

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Криворізький національний університет

ГІРНИЧИЙ ВІСНИК

Науково-технічний збірник

Заснований у 1966 році

Випуск 107

Кривий Ріг, 2020

Редакційна колегія: **Ступнік М.І.**, д-р техн. наук, проф. (головний редактор); **Моркун В.С.**, д-р техн. наук, проф. (заступник головного редактора); **Азарян А.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Андрєєв Б.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Бережний М.М.**, д-р техн. наук, проф.; **Березовський А.А.**, д-р геол. наук, проф.; **Блізнюков В.Г.**, д-р техн. наук, проф.; **Бровко Д.В.**, канд.тех.наук., доц.; **Вілкул Ю.Г.**, д-р техн. наук, проф.; **Голік В.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Губін Г.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Гурін А.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Євтехов В.Д.**, д-р геол.-мінерал. наук, проф.; **Жуков С.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Зубов Д.А.**, д-р техн. наук, проф., Охрид, Македонія; **Ільяс Ніколає**, доктор-інженер, 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; **Комашенко В.І.**, д-р техн. наук, проф., Владікавказ, Росія; **Лапшин О.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Моркун Н.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Олійник Т.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Перегудов В.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Рудь Ю.С.**, д-р техн. наук, проф.; **Самуся В.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Сидоренко В.Д.**, д-р техн. наук, проф.; **Стороженко Л.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Титюк В.К.**, канд.техн. наук, доц.; **Толмачов С.Т.**, д-р техн. наук, проф.; **Федоренко П.Й.**, д-р техн. наук, проф.

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

У матеріалах збірника викладено результати досліджень у галузі технічних 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 рекомендовані науковим та інженерно-технічним працівникам, студентам, магістрантам й аспірантам.

Випуск № 107 рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет Вченою радою Криворізького національного університету (протокол № 7 від 14.05.2020 року).

Адреса редакції: Криворізький національний університет
вул. Пушкіна, 44, Кривий Ріг, 50002,
Тел. (056) 409 61 29
e-mail: naukaknu@ukr.net
web-сайт: iomining.in.ua/ua/homeua

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Криворізький національний університет

Гірничий вісник

Науково-технічний збірник

Заснований у 1966 р.

Випуск 107, 2020

Кривий Ріг

Зміст

<i>Моркун В.С., Кравченко О.М.</i> Моделювання параметрів ультразвукового поля в процесі очищення виробів складної конфігурації	3
<i>Тимофєєв М.В., Шамріна Г.В., Хохлаєва Д. О.</i> Обґрунтування вибору збірних систем зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Outdoor за умов забезпечення енергоефективності будівлі	11
<i>Алексєєв М.О., Голінько О.В.</i> Автоматичний контроль чутливості датчиків стаціонарних термокаталітичних аналізаторів метану	16
<i>Луценко С.А., Жуков С.А., Григорьев Ю.И.</i> Методика определения объемов вскрышных работ обеспечения условий в карьере нормальные условия для добычи полезного ископаемого	22
<i>Сахно С.І., Люльченко Є.В., Янова Л.О., Пищикова О.В.</i> Аналіз вітрових навантажень на елементи малоповерхових будівель із двосхилим дахом методом обчислювальної гідрогазодинаміки	26
<i>Федоренко П.Й., Переметчик А.В., Подойніцина Т.О.</i> Статистико-ймовірнісний розподіл прогнозних характеристик залізрудних родовищ при геометризації надр	32
<i>Тімченко Р.О., Кришко Д.А., Хоруженко І.В.</i> Математичне моделювання взаємодії складчастих фундаментів при нерівномірних деформаціях основи	36
<i>Баранов І.В., Швець Є.М., Чередниченко Є.В., Польцін Д.В.</i> Оптимізація виробничої потужності групи кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату	42
<i>Моркун В.С., Пікільняк А.В.</i> Дослідження динаміки газових бульбашок у процесі флотації рудної пульпи	48
<i>Азарян А. А., Трачук А. А., Швець Д. В.</i> Опыт использования экспресс-анализатора проб железорудного сырья для контроля содержания полезного компонента в условиях горноперерабатывающих предприятий	54
<i>Письменный С.В.</i> Моделювання стійкості очисних камер при селективній розробці складноструктурних рудних покладів	58
<i>Валовой О.І., Попруга Д.В., Афанасьєв В.В., Чорна К.В., Грицаєнко О.М.</i> Міцність балок з металевим і склопластиково-металевим армуванням розтягнутої зони	64
<i>Сахно С.І., Люльченко Є.В., Білашченко К.С., Домнічев А.О.</i> Дослідження застосовності нелінійних математичних моделей міцності бетону для моделювання руйнування бетонних призм	68
<i>Бровко Д.В., Хворост В.В., Кононенко В.В.</i> Построение системы мониторинга надежности элементов зданий и сооружений поверхностного комплекса шахт на базе оценки энтропии	73
<i>Швець Д. В.</i> Синтез математичної моделі технологічного процесу подрібнення залізрудної сировини з урахуванням її хіміко-мінералогічних характеристик на рудозбагачувальних фабриках	83
<i>Наливайко В.Г., Мовчан О.Г., Лосєєв К.В.</i> Влияние установления очередности профилактических ремонтов по замене аварийных участков трубопроводов и определение основных травмоопасных специальностей предприятий теплоснабжения	90
<i>Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А., Паранюк Д. І.</i> Методи оптимізації процесу буріння свердловин	96
<i>Несмаїний Є.О., Ткаченко Г.І., Герасимова К.В.</i> Розроблення фізико-математичної моделі сколювання бутів гірської породи з породних відкосів	101
<i>Астахова Н. В.</i> Дослідження впливу активації на властивості наповнювача з залізовмісних мінеральних комплексів	106
<i>Плотніков В.В., Бабасєвська О.В.</i> Застосування електричного впливу для очищення литва та в суміжних технологічних процесах	112
<i>Грищенко М.А.</i> Відпрацювання природно багатих залізних рудних покладів на глибоких горизонтах з недостатніми кутами залягання в умовах високого гірського тиску	117
<i>Савельєв С.Г., Кондратенко М.М., Бабасєвська О.В.</i> Оцінка методики визначення впливу висоти шару аглошихти на його структурну міцність	122
<i>Горбачов Ю.Г., Хруцький А.О., Громадський А.С., Ліфенцов О.С.</i> Умови забезпечення безударного режиму роботи пневматичних вібраційних приводів діафрагмового типу	128
<i>Хруцький А.О., Громадський Вік.А., Чумак Ю.І., Сулімовський М.Д.</i> Дослідження параметрів кар'єрних екскаваторів типу ЕКГ	132
<i>Гурін А.О., Шаповалов В.А.</i> Спосіб очистки відкладень на стінках повітропроводів	138
<i>Валовой О.І., Астахов В.І., Афанасьєв В.В., Валовой М.О., Єременко О.Ю.</i> Використання відходів гірничорудної промисловості у промисловому, цивільному та транспортному будівництві	142
<i>Олійник Т.А., Ніколаєнко П.К.</i> Вплив типу дроблення окислених залізистих кварцитів на подальше їх розкриття при подрібненні в кульовому млині	147
<i>Шимко В.А., Оньова Г.В.</i> Сучасний розвиток індустріальних методів зведення малоповерхового житла різних категорій	154
АНОТАЦІЇ ..	
<i>А н о т а ц і ї ..</i>	163

МОДЕЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ В ПРОЦЕСІ ОЧИЩЕННЯ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ КОНФІГУРАЦІЇ

Мета. За допомогою моделювання визначити, як змінюється значення акустичного тиску, отримане датчиком, в процесі ультразвукового очищення виробів різної конфігурації з забрудненням різної товщини та щільності.

Методи дослідження. Моделювання за допомогою наявних програмних засобів імітації розповсюдження високоінтенсивних ультразвукових хвиль.

Наукова новизна. На основі побудованої моделі процесу ультразвукового очищення встановлено залежність між ультразвуковим відгуком датчика та ступеню забрудненості тіла.

Практична значимість. Встановлено залежності між щільністю і товщиною забруднення та ультразвуковим відгуком, що отримує датчик, для тіл різної конфігурації. Шляхом аналізу отриманих даних сформовано загальний висновок щодо залежності між забрудненням та ультразвуковим віддзеркаленням для будь-якої конфігурації очищувального тіла.

