce the cost of alumina production and, accordingly, aluminum, but will also significantly improve the environmental situation in the areas where aluminum industry enterprises are located.

Key words: red mud, utilization, pyrometallurgy, hydrometallurgy, technology, recovery, leaching, efficiency.

УДК 669.162

Кассім Д.О., Чупринов Є.В., Ляхова І. А., Коренко М.Г. Узагальнення методичних підходів до розрахунку енергетичних параметрів газового потоку в горні доменних печей при вдуванні комбінованого дуття

Мета. Головною метою даної роботи є вдосконалення контролю зміни енергетичних параметрів газового потоку в горні доменних печей та розподілу газового потоку за радіусом на підставі адаптації методики визначення комплексних показників оцінки потоків комбінованого дуття та горнового газу, з урахуванням технологічних особливостей доменної плавки при вдуванні комбінованого дуття.

Методи дослідження. У роботі використано сучасні методи дослідження, у тому числі математичне моделювання, методи математичної статистики для дослідження впливу запропонованих комплексних параметрів на перебіг доменної плавки при різних технологічних режимах роботи доменної печі корисним об'ємом 5000 м³.

Наукова новизна. Розроблено методичні рекомендації щодо розрахунку повної енергії потоку горнового газу при вдуванні природного газу та пилувугільного палива в горні доменних печей.

Практична значимість. Отримані авторами даної роботи результати дозволяють контролювати як середні значення потоку горнового газу при вдуванні природного газу та пилувугільного палива в горні доменних печей, так і його значення по окремим фурмам доменної печі, що дає можливість контролювати та регулювати глибину проникнення потоку горнового газу до центру печі від кожної фурми, а, отже, дозволяє покращувати газодинамічні та відновлювальні умови доменної плавки.

Результати. У даній роботі авторами, на підставі аналізу результатів впровадження технології вдування пилувугільного палива на доменній печі корисним об'ємом 5000 м³, були запропоновані напрямки вдосконалення газодинамічних та відновлювальних умов доменної плавки на підставі контролю зміни розмірів зон горіння перед фурмами печі та розподілу газового потоку за радіусом її горна. З цією метою були узагальнені методичні підходи щодо визначення комплексних енергетичних показників оцінки потоків комбінованого дуття і горнового газу при впровадженні технології доменної плавки з вдуванням природного газу та пилувугільного палива.

Ключові слова: доменна плавка, пилувугільне паливо, горновий газ, комбіноване дуття, зона горіння, кінетична енергія, повна енергія, фурма, горн.

Kassim D.O., Chuprinov E.V., I.A. Liakhova, Korenko M.G. Generalization of methodological approaches to the calculation of the energy parameters of the gas flow in the hearth of blast furnace when blowing a combined blow

Goal. The main goal of this work is to improve the control of changes in the energy parameters of the gas flow in blast furnaces and the distribution of the gas flow by radius on the basis of the adaptation of the methodology for determining the complex indicators of the combined blast and hearth gas flows, taking into account the technological features of blast furnace melting when blowing the combined blast.

Research methods. The work uses modern research methods, including mathematical modeling, methods of mathematical statistics to study the influence of the proposed complex parameters on the course of blast furnace melting at different technological modes of operation of a blast furnace with a useful volume of 5000 m³.

Scientific novelty. Methodical recommendations have been developed for calculating the total energy of the hearth gas flow when blowing natural gas and pulverized coal fuel into the blast furnaces hearth.

Practical significance. The results obtained by the authors of this work make it possible to control both the average values of the flow of hearth gas when blowing natural gas and pulverized coal fuel into the hearth of blast furnaces, as well as its value along individual nozzles of the blast furnace tuyeres, which makes it possible to control and regulate the depth of penetration of the flow of hearth gas to the center of the furnace from of each tuyere, and, therefore, allows to improve the gas-dynamic and restoring conditions of blast furnace melting.

The results. In this work, the authors, based on the analysis of the results of the introduction of pulverized fuel blowing technology on a blast furnace with a useful volume of 5000 m³, proposed directions for improving the gas-dynamic and regenerative conditions of blast furnace smelting based on the control of the change in the size of the combustion zones in front of the furnace nozzles and the distribution of the gas flow by radius of the hearth. For this purpose, methodical approaches were generalized for the determination of complex energy indicators for the assessment of flows of combined blasting and hearth gas during the implementation of blast furnace smelting technology with the injection of natural gas and pulverized coal fuel.

Keywords: blast furnace, pulverized coal fuel, hearth gas, combined blasting, combustion zone, kinetic energy, total energy, tuyeres, hearth.

УДК 699.86

Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Настич О.Б., Галечан Н.С., Мориконь В.С., Мінько Ю.Ю. Особливості технології виготовлення буронабивних паль

Мета. Розкриття послідовності влаштування буронабивних паль і взаємодія їх із ґрунтовим масивом у процесі їх виготовлення.

Методи дослідження. Нині спосіб розрахунку несучої здатності палі за нормативними регламентами дає недостатньо точні результати (знижує несучу здатність за певних інженерно-геологічних умов). Крім того, аналітичний метод розрахунку має суттєве обмеження, оскільки розроблений для паль глибиною занурення до 40 м, що не дає змоги врахувати підвищення опору по бічній поверхні та під вістрям паль, розташованих на більшій глибині.

Наукова новизна. Виконано оцінку впливу взаємодії паль, що виготовляються в ґрунті, з ґрунтовим масивом у період їх виготовлення на несучу здатність по ґрунту для точного розрахунку.

Практична значимість. Наведено послідовність влаштування, сферу застосування деяких технологій виготовлення буронабивних паль у ґрунті, висвітлено їхні переваги та недоліки з економічної та технічної точки зору. Виконано оцінку впливу взаємодії паль, що виготовляються в ґрунті, з ґрунтовим масивом у період їхнього виготовлення на несучу здатність паль для точного розрахунку та ефективність застосування паль.

Результати. Представлено графіки розрахункових опорів ґрунтів на бічній поверхні паль і їхнім нижнім кінцем залежно від глибини розташування шару та показника плинності. Показано, що в процесі виготовлення паль на слабких ґрунтах збільшення периметра палі сягнуло 114% під дією тиску бетону під час бетонування і, як наслідок, на слабких ґрунтах можлива перевитрата бетону до 130%. Зроблено оцінку несучої здатності бурових паль, що виготовляються в ґрунті, з урахуванням технології виготовлення та їхнього розташування за глибиною в ґрунтах. Отримано та проаналізовано результати нелінійної екстраполяції опорів ґрунтів залежно від фізичних властивостей ґрунтів на бічній поверхні та під п'ятою бурових паль, що виготовляються в ґрунті.

Ключові слова: ґрунти, основа, технологія виготовлення паль.

R.O. Timchenko, D.A. Krishko, O.B. Nastych, N.S. Galechan, V.S. Morikon, Y.Y. Minko. Features of the technology of manufacturing bored piles

Purpose. To reveal the sequence of bored piles arrangement and their interaction with the soil massif in the process of their manufacture.

Research methods. At present, the method of calculating the bearing capacity of a pile according to regulatory regulations gives insufficiently accurate results (underestimates the bearing capacity under certain engineering and geological conditions). In addition, the analytical method of calculation has a significant limitation, since it is designed for piles with a depth of immersion up to 40 m, which does not allow to take into account the increase in resistance along the side surface and under the tip of piles located at a greater depth.

Scientific novelty. The influence of the interaction of piles made in the ground with the soil massif during the period of their manufacture on the bearing capacity in the ground was assessed for accurate calculation.

Practical significance. The sequence of installation, the scope of application of some technologies for the manufacture of bored piles in the ground, and their advantages and disadvantages from an economic and technical point of view are presented. The influence of the interaction of piles made in the ground with the soil massif during their manufacture on the bearing capacity of piles for accurate calculation and efficiency of pile application was assessed.

Results. Graphs of the calculated soil resistances on the lateral surface of piles and their lower end are presented, depending on the depth of the layer and the yield strength. It is shown that in the process of manufacturing piles on weak soils, the increase in the pile perimeter reached 114% under the influence of concrete pressure during concreting and, as a result, concrete overconsumption of up to 130% is possible on weak soils. The bearing capacity of drilled piles made in the ground was assessed, taking into account the manufacturing technology and their location in the soil. The results of nonlinear extrapolation of soil resistances depending on the physical properties of soils on the lateral surface and under the heel of drilled piles made in the ground are obtained and analyzed.

Key words: soils, base, pile manufacturing technology.

УДК [622.34:622.232]:622.012

Кушнерьов І.П., Кривенко Ю.Ю., Максимов І.І., Шепель О.Л., Калініченко В.О., Федоренко С.О. Відпрацювання паралельно зближених покладів корисних копалин

Метою роботи є дослідження та розробка інноваційної технології відпрацювання паралельно зближених покладів, яка забезпечує ефективність очисного виймання корисних копалин, стійкість конструктивних елементів системи розробки та збереженість денної поверхні.

Методи досліджень. Аналіз та узагальнення існуючих технологій виймання зближених пластоподібних покладів. Конструктивне моделювання елементів системи розробки зближених пластів та порядку їх відпрацювання. Аналітичні дослідження процесу склепінутворення в міжпластовій товщі порід при виймці нижнього покладу. Для обробки даних та прийняття значень гірничо-геометричних параметрів, які характерні для умов підземної розробки корисних копалин, застосовувались методи математичної статистики.

Наукова новизна полягає в розробці технологічної схеми відпрацювання зближених покладів з зміцненням міжпластової товщі слабких порід шляхом стійкого склепінутворення. Встановлено нові залежності параметрів виймання пластів від товщі порід міжпласта та їх властивостей, розмірів склепінутворення і штучних стрічкових ціликів з породного масиву.

Практична значимість полягає в залученні додаткових запасів до виймання з зближених пластів, підвищенні ефективності і безпечності добування корисних копалин та збереження об'єктів, що підробляються. Впровадження запропонованої технології дає можливість значно покращити показники вилучення корисних копалин з зближених покладів, зберегти об'єкти інфраструктури та не відчужувати родючі землі.

Результати. Виконано аналіз сучасного стану відпрацювання паралельно зближених покладів корисних копалин підземним способом. Досліджені процеси склепінутворення в породах міжпластової товщі. Запропонована оригінальна гофроподібна просторова конструкція з порід міжпласта та штучних ціликів. Розроблена інноваційна технологія відпрацювання паралельно зближених пластів, яка забезпечує ефективність очисного виймання корисних копалин, стійкість конструктивних елементів системи та збереженість денної поверхні. Запропонований порядок визначення параметрів створення гофроподібної просторової підтримуючої конструкції з оточуючих порід в залежності від гірничо-геологічних умов щодо потужностей пластів, товщі порід між ними та їх властивостей, а також технічних характеристик гірничого обладнання, що застосовується. Впровадження результатів досліджень дозволяють вести безпечно та ефективно відпрацювання зближених покладів корисних копалин, збереження денної інфраструктури та невідчуження родючих земель.

Ключові слова: зближені поклади, схема відпрацювання, склепінутворення, гофроподібна підтримуюча конструкція, стійкість.

Kushnerev I.P., Kryvenko Yu.Yu., Maksimov I.I., Shepel' A.L., Kalinichenko V.A., Fedorenko S.A. Development of parallel adjacent mineral deposits

The purpose of the work is the research and development of an innovative technology for the development of parallel contiguous deposits, which ensures the efficiency of mineral extraction, the stability of the structural elements of the development system and the safety of the day surface.

Research methods. Analysis and generalization of existing technologies for developing adjacent deposits. Constructive modeling of the elements of the development system for adjacent layers and the order of their development. Analytical studies of the process of formation of arches in the interlayer strata of rocks during the excavation of the lower deposit. Methods of mathematical statistics were used to process the data and accept the values of mining and geometric parameters characteristic of the conditions of underground mining.