Результати. Під час аналізу отриманих даних виявлено наступні закономірності: у процесі очищення тіла правильної форми із забрудненням високої щільності простежується стабільне збільшення максимального відхилення акустичного тиску при зменшенні товщини наявного забруднення. Коли щільність забруднення невисока, то починають спостерігатися додаткові акустичні сплески, що обумовлені віддзеркаленням і від забруднення, і від виробу, що очищується. Очищення тіла з геометричними особливостями не має такої ж стабільної картини щодо збільшення амплітудного відхилення в одному напрямку осі, але все ще можна спостерігати зростання різниці між максимальним та мінімальним значеннями акустичного тиску. Отже, для визначення ступеню забруднення об'єкта, а, відповідно, і необхідності продовжувати процес ультразвукового очищення можна враховувати максимальне відхилення акустичного тиску та кількість значних відхилень. Є сенс продовжувати ультразвукове очищення, поки відбувається зміна акустичного тиску, при цьому зосереджуючи найінтенсивніший вплив на ділянках, де спостерігається найбільше зростання амплітудних відхилень. Очищене тіло буде мати найбільший за різницею амплітуд сигнал та найменшу наявність дисперсійних відхилень.

Ключові слова: ультразвукове поле, акустичний тиск, моделювання, ультразвукове очищення.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-3-11

Проблема та зв'язок її з науковими та практичними задачами. Зростаюча популярність ультразвукового очищення є результатом загальносвітової тенденції використовувати більш екологічні та ефективні технології. З моменту появи ультразвукового способу очищення ведуться дослідження щодо підвищення його якості та енергоефективності. Перший спосіб підвищити ефективність цього процесу - це використання автоматизованого керування на основі інформації про перебіг процесу очищення. Отримувати інформацію можна про стан рідини для очищення та про стан об'єкта очищення. Якщо в першому випадку не враховуються особливості самого виробу, його конфігурація та різна забрудненість окремих ділянок, то в другому - оцінка перебігу буде залежати, насамперед, від цих факторів. Інший спосіб підвищити ефективність - це формувати керуючий вплив із врахуванням просторового розподілення кавітації у ємності, формуючи максимальний вплив на потрібній ділянці. Для формування такого впливу на необхідних ділянках очищувального тіла треба визначити залежності між забрудненістю та ультразвуковим віддзеркаленням.

Аналіз досліджень та публікацій. Багато досліджень присвячено підвищенню ефективності ультразвукового очищення та кавітації як основного фізичного ефекту, що її забезпечує. В праці [1] залежності кількості кавітаційних бульбашок при ультразвуковому тесті очищення з різною концентрацією розчиненого кисню у воді та виявлено, що існує оптимальна перенасиченість газу для максимальної ефективності видалення забруднення. Використання ультразвукового опромінення низької інтенсивності при оптимальній перенасиченості газу в очисних розчинах дозволяє отримувати легку динаміку бульбашок без сильного колапсу і таким чином знижувати ризик ерозії кавітації. Процес очищення при цьому стає більш ефективний та безпечний. В праці [2] під час аналізу виникнення різних максимумів кавітації при різних температурах під час охолодження термічно дегазованої води, після дослідження зв'язку між цим явищем, частотою та потужністю ультразвуку, виявлено, що причина у вторинному насиченні води повітрям. Отже, кавітація залежить від загазованості води і ця залежність має нелінійний хара-

ктер. При використанні нового самочутливого методу вимірювання наявності і рівня кавітації [3], який можна застосувати навіть у важкодоступних або непрозорих умовах, виявлено, що розподіл кавітаційних бульбашок тісно пов'язаний з геометричним розташуванням та дистанцією між випромінювачем та дном контейнеру. В дослідженні [4] на основі дослідження кавітаційної активності за допомогою аналізу спектру коливальної хвилі виявлено наступні залежності: кавітація стає нестабільною при тривалому часі інтонації і це більш виражене при великій потужності; підвищення потужності, вмісту газу та додавання очищувального засобу посилює кавітацію, але при певних значеннях вона досягає максимуму та починає знижуватись; окрім того, що температура, частота, потужність, вміст газу впливають на кавітацію, вони ще взаємозалежні: час інсонації та висока потужність впливають на температуру та вміст газу, вміст газу змінюється в залежності від температури. Але найголовніше, що має бути враховане при оцінці кавітації, це її просторова розподіленість, тобто на різній відстані від випромінювача можна спостерігати різні значення кавітаційної активності. Саме це питання піднімається у праці [5] і на основі аналізу поведінки кавітаційних скупчень, автори приходять до висновку щодо викликати колапс у дальній кавітаційній зоні за допомогою додаткового низькочастотного джерела ультразвукового випромінювання. Це дозволяє звільнити та використовувати енергію кавітаційних скупчень і призводить до підвищення ефективності, яке доведено за допомогою експерименту з використанням установки з двома несинхронізованими випромінювачами ультразвуку високої та низької амплітуди, які разом дають більшу площу кавітаційної активності, ніж сума робочих площ кожного випромінювача окремо. Отже, є сенс у обробці виробу, що очищується декількома різноамплітудними випромінювачами одночасно. Висновок щодо ефективності використання ультразвукового очищення виробів складної конфігурації з внутрішніми отворами можна зробити на основі [6], в якій за допомогою ультразвуку та запропоновано методологію маринізації обладнання, в лабораторних умовах доведено ефективність підводного ультразвукового очищення.

Отже, питання підвищення ефективності ультразвукового очищення є досить актуальним та досліджуваним. Оскільки одним із шляхів його розв'язку є розробка автоматизованої системи керування процесом, яка передбачає формування керуючого впливу на основі оцінки стану очищувального об'єкта. В цій роботі розглянуто моделювання параметрів, на основі яких можна сформулювати висновок про ступінь забруднення об'єкта.

Постановка задачі. Шляхом моделювання необхідно визначити залежність між ультразвуковими відгуками, що зафіксовано датчиками, та перебігом процесу очищення. Моделювання провести для виробів як простої, так і складної конфігурації. Визначити вплив товщини та щільності забруднення на ультразвукові сигнали датчика. Проаналізувати, як геометричні особливості очищувального тіла змінюють картину ультразвукових відгуків в процесі очищення.

Викладення матеріалу та результати. *Акустична хвиля в гетерогенному просторі.* Проходження акустичної хвилі через середовище викликає певні динамічні коливання тиску, температури, щільності. Ці процеси можна описати або серією часткових диференціальних рівнянь першого порядку, заснованих на збереженні маси, імпульсу та енергії в середині середовища або за допомогою єдиного диференціального рівняння другого порядку. Наприклад, у класичному випадку акустичної хвилі невеликої амплітуди, що поширюється через однорідне середовище без втрат може задаватись системою рівнянь першого порядку (закони збереження імпульсу, маси та відношення тиску до щільності) [7]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{\rho_0} \tilde{N} p, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -\rho_0 \tilde{N} \chi u, \\ p &= c_0^2 r, \end{aligned} \quad (1)$$

де u - акустична швидкість частинки, p - акустичний тиск, ρ - акустична щільність, ρ_0 - навколишня (або рівноважна) щільність, а c_0 - ізотропна швидкість звуку. Ці закони можна об'єднати в єдине хвильове рівняння

$$\tilde{N}^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0. \quad (2)$$

Основні функції моделювання, що описані в k-wave, побудовані на розв'язуванні зв'язної системи першого порядку, а не еквівалентне їй рівняння другого порядку. Це надає можливість легко включати джерела маси та сили до дискретних рівнянь, враховувати ідеальний анізотропний шар для поглинання акустичних хвиль та обчислювати акустичну інтенсивність [8].

Якщо середовище розповсюдження гетерогенне, то неоднорідності призводять до перетворення рівняння (3) до вигляду [9]

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} &= -\frac{1}{r_0} \tilde{N} p, \\ \frac{\partial p}{\partial t} &= -r_0 \tilde{N} \kappa u - u \tilde{N} r_0, \\ p &= c_0^2 (r + d \tilde{N} r_0 - L r), \end{aligned} \quad (3)$$

де d - зміщення акустичної частинки. Оператор L є лінійним інтегро-диференціальним оператором, що відповідає за акустичне поглинання та дисперсію та задається наступним чином [10]

$$L = t \frac{\partial}{\partial t} \left(-\tilde{N}^2 \right)^{\frac{y}{2}-1} + h \frac{\partial}{\partial t} \left(-\tilde{N}^2 \right)^{\frac{y+1}{2}-1}. \quad (4)$$

Тут t і h - коефіцієнт пропорційності поглинання та дисперсії

$$t = -2\alpha_0 c_0^{y-1}, \quad h = 2\alpha_0 c_0^y \tan(\rho y / 2), \quad (5)$$

де α_0 - префактор закону про потужність в $\text{Nr} \text{ (rad/s)}^{-y} \text{ m}^{-1}$, а y - показник закону потужності.