Scientific novelty. Development of a technological scheme for mining adjacent deposits with strengthening the thickness of weak rocks by forming a stable arch. New dependencies have been established for the parameters of extracting layers, the sizes of arches and artificial ribbon pillars from the rock mass.

Practical significance. Attracting additional reserves for extraction from adjacent layers, increasing the efficiency and safety of mining and preserving objects on the earth's surface. The introduction of the proposed technology can significantly improve the extraction of minerals from nearby deposits, store infrastructure facilities and not lose fertile lands.

Results. An analysis of the current state of development of parallel adjacent mineral deposits using the underground method was carried out. The processes of arch formation in rocks have been studied. An original spatial design of rocks between deposits and artificial pillars is proposed. An innovative technology for developing parallel seams has been developed, ensuring the efficiency of mining, the stability of the structural elements of the system and the preservation of the surface. A procedure has been proposed for determining the parameters for creating a spatial support structure from the surrounding rocks, depending on the mining and geological conditions regarding the thickness of the layers, the thickness of the rocks between them and their properties, as well as the technical characteristics of the mining equipment used. The implementation of research results allows for the safe and efficient development of nearby mineral deposits, the preservation of day-to-day infrastructure and the non-alienation of fertile lands.

Key words: contiguous deposits, mining scheme, vaults, supporting structure of the development system, stability.

УДК 621.8

Кравцова Д.Ю., Зюган У.І. Пошук оптимальних рішень для технічних систем в умовах невизначеності зі комп'ютеризацією розрахунків у табличному процесорі

Мета роботи полягає у розробці універсального шаблону в табличному процесорі для пошуку оптимального розмірного налаштування металорізного верстата для мінімізації кількості виробничого браку у партії деталей.

Методи дослідження. Вибірка зі ста розмірів навмання вибраних деталей із партії отримана емпірично шляхом проведення технічних вимірювань. Обчислення оптимального зміщення верстата виконано аналітичним способом зі застосуванням функцій та цифрових інструментів табличного процесору із метою комп'ютеризації та автоматизації розрахунків. Використані елементи математичної теорії оптимізації для складання цільової функції і формул для розрахунку оптимального зміщення.

Наукова новизна полягає у пошуку, визначенні, тестуванні та налагодженні роботи функцій та цифрових засобів візуалізації розрахунку табличного процесора з метою розробки універсальної таблиці для автоматизованого розрахунку оптимального розмірного зміщення металорізного обладнання, кількості виправного та невиправного виробничого браку і витрат на його усунення.

Практична значимість. В основі інженерної діяльності лежить процес оптимізації, як основний інструмент створення нових і вдосконалення вже розроблених технічних систем. Проблема полягає у відсутності комплексного підходу до вирішення оптимізаційних задач і демонстрації прикладів застосування теоретичного матеріалу у виробничому процесі. Висока практична значимість створеного шаблону полягає у значному скороченні часу на усунення виправного браку за рахунок його скорочення, зменшенні виробничих витрат, високому ступеню автоматизації розрахунків, відсутності необхідності придбання спеціалізованого програмного забезпечення та найму висококваліфікованого персоналу.

Формалізація та структуризація такого підходу до вирішення оптимізаційних завдань дозволить використовувати створені алгоритми для широкого спектра різних галузей виробництва, що посприє зміцненню економіки держави.

Результати. Отримана таблиця, яка після заповнення вибірки, граничних розмірів деталі за кресленням і витрат на 1% виправного і невивиправного браку автоматично розраховує величину оптимального зміщення центру угруповання вибірки від центру поля допуску, кількість виробничого браку і вартість на його усунення.

Ключові слова. Оптимізація, виробничий брак, налаштування верстата, витрати, автоматизація розрахунків, прибутковість виробництва, машинобудування, технологічний процес.

Kravtsova D., Ziuhan U. Search of optimum solutions for technical systems under conditions of uncertainty with computerization of calculations in a tablet processor

The purpose of the work is to develop a universal template in a spreadsheet for finding the optimal size setting of a metal cutting machine to minimize the amount of production defects in a batch of one hundred parts.

Research methods. A sample of one hundred sizes of randomly selected parts from the batch was obtained empirically by carrying out technical measurements. The calculation of the optimal displacement of the machine was performed analytically with the application of functions and digital tools of the spreadsheet processor for the purpose of computerization and automation of calculations. The elements of the mathematical theory of optimization are used to compile the target function and formulas for calculating the optimal displacement.

The scientific novelty consists in finding, determining, testing and debugging the functions and digital means of visualization of the table processor calculation in order to develop a universal table for the automated calculation of the optimal dimensional offset of metal-cutting equipment, the number of correctable and non-correctable production defects and the costs of their elimination.

Practical significance. The basis of engineering activity is the optimization process, as the main tool for creating new and improving already developed technical systems. The problem is the lack of a comprehensive approach to solving optimization problems and demonstrating examples of the application of theoretical material in the production process. The high practical importance of the created template consists in a significant reduction in the time to eliminate the correctable defect due to its reduction, a reduction in production costs, a high degree of automation of calculations, the absence of the need to purchase specialized software and the hiring of highly qualified personnel.

The formalization and structuring of such an approach to solving optimization tasks will allow the use of created algorithms for a wide range of different branches of production, which will contribute to the strengthening of the state's economy.

The results. The resulting table automatically calculates the optimal displacement of the center of the sample grouping from the center of the tolerance field, the amount of manufacturing defects and the cost of its elimination after filling in the sample, the limit sizes of the part according to the drawing and the cost of 1% of correctable and non-correctable defects.

Keywords. Optimization, production shortage, machine setting, costs, automation of calculations, production profitability, mechanical engineering, technological process.

УДК: 528.4:332.3

Радзінська Ю. Б., Багін М. Л., Гой В. В., Фролов В. О. Містобудівні чинники забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів: стан та напрями трансформацій

Метою статті є виокремлення містобудівних чинників щодо забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів. Для досягнення поставленої мети вирішуються наступні завдання: проаналізувати стан та тенденції змін містобудівних чинників; охарактеризувати містобудівні чинники забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Отже, представлена тема щодо визначення аналізу стану та трансформаційних процесів забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів є актуальною і має своєчасний характер.

Методи дослідження. У роботі застосовані загальнонаукові і спеціальні методи: систематизації, наукового обґрунтування, системного аналізу, виокремлення містобудівних чинників, оцінки.

Наукова новизна. Удосконалено теоретико-методичні підходи щодо визначення інвестиційної привабливості земель регіонів шляхом виокремлення відповідних чинників, зокрема містобудівних. Дістали подальшого розвитку результати оцінки містобудівних чинників для забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Практична значимість полягає у розробці та застосуванні кількісної основи щодо прийняття рішень для забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів та визначенні містобудівних чинників, які впливають на формування регіональної політики в сфері земельних відносин. Практична цінність дослідження обумовлена сучасними надзвичайними умовами, які визначаються зниженням ефективності використання земель, розбалансування зв'язків у системі земельних відносин, негативним впливом чинників, проведенням військових дій, обумовлюють формування напрямів та виокремлення особливостей забезпечення інвестиційної привабливості земель. Важливого значення набуває виокремлення чинників, що впливають на забезпечення інвестиційної привабливості, зокрема, у контексті формування та використання містобудівних факторів.

У результаті дослідження виокремлені містобудівні чинники, що впливають на інвестиційну привабливість земель регіонів. Встановлено, що за останні роки відбувається зниження основних показників функціонування будівельної сфери, що негативно впливають на забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів. Слід вказати на такий чинник як забудовані землі, який характеризується тенденціями до зниження у більшості регіонів. Містобудівні

чинники формують багаторівневу систему показників для розробки та реалізації кількісної основи методу до оцінки рівня забезпечення інвестиційної привабливості земель регіонів.

Ключові слова. Використання земель, інвестиційна привабливість земель, регіони, містобудівні чинники.

Radzinska Yu., Bahin M., Goi V., Frolov V. Urban planning factors ensuring investment attractiveness of regional lands: status and directions of transformations

The purpose of the article is to single out urban planning factors to ensure the investment attractiveness of the lands of the regions. To achieve the goal, the following tasks are solved: to analyze the state and trends of changes in urban planning factors; to characterize the urban planning factors ensuring the investment attractiveness of the lands of the regions.

Therefore, the presented topic regarding the determination of the analysis of the state and transformational processes of ensuring the investment attractiveness of the lands of the regions is relevant and has a timely character.

Research methods. The work uses general scientific and special methods: systematization, scientific substantiation, system analysis, identification of urban planning factors, evaluation.

Scientific novelty. The theoretical and methodological approaches to determining the investment attractiveness of the region's land have been improved by identifying the relevant factors, in particular urban planning factors. The results of the assessment of urban planning factors to ensure the investment attractiveness of the lands of the regions were further developed.

The practical significance lies in the development and application of a quantitative basis for decision-making to ensure the investment attractiveness of the lands of the regions and the determination of urban planning factors that influence the formation of regional policy in the field of land relations. The practical value of the study is determined by the modern emergency conditions, which are determined by the decrease in the efficiency of land use, the imbalance of ties in the system of land relations, the negative influence of factors, the conduct of military operations, which determine the formation of directions and the identification of features of ensuring the investment attractiveness of land. The identification of factors that influence the provision of investment attractiveness becomes important, in particular, in the context of the formation and use of urban planning factors.

As a result of the study, urban planning factors affecting the investment attractiveness of the lands of the regions were singled out. It has been established that in recent years there has been a decrease in the main indicators of the functioning of the construction sector, which negatively affects the investment attractiveness of the lands of the regions. It should be pointed out such a factor as built-up land, which is characterized by downward trends in most regions. Urban planning factors form a multi-level system of indicators for the development and implementation of the quantitative basis of the method for assessing the level of ensuring the investment attractiveness of the lands of the regions.

Keywords: land use, investment attractiveness of land, regions, urban planning factors.

УДК 691.32

Астахова Н. В., Астахов В. І. Захисні властивості шлакопемзобетону та шлакобетону по відношенню до сталевій арматури

До умов, які забезпечують експлуатаційну надійність бетону конструкцій даху, відносять комплекс технологічних заходів, спрямованих на раціональний вибір вихідних матеріалів, застосування оптимальних режимів формування та твердіння, що сприяють отриманню структури бетону підвищеної щільності, низької капілярної пористості, з замкнутим характером пор.

Мета. Отримання модифікованих шлакобетону і шлакопемзобетону для конструкцій даху з безрулонною покрівлею і теплиморищем, які мають захисні властивості відносно укладеної в них сталевій арматури.

Методи дослідження. У якості основних методів досліджень була використана методика оцінки пасивності сталевій арматури, яка була розроблена в центральній лабораторії корозії науково-дослідного інституту залізобетону. Також використовувалась стандартна методика поперемінного зволоження-висушування пропарених зразків.

Наукова новизна. Розроблені шлакопемзобетон та шлакобетон раціонального модифікованого складу, які мають захисні властивості відносно укладеної в них сталевій арматури.

Практичне значення. Отримані шлакопемзобетон та шлакобетон раціональних модифікацій, які мають захисні властивості щодо укладеної в них сталевій арматури. Ці властивості є дуже важливими для бетону на шлакових матеріалах теплоізоляційно-конструктивного призначення, який використовується в конструкціях даху з безрулонною покрівлею та теплиморищем.

Результати. Встановлено, що шлакопемзобетон і шлакобетон наведених раціональних модифікацій після теплової обробки забезпечують пасивацію арматури. Щільність струму при потенціалі +300 мВ не перевищує 9 мкА/см², тобто – менше верхньої межі, що відповідає пасивному стану сталі – 10 мкА/см².