При моделюванні розповсюдження акустичних хвиль для поставленої задачі необхідно враховувати такі нелінійні складові, як поглинання та дисперсію. Це робить задачу досить складною та вимагає застосування методів, що дозволяють моделювати масштабні акустичні процеси.

Псевдоспектральні методи та метод k-space. Зазвичай в акустиці для числового розв'язання диференціальних рівнянь в часткових похідних використовують методи кінцевих або граничних елементів. Але для моделювання високочастотних хвиль вони є громіздкими та повільними, що пов'язано з великою кількістю точок обчислення та малими часовими кроками для мінімізації дисперсії. Застосування псевдоспектрального методу вирішує першу проблему, а метод k-space – другу [11]. Відбувається поєднання спектрального обчислення просторових похідних (в даному випадку метод колокації Фур'є) з часовим поширювачем, що представлений методом k-space.

У стандартному методі кінцевих різниць використовується локальне обчислення градієнтів на основі значень в сусідніх точках сітки, більш точне значення отримують шляхом встановлення поліному вищого порядку до більшої кількості точок. Спектральний метод Фур'є продовжує цю ідею і має певні переваги: амплітуди компонентів Фур'є можна швидко обчислити за допомогою швидкого перетворення Фур'є, основні функції є синусоїдальними, що дозволяє використовувати дві точки на довжину хвилі.

Хоча спектральний метод Фур'є колокації підвищує ефективність у просторовій області, для обчислення градієнтів у часовій області все ще потрібні звичайні схеми кінцевих різниць. Наприклад, використовуючи хвильове рівняння другого порядку для однорідного середовища без втрат

$$\tilde{N}^2 p(x,t) - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} p(x,t) = 0 \quad (6)$$

просте псевдоспектральне рішення можна отримати на основі просторового перетворення Фур'є з дискретизацією похідної часу, використовуючи точну центральну різницю другого порядку

$$\frac{p(k,t+\Delta t) - 2p(k,t) + p(k,t-\Delta t))}{\Delta t^2} = -(c_0 k)^2 p(k,t), \quad (7)$$

де k – хвильовий тривимірний вектор, Δt - відстань між часовими точками. Використовуючи співвідношення для перетворення Фур'є похідної обмеженої функції

$$F \left\{ \frac{\partial^2}{\partial x^2} f(x) \right\} = -\frac{1}{2\rho} \partial f(x) (-ik_x) e^{-ik_x x} dx = ik_x F \{ f(x) \}, \quad (8)$$

де F - просторове перетворення Фур'є. Кінцеве наближення різниці тимчасової похідної вносить помилки в числове рішення, на які можна впливати лише зменшуючи крок обчислення. Методи, що класифікуються в основному, як k -space методи намагаються послабити це обмеження, щоб дозволити застосовувати більші часові кроки без шкоди для точності. Використовуючи точне рішення гомогенного рівняння хвилі без втрат для початкового розподілу тиску [12]

$$p(k, t) = \cos(c_0 k t) p(k, 0), \quad (9)$$

тоді псевдоспектральну схему для рівняння (8) можна отримати, зробивши у (9) заміну на кінцеву різницю $p(k, t + \Delta t) - 2p(k, t) + p(k, t - \Delta t)$. Після необхідних перетворень, отримується наступне співвідношення [17]

$$\frac{p(k, t + \Delta t) - 2p(k, t) + p(k, t - \Delta t)}{\Delta t^2 \sin^2(c_0 k \Delta t / 2)} = -(c_0 k)^2 p(k, t). \quad (10)$$

При порівнянні псевдо спектральних схем (8) та (12) очевидно, що Δt^2 (8) можна замінити на $\Delta t^2 \sin^2(c_0 k \Delta t / 2)$ (12), і для достатньо малих Δt можна використовувати це наближення, але для більших часових кроків додаткова складова \sin^2 забезпечує точне рішення без чисельної дисперсії.

За допомогою розширення точну псевдоспектральну схему розв'язування акустичних рівнянь, виражену сполученими частковими диференціальними рівняннями першого порядку, можна отримати шляхом заміни Δt на $\Delta t^2 \sin^2(c_0 k \Delta t / 2)$ [12]. Оператор

$$k = \sin c(c_{ref} k \Delta t / 2) \quad (11)$$

називається оператором k -space, де c_{ref} - скаляр швидкості звуку.

Для масштабних акустичних моделювань, де хвилі поширюються на відстані сотень чи тисяч довжин хвиль, ця корекція стає критично важливою [12]. Без цієї поправки кінцеві наближення різниці часової похідної накопичують фазові помилки, що стає проблемою для великих симуляцій. Методом k -space є вільним від дисперсії незалежно від розміру моделювання. Але коли нелінійність, неоднорідні параметри матеріалу або акустичне поглинання включаються до керуючих рівнянь, тимчасова дискретизація за допомогою оператора k -space вже не є точною, однак все одно зменшує чисельну дисперсію.

Для спектрального методу колокаціонування Фур'є просторові зрушення можна легко отримати за допомогою властивість зсуву перетворення Фур'є, де

$$F_x \{f(x + Dx)\} = e^{ik_x Dx} F_x \{f(x)\}. \quad (12)$$

Саме метод Фур'є використовується в k -Wave за декількома причинами [9]: простота обчислення оператору k -space, коли градієнти обчислюються з використанням основи Фур'є; необхідний часовий крок, для стабільності $N - 1$ для методу Фур'є, де N - кількість точок сітки в кожному декартовому напрямку, заданому розміром домену. Це робить спектральний метод Фур'є значно економнішим до обчислювальних ресурсів, особливо для масштабних проблем.

Отже, розглянуті методи є вільними від дисперсії незалежно від дисперсії для гомогенного середовища навіть у випадку масштабних акустичних моделювань та прийнятним при наявності нелінійності та неоднорідності параметрів середовища. Це дозволяє їх використовувати при моделюванні високоінтенсивних ультразвукових розповсюджень у різних сферах застосування [13, 14].

Експеримент та результати. Використовуючи програмний модуль k -wave змодельовано дані прямокутного датчика, які отримуються при визначенні наявності забруднення при ультразвуковому очищенні. Для цього змодельовано акустичне поле з різними вхідними параметрами: чисте тіло (рис 1в), забруднення з високою щільністю (рис 1а), забруднення з низькою щільністю (рис 1б). Також розглянемо моделювання забруднення різної товщини, поступово зменшуючи від максимально заданого до його відсутності (рис.2).

Запуск моделювання проводиться за допомогою функції `kspaceFirstOrder2D(kgrid, medium, source, sensor, input_args{:})`, що моделює поширення часових областей компресійних хвиль через двовимірне однорідне або неоднорідне акустичне середовище із заданими чотирма вхідними структурами: обчислювальна сітка, середовищем, джерелом та датчиком. Розрахунок базується на k -space першої ланки, яка враховує поглинання закону потужності та неоднорідну

швидкість та щільність звуку. На кожному часовому кроці параметри акустичного поля у положеннях, визначених структурою датчика, записуються та зберігаються. Нізотропний поглинаючий прикордонний шар, який називається ідеально узгодженим шаром (PML), реалізований для запобігання повторному введенню хвиль, які залишають одну сторону домену з протилежного боку. Це дозволяє обчислювати нескінченне моделювання домену за допомогою невеликих обчислювальних сіток.