Після трьох місяців тимчасового зволоження - висушування зразків кожного з трьох досліджуваних видів бетону слідів корозійного ураження сталі в них не виявлено; щільність струму при потенціалі +300 мВ для зразків шлакопемзобетону ШП 12; ШП 22 та шлакобетону ГШП, відповідно, склала 6,8, 6 та 7 мкА/см², що виключає кородування сталі в бетоні.

Ключові слова: відходи ГЗК, мелений гранульований шлак, шлакопемзобетон, шлакобетон, сталева арматура.

Astakhova N. V., Astakhov V. I. Protective properties of slag and pumice concrete and slag concrete towards steel reinforcement

Conditions that ensure the operational reliability of roof structure concrete include a set of technological measures aimed at rational selection of initial materials, the use of optimal modes of forming and hardening, which contribute to obtaining a concrete structure with increased density, low capillary porosity and closed porosity.

Objective. Production of modified slag concrete and slag and pumice concrete for non-roll roof structures and a warm attic, which possess protective properties towards steel reinforcement encased in them.

Research methods. The main research methods include the technique for assessing passivity of steel reinforcement developed in the Central Laboratory of Corrosion at the Reinforced Concrete Research Institute, as well as the standard methods of alternating steamed samples wetting-drying.

Scientific novelty. Slag and pumice concrete and slag concrete of a rational modified composition have been developed, which have protective properties towards steel reinforcement encased in them.

Practical significance. The obtained slag and pumice concrete and slag concrete of rational modifications have protective properties towards steel reinforcement encased in them, which are significant for slag-based concretes intended for thermal insulation and the use in non-roll roof structures and a warm attic.

Results. It has been established that after steam treatment slag and pumice concrete and slag concrete of the above rational modifications provide passivation of reinforcement. Current density at a potential of +300 mV does not exceed $9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, i.e. it is less than the upper limit and corresponds to the passive state of steel – $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$.

After three months of temporary wetting-drying, samples of each of the three types of concrete under study demonstrate no traces of corrosion of steel. For samples of slag and pumice concrete ШП 12; ШП 22 and slag concrete ГШП, current density at a potential of +300 mV makes 6.8, 6 and $7 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, respectively, which excludes corrosion of steel in concrete.

Keywords: mining and processing waste, ground granulated slag, slag and pumice concrete, slag concrete, steel reinforcement.

УДК 622.271

Григор'єв Ю.І., Луценко С.О., Бровко Д.В., Баранов І.В., Жуков С.О. Адаптація кінцевих контурів кар'єрів №2-біс та №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в умовах динаміки гірничо-геологічних факторів

Основна мета дослідження полягає в науковому обґрунтуванні і подальшій адаптації проектних положень гірничих робіт кар'єрів №2-біс та №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» відповідно до оновлених гірничо-геологічних даних.

Методами дослідження є ретроспективний, компаративний та каузальний аналіз невідповідностей положень гірничих робіт до актуальних гірничо-геологічних даних, а також гірничо-геометричний аналіз фактичного і проектного положень гірничих робіт.

Наукова новизна дослідження полягає в установленні динаміки неузгодженості головних параметрів відкритих гірничих робіт до змін гірничо-геологічних факторів.

Практичне значення полягає у встановлення фактичної невідповідності кутів відкосів неробочих бортів кар'єрів до фізико-механічних властивостей масиву порід з подальшим усуненням даних неузгодженостей шляхом проектування кінцевих контурів гірничих робіт на засадах динамічного проектування.

Результати. В роботі виконано ретроспективний аналіз проектних рішень щодо розвитку відкритих гірничих робіт на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», а також сучасного їх стану. На підставі виконаного авторами аналізу невідповідностей головних параметрів відкритих гірничих робіт фізико-механічним властивостям порід було проведено геомеханічні розрахунки стійкості породного масиву і визначено безпечні кути відкосів уступів і бортів кар'єрів. На базі проведених розрахунків геомеханічної стійкості масивів гірських порід було виявлено можливі зони оптимізації кінцевих контурів гірничих робіт шляхом зменшення ширини берм та збільшення кутів відкосів уступів. В результаті динамічного проектування кінцевих контурів кар'єру №2-біс та №3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» було обґрунтовано прирощення запасів залістистих кварцитів на 5,2 млн т і на 22,1 млн т відповідно при зменшенні середнього коефіцієнту розкриття.

Таким чином, було науково обґрунтовано перспективи подальшого сталого розвитку гірничо-видобувного підприємства із безпечним розвитком мінерально-сировинної бази за рахунок впровадження підходів динамічного проектування головних параметрів кар'єрів.

Ключові слова: кар'єр, кут відкосу борта кар'єру, запаси корисних копалин, динамічне проектування.

Hryhoriev Y.I., Lutsenko S.O., Brovko D.V., Baranov I.V., Jukov S.O. Adaptation of final contours of open-pits №2-bis and №3 PJSC "ARCELORMITTAL KRYVYI RIH" for the conditions of the dynamics of mining and geological factors

The main purpose of the study is the scientific substantiation and further adaptation of the design positions of the mining operations of open-pits №2-bis and №3 of PJSC "ARCELORMITTAL KRYVYI RIH" to the updated mining and geological data.

Methodology. The research methods are retrospective, comparative and causal analysis of inconsistencies of the position of mining works with actual mining and geological data, as well as mining-geometrical analysis of the actual and design contours of mining works.

The scientific novelty of the study consists in establishing the dynamics of inconsistency of the main parameters of open-pit mining operations to changes in mining and geological factors.

Practical significance: establishment of the actual inconsistency of the angles of the slopes of the non-working walls of the open-pits to the physical and mechanical properties of the massif of rocks, followed by the elimination of these inconsistencies by designing the final contours of mining operations on the basis of dynamic design.

Results. In the paper, a retrospective analysis of project decisions regarding the development of open-pit mining operations at "ArcelorMittal Kryvyi Rih" PJSC, as well as their current state, is performed. On the basis of the authors' analysis of the inconsistencies between the main parameters of open pit mining operations and the physical and mechanical properties of rocks, geomechanical calculations of the stability of the rock massif were carried out and the safe angles of slopes of benches and walls of open-pits were determined. Based on the calculations of the geomechanical stability of rock massifs, possible areas of optimization of the final contours of mining operations by reducing the width of the berms and increasing the angles of the slopes of the ledges were identified. As a result of the dynamic design of the final contours of open-pit № 2-bis and № 3 of «ArcelorMittal Kryvyi Rih» PJSC, the increase in reserves of ferruginous quartzite by 5.2 million tons and by 22.1 million tons, respectively, with a decrease in the average overburden ratio was substantiated.

Thus, the prospects for the further sustainable development of the mining enterprise with the safe development of the mineral and raw material base due to the introduction of dynamic design approaches of the main parameters of open-pits were scientifically well-founded.

Key words: open-pit, angle of slope of the open-pit wall, reserves of minerals, dynamic designing.

УДК 622.342.: 622.276

Ткаченко Г. І., Ковальчук Т. М., Михайленко М. В. Вплив якості подрібненої гірничої маси на ефективність технологічних процесів на кар'єрах Кривбасу

Мета. Метою даної роботи є розроблення методики, яка дозволяє оперативно встановлювати залежність виробничих витрат на основні технологічні процеси гірничо-добувного виробництва від оптимального середнього розміру куска підірваної гірничої маси. Враховуючи те, що інтегральним показником кускуватості або гранулометричного складу є середній розмір куска гірничої маси в розвалі, використання даної методики дозволяє спрогнозувати та підвищити ефективність буро вибухових робіт на кар'єрах шляхом зниження витрат на виконання вантажно-транспортних робіт і додаткового подрібнення.

Методи дослідження. Поставлені в статті завдання базуються на комплексному методі досліджень, що включає: аналіз науково дослідних робіт по буро вибуховим роботам на залізрудних кар'єрах Кривбасу та їх моніторингу; результати інженерно-геологічних вишукувань залізрудного родовища, використання емпіричних законів вибухових робіт; комп'ютерні технології й обчислювальні програми; оброблення результатів досліджень.

Наукова новизна дослідження полягає в комплексному підході до розроблення методики, яка дозволяє оперативно встановлювати емпіричні залежності виробничих питомих витрат на основні технологічні процеси в залізрудному кар'єрі від оптимального середнього розміру куска підірваної гірничої маси. Доведено, що залежність суми питомих витрат на реалізацію розглянутих технологічних процесів від кускуватості має вигляд параболічної функції, точкою екстремуму якої є оптимальний діаметр середнього розміру куска підірваної гірничої маси.

Практичне значення. Отримані емпіричні залежності питомих витрат на: буро вибухові роботи; руйнування негабариту; на екскавацію; на транспортування від середнього розміру куска підірваної гірничої маси дозволяють доповнити існуючі практичні рекомендації та надають реальні передумови щодо оптимізації технологічних процесів на кар'єрах Кривбасу.

Результати. Розроблено методику оперативного встановлення залежностей витрат на основні технологічні процеси гірничо-добувного виробництва від оптимального середнього розміру куска підірваної гірничої маси, яка спрямована на підвищення ефективності буро вибухових робіт на кар'єрах шляхом зниження витрат на виконання вантажно-транспортних робіт і додаткового подрібнення.

Ключові слова: відкриті гірничі роботи, вибухові роботи, подрібнення негабариту, кускуватість, питомих витрати, середній розмір куска підірваної гірничої маси

Tkachenko G. I., Kovalchuk T. M., Mihaylenko M. V. The influence of the quality of crushed rock mass on the efficiency of technological processes in the quarries of Krivbass

Purpose. The purpose of this work is to develop a methodology that allows for promptly establishing the dependency of production costs on the main technological processes of mining production on the optimal average size of the blasted rock mass. Considering that the integral indicator of fragmentation or particle size distribution is the average size of the rock mass fragment in the blast, the use of this methodology allows for forecasting and increasing the efficiency of drilling and blasting operations in quarries by reducing the costs of load and haul operations and additional fragmentation.

Methods of research. The tasks outlined in the article are based on a comprehensive research methodology, which includes: analysis of scientific research on drilling and blasting operations in the Kryvyi Rih Basin quarries and their monitoring; results of engineering-geological surveys of iron ore deposits, utilization of empirical laws of blasting operations; computer technologies and computational programs; processing of research results.

Scientific novelty. The research involves the development of a methodology that allows for promptly establishing empirical dependencies of production costs on the main technological processes in an iron ore quarry on the optimal average size of the blasted rock mass.

Practical value. The obtained empirical dependencies of specific costs on: drilling and blasting operations; oversized material fragmentation; excavation; transportation from the average size of the blasted rock mass fragment allow for supplementing existing practical recommendations and provide real prerequisites for optimizing technological processes in the Kryvyi Rih Basin quarries.

Results. A methodology has been developed for promptly establishing dependencies of costs on the main technological processes of mining production on the optimal average size of the blasted rock mass, aimed at increasing the efficiency of drilling and blasting operations in quarries by reducing the costs of load and haul operations and additional fragmentation.

Keywords: open-pit mining; drilling and blasting operations; fragmentation; particle size distribution; specific costs; average size of the blasted rock mass fragment.

УДК 62-192:621.333

Воронцов І.В., Данилейко О.К., Коломіц Г.В. Розробка енергоефективної системи штучного освітлення головного корпусу Криворізького національного університету

Забезпечення якісного освітлення для нормальної роботи в приміщеннях університету є обов'язковим. Ефективне функціонування систем освітлення потребує розробки оптимальної системи керування, яка повинна відповідати потребам навчального закладу. В університеті передбачено фінансування розробки енергоефективного, надійного та якісного освітлення.

Проведено поточний аналіз діючої системи освітлення відповідно до норм і вимог КНУ. Діюча система освітлення Криворізького національного університету є застарілою. Тому було розроблено проект модернізації існуючої системи освітлення, який відповідає нормам.