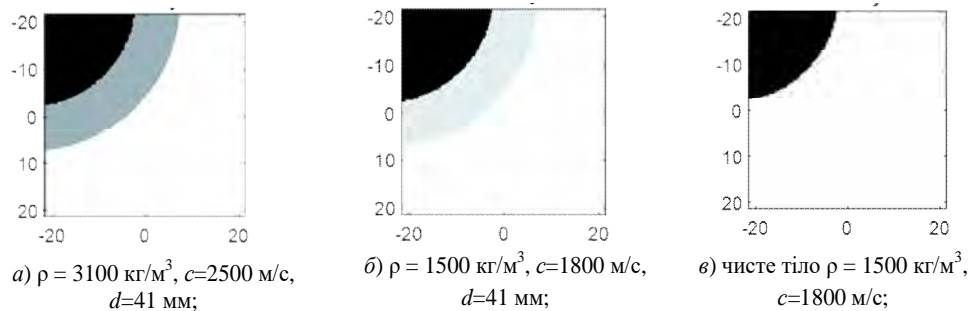


Рис. 1. Початкові дані для моделювання залежності між забрудненням та відгуком акустичного поля де ρ – щільність забруднення або тіла, c – швидкість ультразвукової хвилі, d – товщина забруднення

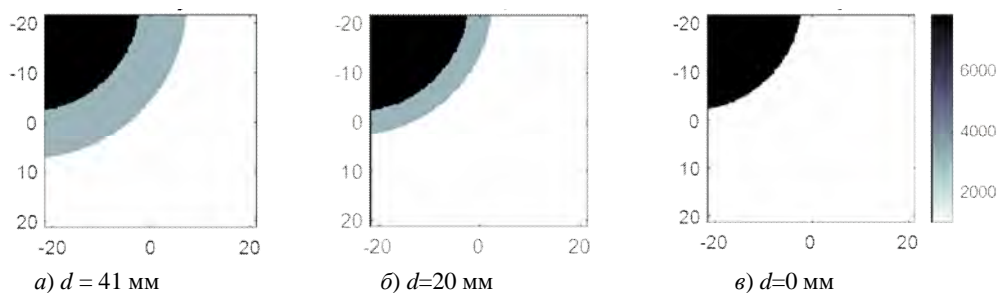
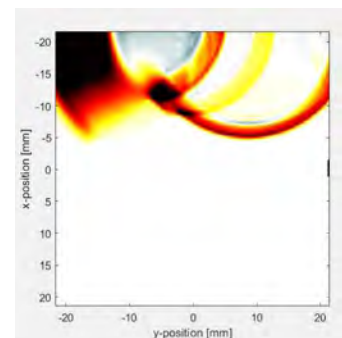


Рис. 2. Зміна товщини забруднення в процесі очищення тіла зі щільністю $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$, швидкістю УЗ хвиль $c=2500 \text{ м/с}$ (чисте тіло з щільністю $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c=5170 \text{ м/с}$)

Розглянемо експеримент з наступними початковими умовами: джерело ультразвуку знаходиться на дні баку, датчик - на перпендикулярній йому стороні, досліджуване тіло задамо шляхом визначення його щільності в певних комітках обчислювальної сітки (рис 1.б). За щільність рідини приймемо щільність води $\rho=1000 \text{ кг/м}^3$, а за щільність тіла - $\rho=7800 \text{ кг/м}^3$ (відповідає залізу) (рис. 3). При розповсюдженні хвилі видно, що окрім основної хвилі, що продукується джерелом, відбувається часткове відзеркалення у двох місцях: спочатку від забруднення, а потім вже від основного тіла. Саме амплітуда та кількість значних коливань і будуть визначати ступінь очищення тіла.

Рис. 3. Моделювання поля тиску при обробці тіла забруднення на тілі з щільністю $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c=1800 \text{ м/с}$ та товщиною $d=20 \text{ мм}$ на 18 мс (джерело знаходиться в позиції (16, -20), датчик в позиції (0, 22))



На рис.4 можна побачити як змінюється сигнал при зменшенні товщини забруднення. Так при максимальному забрудненні товщиною $d=41 \text{ мм}$ (рис.4а) максимальна амплітуда акустичного коливання складає 0.2МПа, амплітудний сплеск єдиний. При зменшенні товщини забруднення до $d=20 \text{ мм}$ (рис.4б) максимальна амплітуда акустичного коливання вже близько 0.4 МПа, значних амплітудних сплеск два – перший формується при віддзеркаленні від забруднення і складає 0.4 МПа, другий при віддзеркаленні від тіла та складає близько 0.2 МПа. Коли тіло стає очищеним (рис.4в), перший амплітудний сплеск зникає, лишається лише один, який стає близько 0.45 МПа. Отже, при забрудненні значної щільності в процесі очищення можуть виникати декілька амплітудних сплесків в залежності від товщини та геометричних особливостей тіла, а також постійно буде зростати амплітуда найбільшого коливання. Очищене тіло характеризується максимальною амплітудою та мініма-

льною кількістю значних коливань. Це було розглянуто випадок, коли під дією ультразвуку процес очищення відбувався шляхом зменшення товщини забруднення.

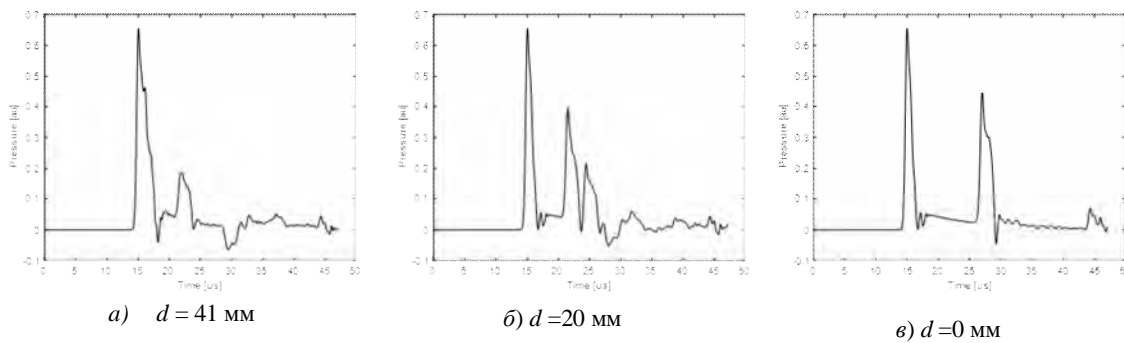


Рис. 4. Значення акустичного тиску при обробці забрудненого тіла з щільністю забруднення $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$, швидкістю УЗ хвиль $c=2500 \text{ м/с}$ (чисте тіло з щільністю $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c=5170 \text{ м/с}$)

У випадку, коли очищення відбувається шляхом зменшення щільності забруднення, спостерігається схожа картина (рис. 5). При зменшенні щільності забруднення від $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$ до $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$ (рис. 4а, 5а) акустичний тиск максимального коливання зростає з 0.2 МПа до 0.3 МПа, додаткові акустичні сплески відсутні. При зменшенні товщини забруднення з $\rho=1500$ від $d=41$ до 20 мм спостерігається картина аналогічна першому випадку, тобто з'являється додатковий значний сплеск (рис.5б) та підвищується тиск максимального коливання (з 0.38 до 0.42 МПа).

Виникнення додаткових відзеркалень пояснюються частковим поглинанням ультразвукових хвиль згідно закону

$$P = P_0 W^y,$$

де P_0 – початкова амплітуда, а P – амплітуда на відстані, а y – коефіцієнт, що залежить від властивостей середовища. Отже, якщо маємо забруднення незначної товщини, то воно сприяє тому, що з'являються додаткові амплітудні коливання на границях середовищ з різними щільностями, а відповідно і різною спроможністю до поглинання ультразвукових хвиль.

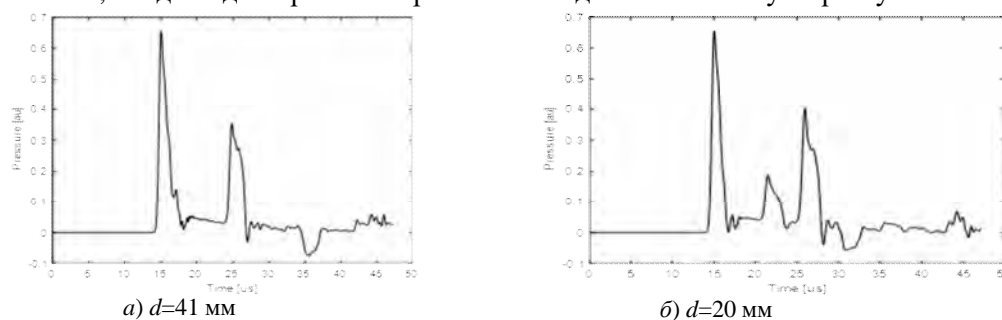


Рис. 5. Значення акустичного тиску при обробці забрудненого тіла з щільністю забруднення $\rho = 1500 \text{ кг/м}^3$, швидкістю УЗ хвиль $c=1800 \text{ м/с}$ (чисте тіло з щільністю $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c=5170 \text{ м/с}$)

Досі було розглянуто випадки, коли очищуємо тіло правильної форми, змодельємо ситуацію, коли тіло має більш складну геометричну форму (рис. 6). Наявність геометричних особливостей змінює картину акустичного тиску, що отримується в процесі очищення: постійне зростання амплітуди тиску, характерне для попереднього моделювання, зберігається на початковій стадії очищення (рис. 7а – 7б), але припиняється на стадії очищення отвору (рис. 7в – 7г): значення максимального додатного тиску зменшується (з 0.41 до 0.31 МПа), але зростає амплітуда від'ємного тиску (з 0 до -0.1 МПа). Отже, різниця між максимальним та мінімальним тиском майже зберігається, зменшується додатня та від'ємна частини.

Таким чином, на основі даних, що отримує датчик можна зробити висновок про стан ультразвукового очищення та необхідність продовжувати його. Є сенс продовжувати процес до того часу, доки зростає різниця між максимальне амплітудне відхилення. Кількість амплітудних сплесків можуть визначати тип забруднення за щільністю та бути основою для визначення інтенсивності ультразвуку, який необхідно продукувати для найбільш ефективного очищення.

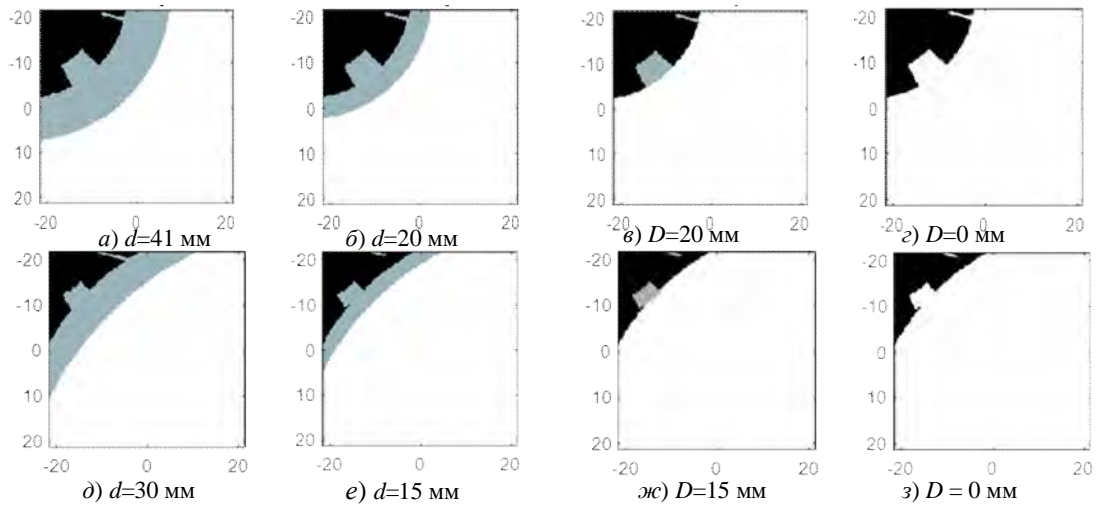


Рис. 6. Зміна товщини забруднення щільністю $\rho = 3100 \text{ кг/м}^3$ зі швидкістю УЗ хвиль $c=2500 \text{ м/с}$ в процесі очищення тіла ($\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$ та швидкістю УЗ хвиль $c=5170 \text{ м/с}$) з геометричними особливостями (отвір товщиною D)

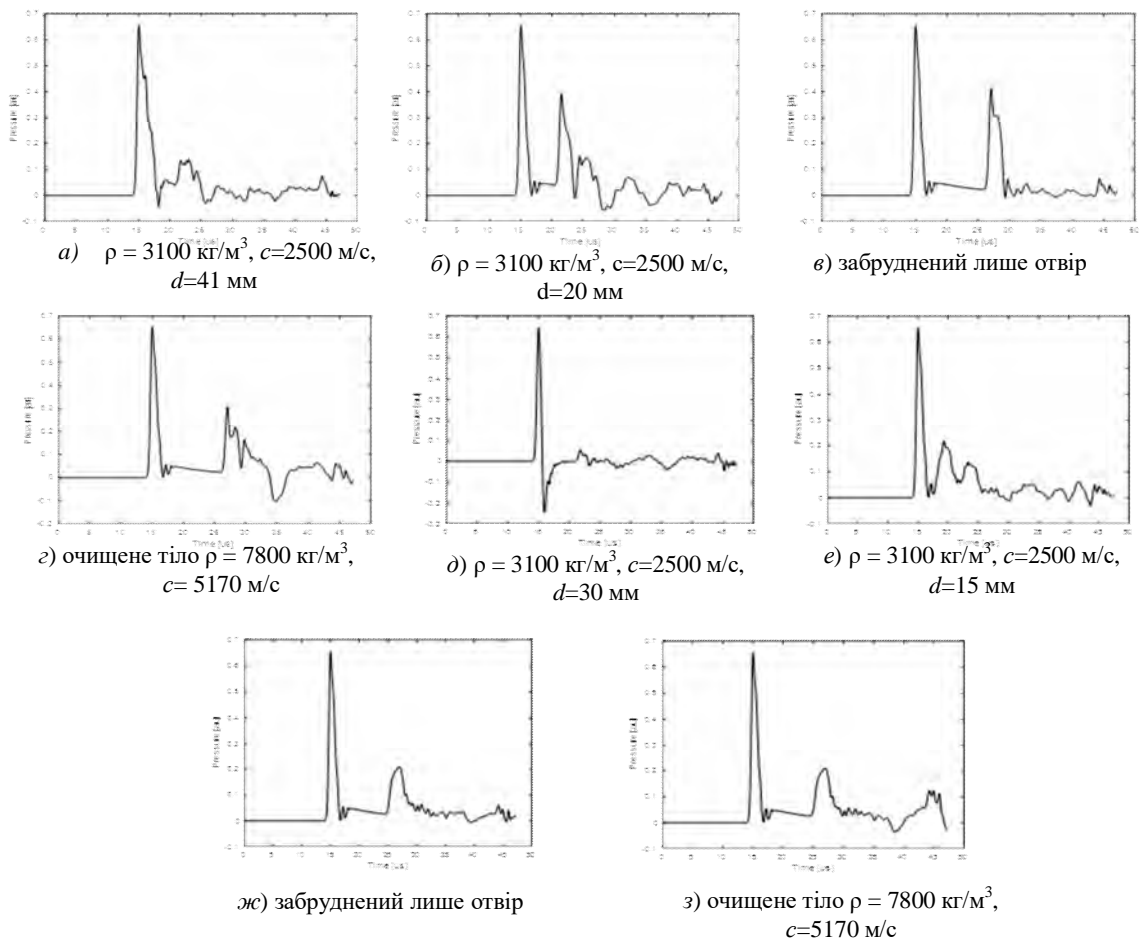


Рис. 7. Значення акустичного тиску при очищенні тіла, де ρ – щільність забруднення або тіла, c – швидкість ультразвуковий хвиль, d – товщина забруднення

Висновки та напрями подальших досліджень. На основі проведеного моделювання встановлено наступні залежності: щільність забруднення впливає на максимальне амплітудне відхилення, а товщина забруднення на кількість амплітудних сплесків акустичного тиску.

Так забруднення високої щільності та товщини буде значно поглинати ультразвукове випромінювання і надавати незначне віддзеркалення (для нашого досліду до 0,2 МПа), при очищенні, а відповідні зміни товщини або щільності забруднення значення максимального акустичного тиску віддзеркалення буде збільшуватись (до 0, 45 МПа). Зміна товщини також продукує формування додаткових амплітудних коливань, кількість яких залежить від числа нашарувань різної щільності.

Таким чином, в процесі ультразвукового очищення має спостерігатися стійке збільшення максимального відхилення тиску, при цьому водночас спочатку зростатиме кількість значних відхилень амплітуд під час відшаровування забруднення та зменшення його товщини, а потім для очищеного тіла вони зникнуть, лишивши лише коливання, що обумовлюються геометрією.

Отже, для визначення ступеню забруднення об'єкта, а, відповідно, і необхідності продовжувати процес ультразвукового очищення необхідно враховувати максимальне відхилення акустичного тиску та кількість значних відхилень.

Таким чином, на основі аналізу ультразвукового відхилення можна робити висновок про стан процесу ультразвукового очищення і необхідність його продовжувати.