Для впровадження оптимальної енергоефективної системи управління штучним освітленням був проведений аналіз діючої системи штучного освітлення КНУ.

Мета. Розробка нової енергоефективної системи освітлення головного корпусу КНУ.

Методи дослідження. Провести заміну застарілого фонду світлотехнічного обладнання; провести заміну схем живлення освітлювальних приладів; встановити окремий лічильник на систему живлення штучного освітлення та встановити апарати захисту на відповідні лінії джерел штучного освітлення. Обрання мікрохвильових датчиків присутності на основі ефекту Доплера та рівня освітлення в приміщенні.

Наукова новизна. Впровадження розробленої системи АСУ для систем освітлення КНУ. Дослідження процесів та схеми комутації в системах штучного освітлення, можливості одночасної роботи декількох датчиків присутності у головному корпусі Криворізького національного університету.

Практична значимість. Впровадження нової енергоефективної системи штучного освітлення головного корпусу Криворізького національного університету.

Результати. Зроблено аналіз системи освітлення головного корпусу Криворізького національного університету. В роботі було розглянуто можливість використання мікрохвильових датчиків для можливих варіантів побудови САУ. Досліджено ефективність використання САУ, зі врахуванням існуючих потреб. Розроблено та налагоджено пристрій керування для потреб головного корпусу КНУ. На основі проведених теоретичних та практичних досліджень роботи САУ сформовано рекомендації для модернізації діючої системи освітлення.

Ключові слова. Енергоефективність, система освітлення, схемотехнічні рішення, якість освітлення, економічність, світлотехнічне обладнання.

Vorontsov I.V., Danyleiko O.K., Kolomits H.V. Development of an energy-efficient artificial lighting system of the main building of Kryvyi Rih national university

Abstract. Providing high-quality lighting for normal work in the premises of the university is mandatory. Effective functioning of lighting systems requires the development of an optimal control system that must meet the needs of the educational institution. The university provides funding for the development of energy-efficient, reliable and high-quality lighting.

A current analysis of the current lighting system was carried out in accordance with the norms and requirements of KNU. The current lighting system of Kryvyi Rih National University is outdated. Therefore, a project was developed to modernize the existing lighting system, which meets the standards.

In order to implement the optimal energy-efficient artificial lighting management system, an analysis of the current artificial lighting system of KNU was carried out.

Goal. Development of a new energy-efficient lighting system for the main building of KNU.

Methods. To replace the outdated stock of lighting equipment; to replace the power circuits of lighting devices; install a separate meter on the artificial lighting power system and install protection devices on the corresponding lines of the artificial lighting sources. Selection of microwave presence sensors based on the Doppler effect and the level of illumination in the room.

Scientific novelty. Implementation of the developed ACS system for KNU lighting systems. Research of processes and switching schemes in artificial lighting systems, the possibility of simultaneous operation of several presence sensors in the main building of Kryvyi Rih National University.

Practical significance. Implementation of a new energy-efficient artificial lighting system of the main building of Kryvyi Rih National University.

The results. An analysis of the lighting system of the main building of Kryvyi Rih National University was carried out. The paper considered the possibility of using microwave sensors for possible design options of the automation system. The effectiveness of the use of automatic control systems was studied taking into account the existing needs. A control device was developed and adjusted for the needs of the main building of the KhNU. Based on the conducted theoretical and practical studies of the operation of the ACS, recommendations were made for the modernization of the current lighting system.

Keywords. Energy efficiency, lighting system, schematic solutions, lighting quality, economy, lighting equipment.

УДК 622.7

Олійник Т.А., Вільгельм М.М. Дослідження умов формування оптимального живлення оберненої флотації магнетиту

Мета. Метою даних досліджень є оцінка можливості формування оптимального живлення оберненої флотації магнетиту. Огляд існуючих досліджень у цьому напрямку для вирішення даної проблеми. Проведення глибокого мінералого-петрографічного вивчення явища флокуляції для вирішення поставленої мети.

Методи дослідження. При проведенні досліджень застосовувались наступні методи: наукове вивчення та узагальнення матеріалу в рамках існуючої проблеми; експериментальні – мінералого-петрографічне вивчення механізмів флокуляції, мінерального складу продуктів; теоретичні - доцільність застосування існуючих методів збагачення для зменшення явища флокуляції та підвищення технологічних характеристик продуктів.

Наукова новизна. У ході мінералого-петрографічних досліджень встановлено залежності кількості флокул по класам крупності та виконана можливість впливу зниження явища флокуляції на вміст заліза. Визначені залежності надають можливість їх використання у якості вихідних даних для створення математичних моделей.

Практичне значення. В рамках досліджень отримані наступні дані:

максимальна кількість флокул знаходиться у класах крупності $-0,04+0,02$ мм та $-0,02$ мм відповідно: 98% та 99% - у живленні флотації та 92% та 99% - у пінному продукті;

максимальна частка заліза сконцентрована у дрібних класах крупності $-0,04+0,02$ мм та $-0,02$ мм: живлення флотації – 46,5% / 64,6%; пінний продукт – 24,4% / 48,7%;

за рахунок введення операцій розмагнічування та тонкого грохочення очікується підвищення виходу концентрату на 2-4% та масової частки заліза на 0,7-0,9%.

Використання наведених даних в якості даних для математичного моделювання та розробки дозволяє на даному етапі спрогнозувати майбутню доцільність.

Практична значущість також може бути оцінена внаслідок проведення промислових випробувань, з використанням однієї операції розмагнічування, або в комбінації з тонким грохоченням та отриманням натурних технологічних показників.

Результати. В рамках досліджень проведено детальне вивчення явища флокуляції. Отримані результати підтверджують доцільність застосування додаткових методів збагачення для підготовки сировини для флотаційного доведення та розробки нових схем з отриманням продукції з підвищеними якісними характеристиками. Дані отримані в ході дослідження є основою для побудови математичних моделей.

Ключові слова: живлення флотації, продукт пінний, мінеральний склад, флокули, флотація.

Oliinyk T.A., Vilhelm M.N. Research of the conditions for the formation of optimal feed of reverse flotation of magnetite

Purpose. The aim of this study is to assess the possibility of forming an optimal feed for reverse magnetite flotation. Review of existing studies in this area to solve this problem. Conducting a deep mineralogical and petrographic study of the flocculation phenomenon to achieve this goal.

Research Methods. The following methods were used in the research: scientific study and generalization of the material within the framework of the existing problem; experimental - mineralogical and petrographic study of flocculation mechanisms, mineral composition of products; theoretical - expediency of using existing beneficiation methods to reduce the flocculation phenomenon and improve the technological characteristics of products.

Scientific novelty. Experimental studies have established the effect of preparing the froth product using a magnetic field before subsequent enrichment operations. The conformity of the froth product to the wet froth with spherical bubbles was revealed. The regularity of increasing the technological parameters of the froth product by reducing the coagulation of particles under the influence of a magnetic field was established. The identified correspondences and regularities make it possible to use them as input data for creating a mathematical model.

Practical value. The following data were obtained as part of the research:

the maximum number of flocs is in the size classes $-0.04+0.02$ mm and -0.02 mm, respectively: 98% and 99% in the flotation feed and 92% and 99% in the froth product;

the maximum proportion of iron is concentrated in the small size classes of $0.04+0.02$ mm and -0.02 mm: flotation feed - 46.5% / 64.6%; froth product - 24.4% / 48.7%;

due to the introduction of demagnetization and fine screening operations, it is expected to increase the concentrate yield by 2-4% and the mass fraction of iron by 0.7-0.9%.

The use of the above data as data for mathematical modeling and development allows us to predict future feasibility at this stage.

The practical significance can also be assessed by conducting industrial tests using a single demagnetization operation, or in combination with fine screening and obtaining full-scale technical indicators.

Results. As part of the research, a detailed study of the flocculation phenomenon was carried out. The obtained results confirm the feasibility of using additional beneficiation methods to prepare raw materials for flotation refinement and develop new schemes for obtaining products with improved quality characteristics. The data obtained during the study are the basis for the construction of mathematical models.

Key words: flotation feed, froth product, mineral composition, flocs, flotation.

УДК 681.5:[622.73:622.69]

Швец Д. В., Швец В. В. Автоматичне керування циклом подрібнення залізної руди з урахуванням часу транспортного переміщення потоку сировини

Мета. Розробити спосіб автоматичного керування процесом мокрого подрібнення залізної руди в кульовому млині, що працює в замкнутому циклі зі спіральним класифікатором, з урахуванням часу транспортного запізнення частини потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора, який може бути використаний на рудозбагачувальних фабриках чорної металургії при збагаченні магнетитових руд.

Методи досліджень. У статті використано поєднання огляду літератури та патентного аналізу, проведено аналіз переваг і недоліків існуючих методів автоматичного керування процесом мокрого подрібнення залізної руди.

Наукова новизна. Запропоновано спосіб автоматичного керування процесом мокрого подрібнення вхідної руди в кульовому млині, що працює в замкнутому циклі зі спіральним класифікатором, з урахуванням часу транспортного запізнення частини потоку вихідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора, що може бути використана на рудозбагачувальних фабриках чорної металургії при збагаченні магнетитових руд.

Практична значимість. Розроблений спосіб автоматичного керування одностадійним циклом мокрого подрібнення з урахуванням часу транспортного запізнення частини потоку вхідної руди дозволить стабілізувати вміст заліза на виході першої стадії магнітної сепарації, що, в свою чергу, підвищить якість кінцевого продукту рудозбагачувальної фабрики – залізорудного концентрату.

Результати. В ході досліджень розроблено спосіб автоматичного керування процесом мокрого подрібнення залізної руди в кульовому млині, що забезпечує внесення до блоку керування попередньо встановленого значення часу транспортного переміщення (запізнення) частини потоку вхідної руди від моменту її завантаження в кульовий млин до моменту підходу до зливу класифікатора, який формує керуючий сигнал на виконавчий механізм засувки, якою подають воду і коригують задане значення крупності зливу класифікатора з урахуванням зазначеного часу транспортного запізнення вхідної руди.

Ключові слова: залізна руда, автоматизація, транспортне запізнення, подрібнення і класифікація, міцність руди.

Shvets D.V., Shvets V.V. Automatic control of iron ore grinding cycle based on transportation time of raw material flow

Purpose. To develop a method of automatic control of the process of wet grinding of iron ore in a ball mill operating in a closed cycle with a spiral classifier, with consideration of transport delay of a part of the feed ore flow from the moment of its loading into the ball mill to the moment of approaching the classifier drain, which can be used in ore dressing plants of ferrous metallurgy for the beneficiation of magnetite ores.

Research methods. In the article, a combination of literature review and patent analysis is used to analyze the advantages and disadvantages of existing methods of automatic control of the process of iron ore wet grinding.

Scientific novelty. A method of automatic control of the feed ore wet grinding process in a ball mill operating in a closed cycle with a spiral classifier, accounting for the transport delay of a part of the feed ore flow from the moment of its loading into the ball mill to the moment of approaching the classifier drain, is proposed, which can be used in ore dressing plants of ferrous metallurgy for the beneficiation of magnetite ores.

Practical significance. This method of automatic control of a one-stage wet grinding cycle, accounting for the transport delay time of a part of the incoming ore flow, will allow stabilizing the iron content at the outlet of the first stage of magnetic separation, which will improve the quality of the final product of the ore dressing plant - iron ore concentrate.

Results. In the course of the research, a method of automatic control of the iron ore wet grinding process in a ball mill has been developed, which ensures the introduction of a pre-set value of the time of transport movement (delay) of a part of the flow of the initial ore from the moment of its loading into the ball mill to the moment of approaching the classifier drain, which generates a control signal to the actuator of the gate valve, which supplies water and corrects the set value of the classifier drain size accounting the specified time of transport delay.