Список літератури

1. **Yamashita T., Ando K.** Low-intensity ultrasound induced cavitation and streaming in oxygen-supersaturated water: Role of cavitation bubbles as physical cleaning agents. *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 52, pp. 268-279 (2019). doi:10.1016/j.ultsonch.2018.11.025.
2. **Niemczewski B.** Cavitation intensity of water under practical ultrasonic cleaning conditions. *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 21, pp. 354-359 (2014). doi:10.1016/j.ultsonch.2013.07.003
3. **Saalbach K.-A., Twiefel J., Wallaschek J.** Self-Sensing Cavitation Detection in Ultrasound-Induced Acoustic Cavitation. *Ultrasonics*, vol. 94, pp. 401-410 (2018). doi:10.1016/j.ultras.2018.06.016.
4. **Xu H., Tu J., Niu F., Yang P.** Cavitation dose in an ultrasonic cleaner and its dependence on experimental parameters. *Applied Acoustics*, vol. 101, pp. 179-184 (2016). doi:10.1016/j.apacoust.2015.08.020.
5. **Nigmatzyanov R., Kazantsev V., Prikhod'ko V., Sundukov S., Fatyukhin D.** Improvement in Ultrasound Liquid Machining by Activating Cavitation Clusters. *Russian Engineering Research*, vol. 39, pp. 699-702 (2016). doi:10.3103/S1068798X19080112.
6. **Lais H., Lowe S., Wrobel L., Gan T. H.** Ultrasonic Transducer Array Performance for Improved Cleaning of Pipelines in Marine and Freshwater Applications. *Applied Sciences*, vol. 9, pp. 43-53 (2019). doi:10.3390/app9204353.
7. **Vanco L., Pierce A.** Acoustics: An Introduction to Its Physical Principles and Applications. *Computer Music Journal*, vol. 22, pp. 68 (1999). doi: 10.2307/3680971.
8. **Treeby B., Jaros J., Rendell A., Cox B.T.** k-Wave. A MATLAB toolbox for the time domain simulation of acoustic wave: User Manual (2016). http://www.k-wave.org/manual/k-wave_user_manual_1.1.pdf.
9. **Pierce A.D.** Mathematical Theory of Wave Propagation. In *Encyclopedia of Acoustics*, M.J. Crocker (Ed.), (2007). doi:10.1002/9780470172513.ch2.
10. **Treeby B., Cox B.T.** Modeling power law absorption and dispersion for acoustic propagation using the fractional Laplacian. *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 127(5), pp. 2741–2748 (2010). doi:10.1121/1.3377056.
11. **Treeby B., Cox B.T.** k-Wave: MATLAB toolbox for the simulation and reconstruction of photoacoustic wave fields. *Journal of biomedical optics*, vol. 15, pp. 0213 – 0214 (2010). doi:10.1117/1.3360308.
12. **Tabei M., Mast T.D., Waag R.C.** A k-space method for coupled first-order acoustic propagation equations. *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 111(1), pp. 53–63 (2002). doi:10.1121/1.1421344.
13. **Morkun V. S., Morkun N. V., Pikilnyak A. V.** Augmented reality as a tool for visualization of ultrasound propagation in heterogeneous media based on the k-space method. *CEUR Workshop Proceedings*, vol. 2547, pp. 81-91 (2020).
14. **Morkun V., Pikilnyak A.** Simulation of high-energy ultrasound propagation in heterogeneous medium using k-space method. *Metallurgical and Mining Industry*, vol. 6, pp. 23-27 (2014).

Рукопис подано до редакції 23.03.2020

М.В. ТИМОФЄЄВ, канд. техн. наук, доц.
Київський національний університет будівництва і архітектури
Г.В. ШАМРІНА, Д. О. ХОХРЯКОВА, кандидати техн. наук, доценти
Донбаська національна академія будівництва і архітектури

ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЗБІРНИХ СИСТЕМ ЗОВНІШНІХ СТІН З ВИКОРИСТАННЯМ ЦЕМЕНТНИХ ПЛИТ КНАУФ AQUAPANEL® OUTDOOR ЗА УМОВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ БУДІВЛІ

Мета. Визначення областей можливого застосування збірних систем зовнішніх стін із використанням цементної плити КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor на основі відповідності їх приведеного опору теплопередачі мінімальним нормативним вимогам України, що встановлюються при розрахунках енергоефективності будівель.

Методи дослідження. Чисельне моделювання двовірних температурних полів та теплових потоків з використанням програми THERM 7.5, аналітичні розрахунки енергетичних та теплотехнічних показників.

Наукова новизна. Обґрунтовано можливість застосування в кліматичних умовах України конструктивних рішень збірних систем зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor на основі системного принципу, що пов'язує теплотехнічні розрахунки окремої конструкції з розрахунками енергоефективності будівлі.

Практична значимість. Результати розрахунків чисельних значень лінійних коефіцієнтів теплопередачі збірних систем зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor і вузлових з'єднань для каркасно-монолітних будівель включені до змін в ДСТУ Б В.2.6-189:2013 «Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель». Зміна №1. Результати приведених у статті досліджень дозволяють значно спростити вибір конструкції зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor на стадії прийняття проєктних рішень.

Результати. Встановлено, що прийняті на основі європейської практики конструктивні рішення збірних систем зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor з найбільш типовими конструктивними елементами каркасно-монолітної будівлі можуть бути застосовані лише у промислових (сільськогосподарських) будівлях, оскільки їх приведені опори теплопередачі не відповідають вимогам ДБН В.2.6-31:2016, що встановлюються при розрахунках енергоефективності житлових і громадських будівель. При доробці найбільш тепловитратних вузлових з'єднань (примикання перекриття до зовнішньої стіни з неповним її обпиранням на залізобетонну плиту; примикання внутрішніх вертикальних конструкцій (колона) до зовнішньої стіни) можливе застосування в житлових і громадських будівлях з прогнозованим нормативним значенням рівня енергоефективності «С».

Ключові слова: приведений опір теплопередачі, лінійний коефіцієнт теплопередачі, збірні системи зовнішніх стін, плита КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-11-16

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Потенціалом підвищення енергоефективності є створення державою досконалої нормативно-правової бази, яка б стимулювала до енергозбереження. На утримання будівель в Україні приходиться біля 40 % загального енергоспоживання. Тому серед основних напрямків впровадження політики підвищення енергоефективності є розробка та ефективна реалізація будівельних норм і правил, які встановлюють сучасні вимоги до енергоефективності будівель. За останній час в будівельних нормах України відбулося значне збільшення вимог до теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій, але існує проблема недостатності в цих нормах даних для виконання теплотехнічних розрахунків, зокрема в ДСТУ Б В.2.6-189:2013 наводиться дуже обмежена кількість значень лінійних коефіцієнтів теплопередачі для вузлових з'єднань конструкцій різного типу і з різних матеріалів. Збірна система зовнішніх стін із застосуванням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor характеризується теплотехнічною неоднорідністю, яка визначається її конструктивними особливостями. Відсутність в нормативних документах України до 2019 року необхідних довідкових даних щодо лінійних коефіцієнтів теплопередачі у вузлових з'єднаннях для таких систем значно утруднювала розрахунки енергопотреб будівлі, могла призводити до помилок у визначенні показників енергоефективності, і таким чином, стримувала можливість широкого застосування збірних систем.

Аналіз досліджень і публікацій. У роботах [1 - 4] розглянуто методичні та організаційні засади для рішення проблеми забезпечення енергоефективності об'єктів будівництва. Однак

вони розглядають лише стан проблеми на момент написання і не відображають останні зміни у нормативній базі України.

В існуючій науковій і довідковій літературі країн Європи [5 - 12], де є значний досвід використання подібних конструкцій, наводяться дані досліджень по визначенню лінійних коефіцієнтів теплопередачі та визначенню інших теплотехнічних показників для характерних вузлових з'єднань в будівлі. Однак ці дані неможливо застосовувати в нашій країні внаслідок більш жорстких кліматичних умов.

Останні дослідження авторів [13 - 15] присвячені теплотехнічним характеристикам оболонки будівлі та підвищення ефективності використання збірних систем зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor (далі – збірних систем зовнішніх стін 1 - 4), результати яких впроваджені в ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Зміна №1.

В дослідженні [15] для чотирьох варіантів збірних систем зовнішніх стін, що наведені в ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Зміна №1, в яких за конструктивним рішенням було прийнято однорядне та дворядне розташування металевих суцільних стоякових профілів компанії "STEELCO" з висотою перетину 100, 150 і 200 мм, було встановлено приведені опори теплопередачі та мінімальні температури в характерних для обраних варіантів конструкцій місцях теплопровідних включень. Враховувався термічний вплив лише тих теплопровідних включень, що є характерними особливостями обраних типів огорожувальних конструкцій, що за методикою ДСТУ Б В.2.6-189:2013 обираються при визначенні необхідної товщини теплоізоляційного шару. Це вплив металевих стійок каркасу стіни, які є містками холоду, а також місця стиків непрозорої частини стіни з вікном. Встановлено, що вказані теплопровідні включення значно знижують опір теплопередачі конструкції у порівнянні із термічно однорідною частиною стіни без урахування теплопровідних включень. Серед обраних варіантів збірних систем 1 – 4 виявлено ті, що відповідають мінімальним вимогам по приведеному опорі теплопередачі для будівель різного призначення в I - й та II - й температурних зонах України.

Але для визначення відповідності мінімальним вимогам по приведеному опорі теплопередачі при визначенні енергопотребі для опалення та охолодження згідно ДСТУ Б В.2.6-189:2013, тобто розрахунках енергоефективності будівель, потрібно врахувати також теплопровідні включення, що є характерними конструктивними особливостями всієї будівлі.

Найбільш поширеним способом зведення сучасних житлових та громадських будівель, де можуть застосовуватись збірні системи зовнішніх стін 1 - 4, є каркасно-монолітне будівництво. Тому для дослідження доцільно обрати характерні вузлові з'єднання, що є найбільш розповсюдженими в проєктній практиці для такого типу будинків.

Постановка завдання. Завданням дослідження є виявлення можливості застосування збірних систем зовнішніх стін 1 – 4 для будівель з каркасно-монолітною технологією будівництва. Для цього необхідно встановити відповідність їх приведеного опорі теплопередачі мінімальним нормативним вимогам України, які висуваються згідно з ДСТУ Б В.2.6-189:2013 до огорожувальних конструкцій при розрахунках енергопотребі для опалення та охолодження, що потребує врахування термічного впливу теплопровідних включень, які є характерними з точки зору конструктивного рішення будівлі. Розрахунки приведеного опорі теплопередачі за вимогами ДБН В.2.6-31:2016 потребують чисельного моделювання двовірних температурних полів та теплових потоків, і визначення лінійних коефіцієнтів теплопередачі в місцях вузлових з'єднань збірних систем 1 - 4 з найбільш характерними конструктивними елементами каркасно-монолітної будівлі. Такі найбільш типові вузлові з'єднання були обрані за рекомендаціями [7]: примикання цоколя до перекриття над підвалом, примикання цоколя до підлоги по ґрунту, примикання вікна до стіни, внутрішні кути, зовнішні кути, примикання перекриття до зовнішньої стіни з неповним її обпиранням на залізобетонну плиту, примикання парапету до покриття, примикання внутрішніх вертикальних конструкцій (колона) до зовнішньої стіни (рис. 1). Чисельне моделювання теплових потоків у вузлових з'єднаннях, обґрунтування вибору розрахункових ділянок для визначення лінійних коефіцієнтів теплопередачі і їх розрахунки виконувались за рекомендаціями ДСТУ В.2.6-189:2013 і ДСТУ ISO 10211-2:2005 з використанням програми THERM 7.5, тестування якої було проведено, аналогічно порядку, наведеному в дослідженні [15]. Попередньо проведені розрахунки значень приведених опорів теплопередачі дозволили у подальшому моделюванні горизонтальних вузлів обмежуватися ділянками стіни без стійок,

тому довжина основного поля конструкції від грані теплопровідного включення приймалася 0,2 м (рис.1 г, д, е, ж).

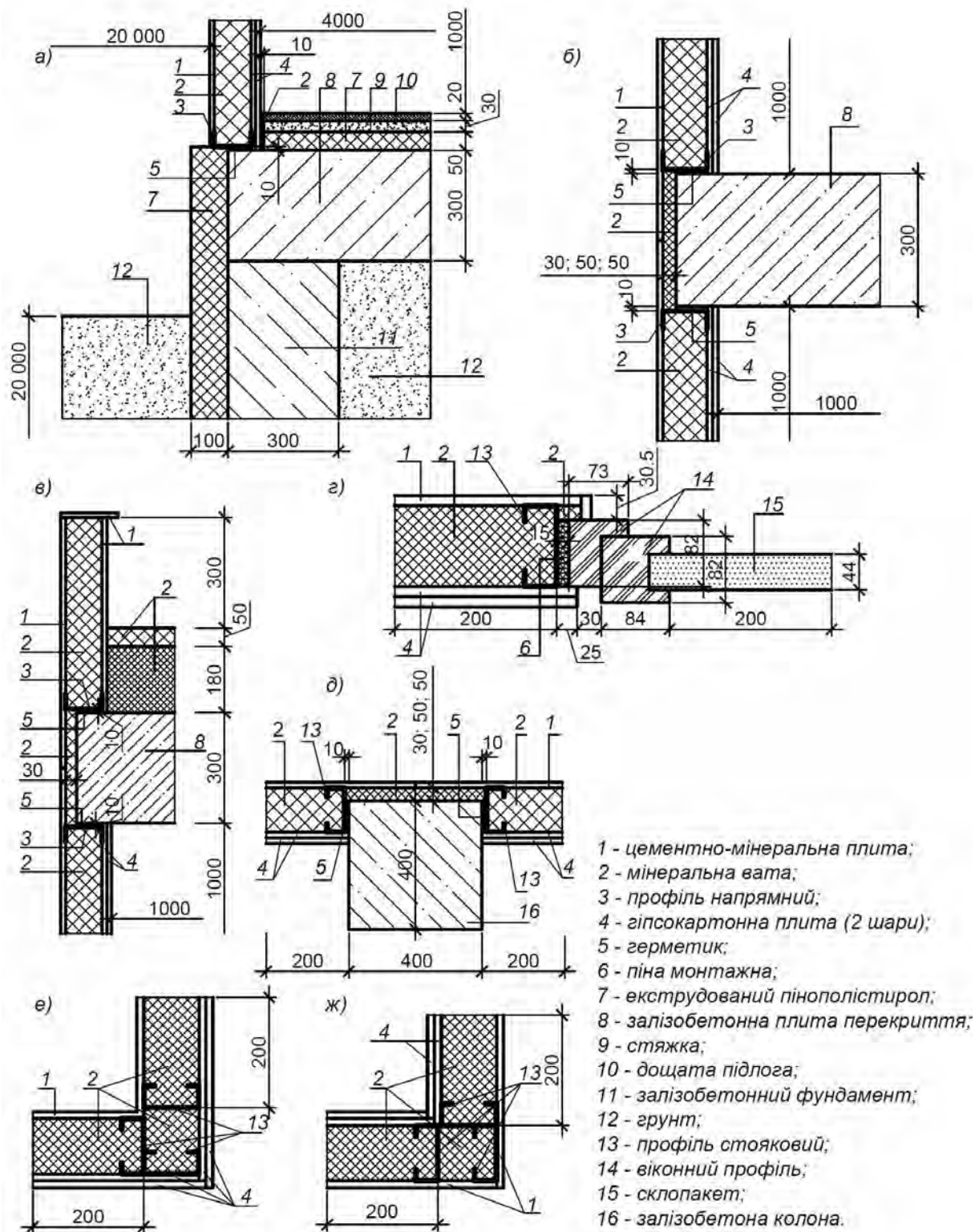


Рис. 1. Типові вузлові з'єднання для збірної системи 1: а - примикання цоколю до підлоги по ґрунту; б - примикання перекриття до зовнішньої стіни з неповним її опиранням на залізобетонну плиту; в - примикання паропету до покриття; г - примикання вікна до стіни; д - примикання внутрішніх вертикальних конструкцій (колона) до зовнішньої стіни; е - внутрішні кути; ж - зовнішні кути

Розрахунки приведених опорів теплопередачі виконувались для фрагменту зовнішньої стіни з вікнами, що має найбільш типові для житлових будинків геометричні параметри. По вертикалі фрагмент обмежений несучими колонами будинку, по горизонталі знизу та зверху – плитами міжповерхового перекриття. Загальний вигляд фрагменту наведений на рис. 2.