Keywords: iron ore, automation, transport delay, grinding and classification, ore strength.

УДК 622.2

Шепель О.Л. Актуальний стан проблеми переходу з видобутку корисних копалин відкритим способом на технології комбінованого відкрито-підземного та підземного видобутку залізорудної сировини

Мета. Метою даної роботи є обґрунтування переходу з техногенно-деструктивних, екологічно небезпечних технологій відкритої на відкрито-підземну та підземну технології розробки родовищ корисних копалин.

Методи дослідження. Використані наступні методи: аналіз практичного досвіду роботи ряду закордонних рудників з комбінованим відкрито-підземним способом розробки родовищ; аналіз та узагальнення літературних джерел в області проблем подальшого розвитку техногенно-деструктивних, екологічно небезпечних технологій видобутку магнетитових кварцитів відкритим способом; проведено дослідження проблеми переходу з видобутку корисних копалин відкритим способом на технології комбінованого відкрито-підземного та підземного видобутку залізорудної сировини; методи аналізу.

Наукова новизна. Встановлено, що при видобуванні з надр корисних копалин змінюється напружено-деформований стан гірських порід. Це впливає на процеси зрушення гірських масивів, при яких зміщення можуть досягати верхніх горизонтів і проявитися у вигляді деформацій елементів кар'єрного поля. Такі зміщення можуть призводити до руйнування промислових і цивільних об'єктів. Встановлено, що всі підприємства, які розпочали відпрацювання запасів відкритим способом, проводять у життя технічну політику планомірного переходу від відкритих гірничих робіт до підземних гірничих робіт, створюючи на родовищах, що відпрацьовуються, єдині геотехнологічні системи «кар'єр-шахта».

Практична значимість. Полягає на обґрунтуванні принципів вирішення проблеми раціонального використання сировинної бази Кривбасу, що базуються на технологіях комбінованого видобутку залізорудної сировини та можливості утилізації відходів гірничого виробництва у виробленому просторі шахт.

Результати. В результаті виконаного аналізу літературних джерел встановлено, що у світовій практиці є стійка тенденція переходу з техногенно-деструктивних технологій відкритого видобутку залізорудної сировини на сучасні екологічно безпечні технології відкрито-підземної та підземної розробки корисних копалин, особливо в районах, що характеризуються несприятливими умовами для відкритих гірничих робіт. В роботі зазначено, що відпрацювання родовищ комбінованим способом дозволяє знизити рівень екологічних збитків від відкритих гірничих робіт з одночасним підвищенням ефективності підземних робіт.

Ключові слова: технологія, аналіз, відкрито-підземний, відпрацювання, комбінована розробка, руда.

Shepel O.L. Actual state of the problem of transition from open-pit mining to technologies of combined open-pit and underground mining of iron ore raw materials

Purpose. The purpose of this work is to substantiate the transition from technogenic-destructive, ecologically dangerous technologies of open to open-underground and underground technologies working of mineral deposits.

Research methods. The following methods were used: analysis of the practical experience of a number of foreign mines with a combined open-pit and underground mining method of deposit; analysis and generalization of literary sources in the field of problems of further development of technogenic-destructive, ecologically dangerous technologies of magnetite quartzite extraction by open method; a study of the problem of transition from open-pit mining to technologies of combined open-pit and underground mining of iron ore raw materials was conducted; methods of analysis.

Scientific novelty. It has been established that the stress-strain state of rocks changes when minerals are extracted from the subsoil. This affects the processes of shifting of rocks massifs, in which the displacements can reach the upper horizons and manifest themselves in the form of deformations of the elements of the quarry field. Such displacements can lead to the destruction of industrial and civilian objects. It has been established that all enterprises that have begun working out reserves in an open-pit way are implementing a technical policy of planned transition from open-pit mining to underground mining, creating unified geotechnological systems of «quarry-mine» on the deposits being worked out.

Practical significance. It consists in substantiating the principles of solving the problem of rational use of the raw material base of Kryvyi Rih, which are based on the technologies of combined extraction of iron ore raw materials and the possibility of disposal mining waste in the produced mine space.

Results. As a result of the analysis of literary sources, it was established that in world practice there is a steady trend of transition from technogenic-destructive technologies of open-pit extraction of iron ore raw materials to modern ecologically safe technologies of open-pit and underground mining of mineral, especially in areas characterized by unfavorable conditions for open-pit mining. It is specified in the work that working out the deposits in a combined way allows to reduce the level of environmental damage from open pit mining while simultaneously increasing the efficiency of underground operations.

Key words: technology, analysis, open-underground, development, combined mining, ore.

УДК 004.94

Шимко В.А., Сліпич О.О. Використання інноваційних рішень та VR-технологій в архітектурно-будівельному проектуванні та будівництві

Мета. Метою даної роботи є визначення сучасних засобів цифрової інформації та моделювання, що дозволять більш ефективно співпрацювати фахівцям різних напрямків на різних етапах архітектурно-будівельного проектування та безпосередньо під час будівництва об'єкту.

Методи дослідження. При виконанні даної роботи були використовані систематизація, структурний та порівняльний аналіз, теоретичне узагальнення даних, отриманих при детальному аналізі літературних, статистичних джерел та інтернет-ресурсів, натурних обстеженнях об'єктів. При натурних обстеженнях застосовані методи фотофіксації.

Наукова новизна. Архітектурно-будівельне проектування та будівництво в цілому передбачає тісну співпрацю великої кількості учасників між собою: проектувальників, будівельників-підрядників, замовників, інспекторів різних служб та відомств тощо. Саме тому актуальним завданням, вирішенням якого стане суттєве покращення взаємодії цих фахівців, є використання цифрових інноваційних засобів та VR-технологій в процесі архітектурно-будівельного проектування та будівництва.

Практична значимість. Досвід архітектурно-будівельного проектування та будівництва різних об'єктів показує, що використання сучасних інноваційних цифрових засобів та технологій є ефективною технічною допомогою фахівцям, як в процесі створення нових об'єктів, так і під час їх реконструкції, а також сприяє значному зменшенню інженерних помилок та колізій в цих процесах. Результати роботи можуть бути широко впроваджені на різних етапах архітектурно-будівельного проектування та під час будівництва.

Результати. Проаналізовано сучасний стан та основні напрямки вдосконалення архітектурно-будівельного проектування та будівництва з активним застосуванням інноваційних цифрових технологій. Показані переваги та недоліки використання різних видів цифрових платформ та програмних комплексів для покращення взаємодії всіх учасників процесу проектування та будівництва. Визначені напрямки співпраці проектувальників та IT-фахівців по створенню більш ефективного програмного застосування (додатку) VR-туру, розрахованого на багато користувачів.

Ключові слова: архітектурно-будівельне проектування, BIM-технології, VR-технології, розрахований на багато користувачів VR-тур, Unreal Engine, Pixel Streaming, кросплатформність.

Shymko V.A., Slipich A.A. The use of innovative solutions and VR-technologies in architectural design and construction

Objective. The purpose of this work is to select such modern digital information and modeling tools that will allow specialists from different fields to collaborate more effectively at different stages of architectural and construction design and directly during the construction of the facility.

Research Methods. When performing this work, systematization, structural and comparative analysis, theoretical generalization of data obtained from a detailed analysis of literary, statistical sources and Internet resources, and field surveys of objects were used. During field surveys, photographic recording methods were used.

Academic novelty. Architectural and construction design and construction in general involves close cooperation between a large number of participants: designers, builders, contractors, customers, inspectors of various services and departments, etc. That is why an urgent task, the solution of which will be a significant improvement in the interaction of these specialists, the use of digital innovative tools and VR-technologies in the process of architectural and construction design and construction.

Practical implications. The experience of architectural and construction design and construction of various facilities shows that the use of modern innovative digital tools and technologies is effective technical assistance to specialists, both in the process of creating new facilities and during their reconstruction, and also helps to significantly reduce engineering errors and collisions in these processes. The results of the work can be widely implemented at different stages of architectural and construction design and construction.

Results. The current state and main directions for improving architectural and construction design and construction with the active use of innovative digital technologies are analyzed. The advantages and disadvantages of using various types of digital platforms and software systems to improve the interaction of all participants in the design and construction process are presented. The areas of cooperation between designers and IT-specialists to create a more effective multi-user VR-tour software application (application) have been identified.

Keywords: low-rise housing, prefabricated buildings, prefabricated buildings, technological erection parameters, prefabricated or modular buildings, container buildings, transformed buildings, 3D printing technologies in building.

УДК 622.235:622.271

Тітов Д.А. Теоретична база обґрунтування збалансованого енергонасичення породного масиву підриванням комбінованих свердловинних зарядів

Мета. Основною метою даної статті є добір надійних й адекватних аналітичних методів та способів їх експериментальної перевірки для комплексного і системного дослідження фізичних процесів, які відбуваються при вибуховому руйнуванні скельних порід свердловинними зарядами спеціальних конструкцій, в цілях забезпечення збалансованого розподілу вибухової енергії в породному масиві, який підривається, максимально відповідно до змінних фізико-механічних характеристик скельних порід в окремих локальних зонах вибухового блоку.

Методи дослідження – порівняльний аналіз сучасних, надійно апробованих імітаційних та математичних моделей геомеханічних процесів. Критерієм придатності при цьому слугувала максимальна адекватність методів щодо зав-

дання точного визначення повного тензора напружено-деформованого стану порід за умов динамічного напруження вибухом породного масиву складної структури на відкритих розробках для наступного відбору методів, найбільш придатних для цілей дослідження.

Наукова новизна матеріалу статті полягає в системному підході щодо обґрунтування теоретичної бази збалансованого енергонасичення породного масиву підриванням комбінованих свердловинних зарядів і відповідних їм засобів, заходів та технічних рішень.

Практична значимість. Представлений методологічний підхід та його подальший розвиток цілком придатні для формулювання змісту подібних за напрямком досліджень та їх планування, сприяючи вирішенню задач зниження собівартості мінеральної продукції за рахунок підвищення ефективності буро-підривних робіт у залізорудному кар'єрі.

Результати. На підставі виконаного аналізу сформовано комплекс науково-методологічних підходів як інструментарію для базових теоретичних і експериментальних вишукувань, застосування яких забезпечує визначене автором уточнення механізму створення і розвитку динамічного навантаження скельного масиву вибухом для наступної розробки й обґрунтування надійних методів управління даним процесом шляхом координованого в просторі та часі короткоуповільненого підривання груп свердловинних зарядів спеціальних конструкцій. При цьому враховуються структурні закономірності та локальні аномалії масиву, анізотропія його властивостей, зміна стану тощо. Тільки достовірно знаючи системно значимі часові та просторові характеристики породного масиву, можна адекватно моделювати динамічні його еволюції та розробити достатньо обґрунтовані теоретично відповідні математичні моделі з алгоритмом їх прикладного використання, які є реально придатними до впровадження в практику відкритих розробок.

Ключові слова: кар'єр, гірська порода, вибухове руйнування, вибух, породний масив, напруження, деформації, свердловинні заряди.

Titov D.A. The reasoning of the theoretical basis regarding balanced energy saturation of rock massive by detonation of combined borehole charges

Purpose. The main goal of this article is the selection of reliable and adequate analytical methods and methods of their experimental verification for a comprehensive and systematic study of physical processes that occur during the explosive destruction of rock by well charges of special structures, in order to ensure a balanced distribution of explosive energy in the rock mass that is being blown up, as much as possible in accordance with the variable physical and mechanical characteristics of rocks in individual local zones of the explosive block.

The methods of research are a comparative analysis of modern, reliably tested simulation and mathematical models of geo-mechanical processes. At the same time, the maximum adequacy of the methods for the task of accurately determining the full tensor of the stress-strain state of rocks under conditions of dynamic stress by blasting a rock massif of a complex structure in open pits served as the criterion of suitability for the subsequent selection of methods most suitable for the purposes of the study.

Findings. On the basis of the performed analysis, a set of scientific and methodological approaches was formed as a toolkit for basic theoretical and experimental investigations, the application of which ensures the clarification of the mechanism of creation and development of the dynamic load of the rock massif by explosion, as determined by the author, for the subsequent development and substantiation of reliable methods of control this process in a coordinated way in space and time short-delayed detonation of groups of well charges of special structures. At the same time, structural regularities and local anomalies of the array, anisotropy of its properties, change of state, etc. are taken into account. Only by reliably knowing the systemically significant temporal and spatial characteristics of the rock massif, it is possible to adequately model its dynamic evolution and develop sufficiently grounded theoretically appropriate mathematical models with an algorithm for their applied use, which are really suitable for implementation in the practice of open mining.

The originality of the article material lies in the systematic approach to the substantiation of the theoretical basis of balanced energy saturation of the rock massif by detonation of combined well charges and the corresponding means, measures and technical solutions.

Practical implementation. The presented methodological approach and its further development are quite suitable for formulating the content of similar studies and their planning, contributing to solving the problems of reducing the cost of iron ore products by increasing the efficiency of drilling and blasting in iron ore pits.

Keywords: open-pit, ore, explosive destruction, blast, rock mass, tension, deformations, borehole charges.

УДК 621.873.11

Суглобов В.В., Крупко В.Г., Крупко І.В., Веснін А.В. Механізми землерийних машин з хвильовими ланцюговими передачами

Мета. Стаття присвячена вирішенню актуальної задачі по зниженню енергетичних затрат при руйнуванні ґрунтів робочими органами землерийних машин за рахунок застосування в приводах виконавчих механізмів хвильових ланцюгових передач.

Методи дослідження. Зміна швидкості в процесі копання ґрунтів веде до зниження опору копання за рахунок динамічного впливу робочого органу на ґрунт. Найбільш наглядним прикладом таких явищ де необхідно змінювати швидкість робочих органів можна вважати процес взаємодії ківшів екскаваторів з ґрунтом, будівельними матеріалами або гірничими породами, коли перед робочим органом виникає значне ущільнення матеріалу що руйнується і накопичується в ківшах. Це явище істотно впливає на процес різання ґрунтів за рахунок ущільненого ґрунту (нароста), який утворюється в зоні взаємодії ріжучої кромки і ґрунту що називають також «ущільненим ядром». Показано, що хвильові ланцюгові передачі здатні забезпечувати змінювання передатного відношення привода механізму, а відповідно і швидкості веденого елемента, що може забезпечити імпульсний рух веденої ланки, наприклад робочого органу (ковша), а відповідно і руйнування такого ядра ґрунта.

Наукова новизна. Авторами проаналізовані відомі конструкції хвильових ланцюгових передач, а також визначені проблемні питання, які потребують вирішення. Запропоновані конструкції приводів механізмів підйома і натиску ковша з хвильовими ланцюговими передачами, які відрізняються спрощеною конструкцією та спрощеною технологією виготовлення, а їх використання забезпечить нерівномірну (пульсуючу) швидкість веденого елемента. Наведені залежності по визначенню параметрів хвильових ланцюгових передач дозволяють визначати і в широкому діапазоні змінювати передатне відношення приводів наведених механізмів.

Практична значимість. Виконані дослідження підтверджують ефективність використання хвильових ланцюгових передач у виконавчих механізмах землерийних машин. Розроблено також методику визначення оптимальних кінематичних параметрів та вплив на їх величину конструктивних параметрів елементів передачі, а саме кількості і діаметрів котків, кроку ланцюга та інших.

Результати. Стаття може бути корисною підприємствам та інженерам механікам зайнятих конструюванням і експлуатацією гірничих і землерийних машин і рекомендується до публікації в збірнику науково-технічних робіт.

Ключові слова: енергетичні витрати, руйнування ґрунтів, натиск ковша, ланцюгові передачі.

Suglobov V., Krupko V., Krupko I., Vesnin A. Mechanisms of earth-moving machinery with wave chain gears

Objective. The article is devoted to the solution of the current problem of reducing energy costs during the destruction of soil by the working bodies of earthmoving machines due to the use in the drives of the executive mechanisms of wave chain transmissions.

Research methods. The change in speed during the process of digging the soil leads to a decrease in the digging resistance due to the dynamic impact of the working body on the soil. The most obvious example of such phenomena where it is necessary to change the speed of working bodies can be considered the process of interaction of excavator buckets with soil, building materials or mining rocks, when a significant compaction of material that is destroyed and accumulates in the buckets occurs in front of the working body. This phenomenon significantly affects the process of soil cutting due to the compacted soil (growth), which is formed in the zone of interaction between the cutting edge and the soil, which is also called the "compacted core". It is shown that wave chain transmissions are able to provide a change in the transmission ratio of the mechanism drive, and accordingly, the speed of the driven element, which can ensure the impulse movement of the driven link, for example, the working body (bucket), and, accordingly, the destruction of such a soil core.

Scientific novelty. In The authors analyzed the known designs of wave chain transmissions, as well as identified problematic issues that need to be resolved. The proposed designs of drives of mechanisms for lifting and pushing the bucket with wave chain gears, which are distinguished by a simplified design and simplified manufacturing technology, and their use will provide an uneven (pulsating) speed of the driven element. The following dependencies for determining the parameters of wave chain transmissions allow you to determine and in a wide range to change the transmission ratio of the drives of the above mechanisms.

Practical significance. The conducted studies confirm the effectiveness of using wave chain transmissions in the executive mechanisms of earthmoving machines. The methodology for determining the optimal kinematic parameters and the influence on their value of the design parameters of the transmission elements, namely the number and diameters of the rollers, the chain pitch, and others, has also been developed.

Results. The article can be useful to enterprises and mechanical engineers engaged in the design and operation of mining and earthmoving machines and is recommended for publication in the collection of scientific and technical works.

Keywords: energy costs, soil destruction, bucket pressure, chain transmission

УДК 669.71:621.791.92:621.431

Гнатенко М.О. Усунення ливарного браку деталей методами мікроплазмового наплавлення

Мета роботи. впровадити ефективний метод усунення ливарного браку та дефектів що дозволяє відновлювати пошкоджені сегменти виливків. Було встановлено що межа міцності і відносне подовження наплавленого матеріалу ЕП648 знаходиться на рівні основного литого сплаву ВХ4Л і складає 83-100 Н і $\delta=17-20\%$.

Методи дослідження проводилося за допомогою плазмового палика та джерела живлення Starweld, робота Mitsubishi порошком ЕП648 на поверхню деталі зі сплаву ВХ4Л товщина наплавленого шару складала 8 мм, висота 1,2 мм. діаметр наплавлення 570 мм. Механічні властивості межі міцності і відносного подовження були визначені на розривній машині INSTRON. Дослідження мікроструктури проводилося за допомогою мікроскопів Stemi 200-c, Observer.D1m (Zeiss, Німеччина) при збільшеннях від $\times 100$ до $\times 1000$. При вивченні структурних складових в сплавах застосували комплексну методику якісної й кількісної оцінки складових.

Наукова новизна полягає у отриманні нікелевих сплавів зі створенням специфічних металургічних фаз та структур на рівні литих фасонних виливків. Ці фази, включаючи гамма-твердий розчин, метастабільні карбіди та нітриди, відіграють важливу роль у поліпшенні механічних властивостей матеріалу. Гамма-твердий розчин відомий своєю високою стійкістю до деформації та відновлювальною здатністю, що робить його ідеальним для застосування у виробництві, де потрібна висока міцність. Метастабільні карбіди і нітриди дозволяють до структури сплаву додаткову зносостійкість та стійкість до впливу зовнішніх факторів.

Практична значимість полягає у значному розширенні можливостей ремонту і усунення дефектів литва багатогабаритних виливків.

Отримані результати успішно впроваджено технологію усунення ливарного браку для багатогабаритних деталей з нікелевих сплавів шляхом застосування методів мікроплазмового наплавлення, за рахунок усунення дефектів шляхом механічної обробки та нанесення додаткового шару матеріалу замість пошкодженого. Використання нікелевих сплавів із застосуванням методу наплавлення дозволяє забезпечити високу якість та надійність продукції при усуненні ливарних дефектів чи проведенні ремонту виробів.

Ключові слова: адитивні технології, нікелеві сплави, ливарне виробництво, усунення ливарного браку.

Gnatenko M. Elimination of casting defects in parts by microplasma cladding methods

Purpose. Application of a method for eliminating casting defects by restoring damaged segments using nickel alloys Objective: The aim of the study was to implement an effective method for eliminating casting defects by restoring damaged segments of castings. It was found that the strength and relative elongation of the deposited material EP648 was at the level of the base cast alloy VH4L, with values of 83-100 N and $\delta=17-20\%$.

Research Methods. Plasma torch and power source Starweld, and Mitsubishi robot were used to deposit EP648 powder onto the surface of a VH4L alloy component with a thickness of 8 mm, height of 1.2 mm, and a diameter of 570 mm. Mechanical properties were determined using an INSTRON tensile testing machine. Microstructural analysis was carried out using Stemi 200-c and Observer.D1m microscopes (Zeiss, Germany) at magnifications ranging from $\times 100$ to $\times 1000$. A comprehensive methodology was used for the qualitative and quantitative assessment of the structural components in alloys.

Results. The method for eliminating casting defects by depositing nickel alloys was successfully applied to large-scale components without compromising mechanical properties. The scientific novelty lies in the application of nickel alloys with γ -solid solution structures, metastable carbides and nitrides, at the level of castings. The practical value lies in the significant expansion of repair and defect elimination capabilities for large castings.

Keywords: additive technologies, nickel alloys, casting production, elimination of casting defects.

УДК 622.1: 534

Рибалко Б.І., Бакай А.В. Динамічна модель трансформації мікросейсмічного сигналу

Мета статті є створення математичної моделі, яка описує процеси трансформації мікросейсмічних сигналів, розробка математичних рівнянь та алгоритмів, які відображають фізичні та геологічні процеси, які відбуваються в мікросейсмічних сигналах.

Методи дослідження. Збір та аналіз реальних мікросейсмічних сигналів для визначити їх характеристики та динаміку в різних геологічних умовах. Розроблення математичних моделей, які відображають фізичні процеси, що відбуваються у напружено-деформованому стані масиви, дозволяє вивчити вплив різних факторів на трансформацію мікросейсмічного сигналу.

Методи дослідження. Спектральний аналіз для вивчення частотних характеристик мікросейсмічного сигналу. Розробка математичних моделей, які відображають фізичні процеси, що відбуваються у глибинах Землі, дозволяє вивчити вплив різних факторів на трансформацію мікросейсмічного сигналу.

Наукова новизна. Встановлено нові залежності амплітуди, тривалості і частоти від відстані для мікросейсмічного сигналу.

Практична значимість. Динамічна модель трансформації мікросейсмічного сигналу важлива для покращення розуміння геологічних процесів та управління ризиками в активних сейсмічних регіонах. Зокрема, модель можна використовувати для моніторингу сейсмічної активності в реальному часі з визначенням відстані до геомеханічного явища, виявляти види сейсмічної активності за частотою (тріщини, заколів, мікродарів), виявлення динаміки незначних геологічних зрушень є важливим для оцінки потенціальних ризиків утворення руйнівних явищ. За допомогою динамічної моделі трансформації мікросейсмічного сигналу можна розробити більш точні моделі для прогнозування геологічних явищ, таких як технічних землетруси, обрушень. При використанні геоінформаційних систем моніторингу збільшити безпеку ведення гірничих робіт. Такий підхід має велике значення для наукових досліджень та практичного використання в геологічній та цивільній сфері.

Результати. Доведено, залежність відстані від амплітуди мікросейсмічного сигналу, залежність відстані від тривалості мікросейсмічного сигналу, залежність частоти від відстані та створено динамічної моделі трансформації сейсмічного сигналу з відстанню.

Ключові слова: мікросейсмічний сигнал, динамічна модель, трансформація сейсмічних сигналів, аналіз мікросейсмічних даних, сейсмічна активність, моніторинг геомеханічних процесів, напружено-деформований стан масиву.

Rybalko B.I., Bakai A.V. Dynamic model of microseismic signal transformation

The aim of the article is to create a mathematical model that describes the processes of transformation of microseismic signals, develop mathematical equations and algorithms that reflect the physical and geological processes occurring within microseismic signals.

Research methods. Collection and analysis of real microseismic signals to determine their characteristics and dynamics in various geological conditions. The development of mathematical models that reflect the physical processes occurring in the stressed-deformed state of the massif allows studying the influence of various factors on the transformation of the microseismic signal.

Research methods. Spectral analysis to study the frequency characteristics of a microseismic signal. The development of mathematical models that reflect the physical processes occurring in the depths of the Earth allows studying the influence of various factors on the transformation of the microseismic signal.

Scientific novelty. New dependences of the amplitude, duration and frequency on the distance for the microseismic signal were established.

Practical significance. A dynamic model of microseismic signal transformation is important for improving the understanding of geological processes and risk management in active seismic regions. In particular, the model can be used to monitor seismic activity in real time with the determination of the distance to a geomechanical phenomenon, to detect types of seismic activity by frequency (cracks, punctures, microshocks), the detection of the dynamics of minor geological shifts is important for assessing the potential risks of the formation of destructive phenomena. With the help of a dynamic model of microseismic signal transformation, it is possible to develop more accurate models for forecasting geological phenomena, such as technical earthquakes, landslides. The use of geoinformation monitoring systems will increase the safety of mining operations. This approach is of great importance for scientific research and practical use in the geological and civil spheres.

The results. The dependence of the distance on the amplitude of the microseismic signal, the dependence of the distance on the duration of the microseismic signal, the dependence of the frequency on the distance and the dynamic model of the transformation of the seismic signal with the distance have been established.

Keywords: microseismic signal, dynamic model, transformation of seismic signals, analysis of microseismic data, seismic activity, monitoring of geomechanical processes, stress-strain state of the massif.

УДК 669.218; 622.15:66.093.48

Олійник Т.А., Петелька А.В., Скляр Л.В. Удосконалення процесу фільтрування залізородного магнетитового концентрату ПРАТ «ЦГЗК» для забезпечення фабрики огрудкування сировиною для DRI обкотишів

Метою роботи є визначення можливості виробництва концентрату з якістю та вологою придатною до виробництва залізородних обкотишів що є сировиною для технології прямого відновлення заліза (DRI) на вітчизняних підприємствах, зокрема, забезпечення масової частки вологи концентрату у керованому діапазоні від 8,2 до 9,5%, що дозволяє стабільно виробляти обкотиші з високими показниками якості.

Методами дослідження є експериментальні методи, що включають порівняння різних режимів роботи тканинних дискових вакуум-фільтрів ДУ-100-2,5 та керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90 що зневоднюють тонкоподрібнений залізородний концентрат виробництва ПРАТ «ЦГЗК».

Наукова новизна визначається у новому підході до зневоднення залізородного концентрату ПРАТ «ЦГЗК» для подальшого застосування, як сировини, для виробництва залізородних обкотишів. Підхід включає використання керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90 для забезпечення стабільного випуску концентрату з масовою часткою вологи в керованому діапазоні.

Практична значимість дослідження полягає в тому що його результати можуть бути використані вітчизняними підприємствами для аналізу можливості та ефективності заміни наявного фронту тканинної фільтрації залізородного концентрату на керамічні дискові вакуум-фільтри, параметри роботи яких дозволяють забезпечити залишкову вологу залізородного концентрату, що придатна до застосування у огрудкуванні та обпалюванні DR обкотишів. Заміна обладнання та досягнення стабільних параметрів якості залізородного концентрату дозволяє вступити на нові, високорічкові ринки збуту концентратів та обкотишів.

Результатами дослідження є висновок що застосування керамічних вакуум-фільтрів КДФ-90 дозволяє забезпечити високу ефективність фільтрації, стабільність процесу, довговічність та екологічну чистоту. Зокрема, встановлено, що фільтри марки КДФ-90 забезпечують показники продуктивності та вологи концентрату на необхідному для виробництва обкотишів на рівні 0,6...0,8 т/м² та 8,2...9,5% відповідно. Застосування цих фільтрів дозволяє забезпечити стабільність та керованість процесу, зменшити витрати енергії та ресурсів.

Ключові слова: пряме відновлення заліза, DRI, залізородні обкотиші, вакуум-фільтрація, ДУ-100-2,5, керамічні вакуум-фільтри, КДФ-90.

Oliinyk, T.A., Petelka A.V., Skliar L.V. Improvement of the filtration process of iron ore magnetic concentrate of PJSC "CGZK" to provide the pelletizing plant with raw materials for DRI pellets

The aim of the study is to determine the possibility of producing a concentrate with quality and moisture suitable for the production of iron ore pellets, which are raw materials for the direct reduction of iron (DRI) technology at domestic enterprises, in particular, ensuring the mass fraction of concentrate moisture in a controlled range from 8.2 to 9.5%, which allows for the stable production of pellets with high quality indicators.

The research methods are experimental methods, which include comparing different modes of operation of fabric disc vacuum filters DU-100-2.5 and ceramic vacuum filters KDF-90 that dewater finely ground iron ore concentrate produced by PJSC "CGZK".

The scientific novelty is determined in a new approach to the dewatering of iron ore concentrate PJSC "CGZK" for further application, as raw materials, for the production of iron ore pellets. The approach includes the use of ceramic vacuum filters KDF-90 to ensure the stable release of concentrate with a mass fraction of moisture in a controlled range.

The practical significance of the study is that its results can be used by domestic enterprises to analyze the possibility and efficiency of replacing the existing front of fabric filtration of iron ore concentrate with ceramic disc vacuum filters, the operating parameters of which allow to ensure the residual moisture of iron ore concentrate, which is suitable for use in pelletizing and firing DR pellets. Replacing equipment and achieving stable quality parameters of iron ore concentrate allows entering new, high-profit markets for concentrates and pellets.

The results of the study are the conclusion that the use of ceramic vacuum filters KDF-90 allows to ensure high filtration efficiency, process stability, durability, and environmental cleanliness. In particular, it has been established that KDF-90 filters provide productivity and moisture indicators of the concentrate necessary for pellet production at the level of 0.6...0.8 t/m² and 8.2...9.5% respectively. The use of these filters allows to ensure process stability and controllability, reduce energy and resource costs.

Keywords: direct reduction of iron, DRI, iron ore pellets, vacuum filtration, DU-100-2.5, ceramic vacuum filters, KDF-90.

УДК 622.7: 534

Моркун В. С., Моркун Н. В., Шашкіна А. А., Бобров Є. Ю. Методи аналізу вібрації та акустичної емісії бурової установки в процесі буріння свердловин

Метою дослідження є аналіз методів дослідження віброакустичних сигналів бурової установки в процесі буріння свердловин.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного моделювання, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні застосування технології обробки сигналів вібрації та акустичної емісії бурової установки для визначення фізико-механічних властивостей гірської породи та технічного стану обладнання в процесі буріння свердловин.

Практичне значення полягає у визначенні комбінації інформативних характеристик віброакустичного сигналу бурової установки в процесі буріння свердловин для підвищення якості його моделювання та керування.

Результати. Складна динаміка бурової установки включає всі основні типи коливань в процесі буріння свердловин. Механізм акустичної емісії та вібрації однаковий у тому, що обидва вони виникають через коливальні рухи в середовищі. Різні режими вібрації, такі як крутильні, бічні та осьові, призводять до зменшення швидкості проникнення (ROP). Вони також можуть спричинити катастрофічні збої та, як мінімум, знос дорогих компонентів бурильної техніки. Вимірюваний супутній віброакустичний сигнал є інтегруючим джерелом, що містить певну інформацію про характер і поточний режим буріння гірської породи. Цей сигнал явно представлений у часовій області поведінкою його амплітуд або в частотній області його спектром. Інформація, що міститься в цьому сигналі, може бути виділена у формі певних характеристичних ознак у часовій, частотній або частотно-часовій області та використана для діагностики стану технологічного обладнання, визначення фізико-механічних характеристик гірської породи та ідентифікації технолого-мінералогічних різновидів руди в процесах розвідки і експлуатації родовищ корисних копалин. Налаштування керування процесом буріння свердловин з урахуванням поточного стану бурового устаткування та фізико-механічних характеристик породи дозволяє підвищити ROP та енергоефективність буріння.

Ключові слова: буріння свердловин, вібрація, акустична емісія, характеристичні ознаки, методи аналізу.

Morkun V. S., Morkun N. V., Shashkina A. A., Bobrov E. Y. Methods for analysing vibration and acoustic emission of a drilling rig in the process of well drilling

The aim of the study is to analyse the methods of studying the vibroacoustic signals of a drilling rig during well drilling.

Research methods. The paper uses methods of analysis of domestic and foreign experience, methods of mathematical modelling, as well as methods of mathematical statistics and probability theory to form an assessment of the research results.

The **scientific novelty** lies in the substantiation of the use of technology for processing vibration and acoustic emission signals of a drilling rig to determine the physical and mechanical properties of rock and the technical condition of equipment in the process of well drilling.

The practical meaning is to determine the combination of informative characteristics of the vibroacoustic signal of a drilling rig in the process of well drilling to improve the quality of its modelling and control.

Results. The complex dynamics of a drilling rig includes all the main types of oscillations during well drilling. The mechanism of acoustic emission and vibration is the same in that they both arise due to oscillatory motions in the medium. Different modes of vibration, such as torsional, lateral and axial, lead to a reduction in rate of penetration (ROP). They can also cause catastrophic failures and, at the very least, wear and tear on expensive drilling components. The measured accompanying vibroacoustic signal is an integrating source containing certain information about the nature and current mode of rock drilling. This signal is explicitly represented in the time domain by the behaviour of its amplitudes or in the frequency domain by its spectrum. The information contained in this signal can be extracted in the form of certain characteristic features in the time, frequency or frequency-time domain and used to diagnose the condition of technological equipment, determine the physical and mechanical characteristics of the rock and identify technological and mineralogical ore types in the process of exploration and exploitation of mineral deposits. Setting up the control of the well drilling process taking into account the current state of drilling equipment and physical and mechanical characteristics of the rock allows to increase the ROP and energy efficiency of drilling.

Keywords: well drilling, vibration, acoustic emission, characteristic features, analysis methods.

UDC 622.1

Peregudov V. V., Bolotnikov A. V., Peregudov Y. V., Romanenko A. O., Romanenko O. V., Demchenko D. A. Analysis and improvement of the methodology for tractive calculations of open-pit rail transport

Purpose. Based on the existing Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits, an improved methodology is proposed for efficient traction calculations of industrial open-pit railway transport using MS Excel; this opens up opportunities for further research, design, and analysis of industrial open-pit railway transport movement.

Research methods. Thanks to the inclusion in Appendix B to the Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits, the reader can find a methodology for conducting traction calculations for industrial open-pit railway transport. In this article, the authors focused on the methodology, providing detailed explanations and conducting a thorough analysis of its key aspects. The inclusion of this material opens up new opportunities for understanding and improving traction calculation processes in the field of industrial open-pit railway transport, as well as laying the groundwork for further research and development in this area.

Scientific novelty. For the first time, a deep analysis of the traction calculation algorithm for industrial open-pit railway transport, described in the methodology of the current Norms of Technological Design for Mining Enterprises with Open-Pit Mining of Mineral Deposits, has been conducted. After careful analysis, flaws and inaccuracies in the mentioned methodology were identified. It was determined that the calculation example provided in the methodology of the current Norms of Technological Design was executed incorrectly. In light of this, recommendations, adjustments, and corrections have been provided in this study to improve the traction calculation algorithm for industrial open-pit railway transport.

Practical implementation. The methodology discussed in the article can be utilized as a powerful tool in the process of designing and conducting research for performing efficient traction calculations in the field of industrial open-pit railway transport using the MS Excel spreadsheet software. This provides a practical and effective approach to achieving accurate and reliable results in carrying out the specified tasks.

Results. Following the analysis, a detailed explanation of the traction calculation algorithm was provided, errors were identified and corrected, and adjustments were made to the methodology for conducting efficient traction calculations for industrial open-pit railway transport using the MS Excel spreadsheet software.

Keywords: methodology, traction calculations, industrial open-pit railway transport, MS Excel.

Перегудов В. В., Болотніков А. В., Перегудов Ю. В., Романенко А. О., Романенко О. В., Демченко Д. А. Аналіз та удосконалення методики тягових розрахунків кар'єрного залізничного транспорту

Мета. На підставі діючих Норм технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин, пропонується вдосконалена методика для ефективних тягових розрахунків промислового кар'єрного залізничного транспорту за допомогою MS Excel; це відкриває можливості для подальшого дослідження, проектування та аналізу руху промислового кар'єрного залізничного транспорту.

Методи дослідження. Завдяки включенню в додаток В до Норм технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин, читач може знайти методику виконання тягових розрахунків для промислового кар'єрного залізничного транспорту. У даній статті автори звернули увагу на методику, представивши детальні пояснення та виконавши ретельний аналіз її ключових аспектів. Включення цього матеріалу відкриває нові можливості для розуміння й удосконалення процесів тягових розрахунків у сфері промислового кар'єрного залізничного транспорту, а також створює базу для подальших досліджень та розвитку цієї області.

Наукова новизна. Вперше проведено глибокий аналіз алгоритму тягових розрахунків для промислового кар'єрного залізничного транспорту, який описаний у методиці чинних Норм технологічного проектування гірничодобувних підприємств із відкритим способом розробки родовищ корисних копалин. Після ретельного аналізу виявлено вади та неточності, які містить зазначена методика. Встановлено, що приклад розрахунків, поданий у методиці чинних Норм технологічного проектування, виконано некоректно. У світлі цього у роботі надано рекомендації, коригування та виправлення з метою удосконалення алгоритму тягових розрахунків для промислового кар'єрного залізничного транспорту.

Практична значимість. Розглянуто в статті методику можна використовувати як потужний інструмент у процесі проектування та проведення досліджень для виконання ефективних тягових розрахунків у сфері промислового кар'єрного залізничного транспорту, за допомогою табличного процесора MS Excel. Це забезпечує практичний та ефективний підхід для досягнення точних та надійних результатів при виконанні вказаних завдань.

Результати. Після проведеного аналізу було надано детальне пояснення побудови алгоритму тягового розрахунку, були виявлені та виправлені помилки, а також внесені корективи до методики для здійснення ефективних тягових розрахунків промислового кар'єрного залізничного транспорту за допомогою табличного процесора MS Excel.

Ключові слова: методика тягових розрахунків промислового кар'єрного залізничного транспорту MS Excel.

УДК 622.272

Ковбик К.М. Дослідження протікання процесу випуску при відпрацюванні насичених водою руд у лабораторних умовах в залежності від змін фракційного складу

Метою статті. Експериментально визначити рівень втрати при випуску насичених водою руд з моделі, прослідкувати кореляцію показників втрат в залежності від зміни фракційного складу руди. Оскільки в результаті виконаного аналізу літературних джерел встановлено, що деяка частина покладів Криворізького залізничного басейну знаходиться в складних гідрогеологічних умовах, а також при застосуванні технології гідро руйнування постає питання випуску руди в умовах обводнення родовища. Розгляд можливості покращення показників випуску в таких умовах - є актуальним питанням.

Методи досліджень. Фізичне моделювання випуску руди в лабораторних умовах. Врахування при дослідах показників насичення руди водою (обводнення) та зміна фракційного складу застосованого матеріалу.

Наукова новизна. Експерименти показали що в результаті випуску насиченою водою руди збільшуються втрати руди в залежності від її насичення 5%, 5.5%, 6%, 7%, і можливість стабільного випуску ускладнюється, і випуск руди при її насиченні в 9% для лабораторних умов є неможливим. Встановленні закономірності випуску насичених водою руд, а також можливості покращення показників випуску в таких умовах в залежності від змін фракційного складу рудної маси.

Практична значимість. Удосконалено методику випуску насичених водою руд в лабораторних умовах. Створення методики розрахунку рівня втрат при розробці покладів обводнених багатих залізних руд, дає можливість застосування ресурсозберігаючих технологій гідро руйнування як альтернативу класичному буро вибуховому методу руйнування масиву гірських порід, або прогнозування рівня втрат при раптовому потраплянні води очисний простір.

Результати. Виконано досліді по випуску обводненої рудної маси, визначений рівень втрат при випуску руди з поодинокого отвору. Проведено досліді зі зміною фракційного складу і впливом на втрати корисної копалини.

Ключові слова: випуск руди, обводнені родовища, гідровиймання, гідроруйнування, випуск руди, обводненні руди, насиченість руд, методика випуску, шахтна вода, підземна розробка.

Kovbyk K.M. Study of the flow of the release process during the processing of water-saturated ores in laboratory conditions depending on changes in the fractional composition

The purpose of the article. Experimentally determine the level of loss during the release of water-saturated ores from the model, follow the correlation of loss indicators depending on the change in the fractional composition of the ore. As a result of the analysis of literary sources, it was established that some of the deposits of the Kryvyi Rih iron ore basin are in difficult hydrogeological conditions, as well as when applying the hydro fracturing technology, the issue of ore release in conditions of flooding of the deposit arises. Consideration of the possibility of improving graduation rates in such conditions - is an urgent issue.

Methods. Physical modeling of ore release in laboratory conditions. Taking into account during the experiments the indicators of water saturation of the ore (watering) and the change in the fractional composition of the applied material.

Scientific novelty . Experiments have shown that as a result of the release of ore saturated with water, the loss of ore increases depending on its saturation of 5%, 5.5%, 6%, 7%, and the possibility of stable release becomes difficult, and the release of ore at its saturation of 9% for laboratory conditions is impossible Establishing the patterns of release of water-saturated ores, as well as the possibility of improving the release rates in such conditions depending on changes in the fractional composition of the ore mass.

Practical significance . The method of releasing water-saturated ores in laboratory conditions has been improved. The creation of a methodology for calculating the level of losses during the development of deposits of water-rich iron ores makes it possible to use resource-saving technologies of hydro fracturing as an alternative to the classic drill-blast method of destroying a mass of rocks, or predicting the level of losses when water suddenly enters the treatment space.

Results. Experiments were carried out on the release of watered ore mass, the level of losses during the release of ore from a single hole was determined. Experiments were conducted with a change in the fractional composition and the effect on mineral losses.

Key words: ore release, watered deposits, hydromining, hydrofracturing, ore release, watered ores, ore saturation, release method, mine water, underground development.

Temchenko V. Effect of changing the shape of the rarefaction chamber of a device for removing water from the rope surface on air flow parameters: a technical note

Abstract. The study of the interaction of air flow with a water film is an under-researched topic, and therefore this study is relevant for the academic community. The analysis and modelling results complement existing knowledge and expand the understanding of processes in this area. The purpose of this study was to compare the parameters of the air flow generated in the device for removing water from the surface of the mine hoist rope when changing the shape of the rarefaction chamber, which can increase the efficiency of the device. In the study, a computer experiment was performed to create models of the rarefaction chamber of the device for removing water from the rope surface with different shapes of the device surface. The experiment itself was conducted in SolidWorks Flow Simulation software. The study found that changing the shape of the rarefaction chamber substantially affects the air flow parameters in the device for removing water from the rope surface. At a ratio of $D/D_1=1.6...2.5$, flow stability and effective water removal along the entire length of the rope were observed. Specifically, it was found that the value $D/D_1=1.6$ is particularly optimal, as this pressure is as close as possible to the intensity of water removal, ensuring an even flow distribution and minimal energy consumption. This allows the device to operate at high efficiency, reducing the risk of uneven water removal and increasing the reliability of the lift. The resulting uneven air flow has a negative impact on the integrity of the water film on the rope surface and, as a result, on the removal of water from the surface of the mine hoist rope. The study of this problem allows expanding the understanding of the effect of air flow on the water film on the rope surface and contributes to the development of more efficient water removal devices, which is the practical value of this study.

Keywords: water film; mine hoisting unit; intensity of water removal; efficiency

Темченко В. Вплив зміни форми камери розрідження пристрою для видалення води з поверхні канату на параметри потоку повітря: технічна нотатка

Анотація. Дослідження взаємодії повітряного потоку із плівкою води є малодосліджуваною темою, а тому це дослідження є актуальним для наукової спільноти. Аналіз та результати моделювання доповнюють існуючі знання і розширюють розуміння процесів у цій сфері. Мета дослідження полягала у порівнянні параметрів повітряного потоку, який утворюється у пристрої для видалення води з поверхні канату шахтної підйомної установки, при зміні форми камери розрідження, що може підвищити ефективність пристрою. В ході дослідження було проведено комп'ютерний експеримент, для якого були створені моделі камери розрідження пристрою для видалення води з поверхні канату із різними формами поверхні пристрою. Сам експеримент був проведений у програмному продукті SolidWorks Flow Simulation. Дослідження показали, що зміна форми камери розрідження суттєво впливає на параметри повітряного потоку у пристрої для видалення води з поверхні канату. При відношенні $D/D_1=1,6...2,5$ спостерігалася стабільність потоку та ефективне видалення води по всій довжині канату. Зокрема, було встановлено, що значення $D/D_1=1,6$ є особливо оптимальним, оскільки при цьому тиск максимально наближається до інтенсивності видалення води, забезпечуючи рівномірний розподіл потоку та мінімальні енерговитрати. Це дозволяє пристрою працювати з високою ефективністю, знижуючи ризики нерівномірного видалення води та підвищуючи надійність підйомної установки. Виникаюча нерівномірність потоку повітря негативно впливає на порушення цілісності плівки води на поверхні канату і, як наслідок, на видалення води з поверхні канату шахтної підйомної установки. Дослідження цієї проблеми дозволяє розширити розуміння впливу повітряного потоку на плівку води на поверхні канату та сприяє розробці більш ефективних пристроїв для видалення води, що і складає практичну цінність даної статті

Ключові слова: плівка води; шахтна підйомна установка; інтенсивність виносу води; ефективність

Гірничий вісник
Науково-технічний збірник

Випуск 112

Комп'ютерний набір, верстка

Підпригора Н.П.

Підписано до друку 26.04.24 за рекомендацією Вченої Ради
Криворізького національного університету, протокол № 10 від 23.04.2024 року.
Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. 22,67 Тираж 100 прим.
Замовл. № 11. Укр., англ.

Надруковано:
ФОП Сінельников Дмитро Анатолійович
Свідоцтво ДК № 6780 від 29.05.2019р.
50027, м. Кривий Ріг,
пр. Металургів, 30/49
тел. (067)773-37-17

Адреса видавництва:
вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, 50027

Гірничий вісник, 2024. Вип. 112. С. 3-192