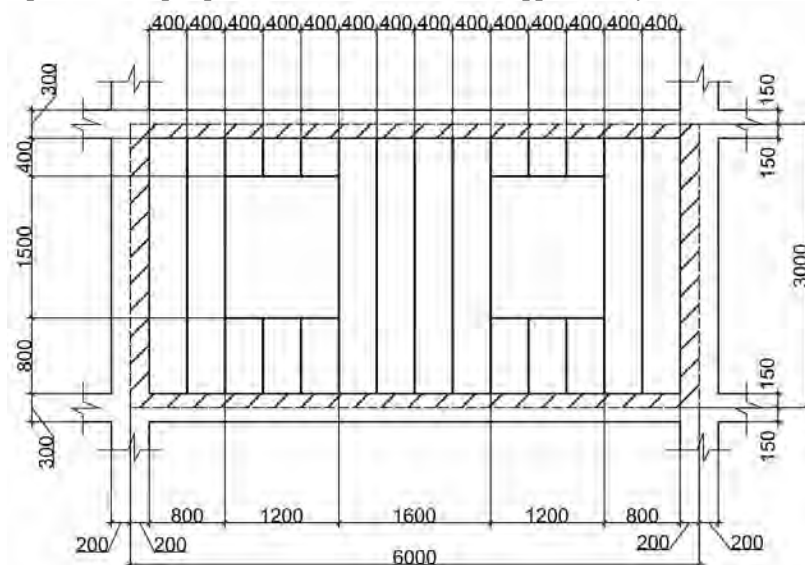


Рис.2. Загальний вигляд фрагмента фасаду зовнішньої стіни

Викладення матеріалу та результати. Значення приведених опорів теплопередачі елементів теплоізолюючої оболонки будівлі є конкретною характеристикою конкретної будівлі, тому виконані далі розрахунки мають на меті оцінити окремі елементи на відповідність вимогам (4) ДБН В.2.6-31:2016 та (1) ДСТУ Б В.2.6-189:2013 співвідношення приведенного опору теплопередачі ($R_{\Sigma np}$) і нормативного значення опору теплопередачі ($R_q min$) у вигляді

$$R_{\Sigma np} \geq R_q min.$$

Розрахунки лінійних коефіцієнтів теплопередачі k вузлових з'єднань за рис. 1 і приведених опорів теплопередачі для обраного фрагменту зовнішньої стіни для збірних систем 1 - 4 (ДСТУ Б В.2.6-189:2013. Зміна №1) наведені в зведеній табл. 1.

Таблиця 1

Зведена таблиця розрахунків лінійних коефіцієнтів теплопередачі k вузлових з'єднань і приведених опорів теплопередачі типового фрагменту конструкції збірних систем 1 - 4

Варіант стіни	Основне поле стіни, R_{Σ}	Лінійний коефіцієнт теплопередачі k							Приведений опір теплопередачі $R_{\Sigma np}$
		примикання цоколя до перекриття над підвалом	примикання цоколю до підлоги по ґрунту	внутрішні кути	зовнішні кути	примикання перекриття до зовнішньої стіни з неповним її обляганням на залізобетонну плиту	примикання парапету до покриття	примикання внутрішніх вертикальних конструкцій (колона) до зовнішньої стіни	стіна для розрахунків енергоефективності
1-100	2,535	0,027	0,029	0,302	0,206	0,73	0,329	0,822	0,98
1-150	3,647	0,031	0,032	0,282	0,21	0,615	0,275	0,671	1,18
1-200	4,758	0,033	0,031	0,249	0,193	0,588	0,269	0,653	1,32
2-100	4,254	0,020	0,024	0,109	0,037	0,704	0,318	0,751	1,49
2-150	5,365	0,023	0,025	0,124	0,043	0,573	0,274	0,625	1,76
2-200	6,476	0,024	0,027	0,127	0,046	0,566	0,265	0,612	1,84
3-100	4,352	0,03	0,03	0,116	0,094	0,65	0,301	0,76	1,37
3-150	5,464	0,034	0,033	0,113	0,094	0,556	0,263	0,628	1,52
3-200	6,575	0,036	0,036	0,106	0,092	0,541	0,256	0,613	1,6
4-100	4,327	0,021	0,021	0,116	0,114	0,659	0,243	0,77	1,34
4-150	5,43	0,025	0,025	0,112	0,114	0,563	0,266	0,635	1,54
4-200	6,549	0,026	0,026	0,106	0,110	0,548	0,26	0,62	1,63

Оцінка відповідності нормативним вимогам ведеться з урахуванням п. 6.2.1 ДБН В.2.6-31:2016, де за умови виконання вимоги з енергоефективності будівлі в цілому, допускається застосовувати окремі конструктивні елементи теплоізоляційної оболонки із зниженими значеннями опору теплопередачі до рівня 75 % від Rq_{min} для непрозорих частин зовнішніх стін, який повинен бути не меншим за 2,48 м²К/Вт для I - ої температурної зони України та 2,1 м²К/Вт для II - ої температурної зони України.

Розрахунки приведеного опору теплопередачі обраного фрагменту збірних систем зовнішніх стін 1-4, що має найбільш типове конструктивне рішення для житлових і громадських каркасно-монолітних будівель, які виконуються згідно ДСТУ Б В.2.6-189:2013 при розрахунках показника енергоефективності цих будівель з урахуванням лінійних коефіцієнтів теплопередачі в місцях характерних конструктивних вузлових з'єднань будівлі, показали наступне.

1. Конструктивні рішення збірних систем з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor з прийнятими для розрахунку конструктивними рішеннями вузлових з'єднань не можуть бути прийняті у житловому і громадському будівництві, оскільки їх приведені опори теплопередачі не відповідають вимогам ДБН В.2.6-31:2016, що встановлюються при розрахунках енергоефективності цих будівель.

2. При доробці найбільш тепловитратних вузлових з'єднань і досягнення зменшення значень лінійного коефіцієнта для примикання перекриття до зовнішньої стіни з неповним її обпиранням на залізобетонну плиту до 0,3, а для примикання внутрішніх вертикальних конструкцій (колона) до зовнішньої стіни до 0,1, можливе застосування в житлових і громадських будівлях з прогнозованим нормативним значенням рівня енергоефективності «С»:

в I-ій температурній зоні України - збірної системи 2 з однорядним розташуванням стоякових профілів компанії "STEELCO" ПС 150/208/0,7 і ПС 200/208/0,7 з внутрішнім горизонтальним Z подібним профілем ПЗу-0,1 80/0,7 (варіанти 2-150 і 2-200).

в II-ій температурній зоні України - збірної системи 2 з однорядним розташуванням стоякових профілів компанії "STEELCO" ПС 100/208/0,7; ПС 150/208/0,7 і ПС 200/208/0,7 з внутрішнім горизонтальним Z-подібним профілем ПЗу-0,1 80/0,7 (варіанти 2-100, 2-150, 2-200); збірної системи 3 з двохрядним розташуванням стоякових профілів ПС200/208/0,7 і КНАУФ CW 75/50/0,6 без внутрішньої гіпсокартонної плити (варіант 3-200); збірної системи 4 з дворядним розташуванням стоякових профілів ПС200/208/0,7 і КНАУФ CW 75/50/0,6 з внутрішньою гіпсокартонною плитою (варіант 4-200).

Висновки та напрямок подальших досліджень. Конструктивні рішення зовнішніх стін збірних систем 1 - 4 з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor не відповідають вимогам ДСТУ Б В.2.6-189 і ДБН В.2.6-31:2016, що встановлюються при розрахунках енергоефективності житлових (громадських) будівель, з урахуванням лінійних коефіцієнтів теплопередачі, які визначаються конструктивними особливостями всієї будівлі.

Для можливого використання збірної системи 2 з висотою перерізу стійкового профілю 150 мм та 200 мм в I-ій температурній зоні України та збірних систем 3 і 4 з висотою перерізу стійкового профілю 200 мм у II-ій температурній зоні України, як таких, що мають найбільш наближені до мінімально необхідних значення приведеного опору теплопередачі, необхідно виконання додаткових конструктивних проробок і теплотехнічних розрахунків з метою удосконалення конструктивних рішень найбільш тепловитратних вузлових з'єднань, якими є примикання стіни до колони та перекриттів з метою зменшення їх лінійних коефіцієнтів теплопередачі.

Список літератури

1. Тімченко Р. О. Нові підходи в проектуванні енергоефективних будівель / Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, О. В. Шевчук, Л. В. Петрова // Вісник Криворізького національного університету. - 2012. - Вип. 31. - С. 95-99.
2. Толмачов С. Т. Аналіз основних показників енергоефективності в ДВНЗ "Криворізький національний університет" / С. Т. Толмачов, О. В. Ільченко, Д. В. Батраков, С. Л. Бондаревський, Ж. Г. Рожненко, Р. О. Пархоменко // Вісник Криворізького національного університету. - 2012. - Вип. 32. - С. 98-102.
3. Суртаєв В. В. Застосування конструкцій зовнішніх огорожень будівель з підвищеним теплозахистом / В. В. Суртаєв // Вісник Криворізького національного університету. - 2015. - Вип. 40. - С. 128-134.
4. Хорольський В. П. Енергобезпека підприємств промисловості і в будівництві / В. П. Хорольський, Д. В. Хорольський, М. О. Бабенко // Вісник Криворізького національного університету. - 2013. - Вип. 34. - С. 190-194.
5. Veljkovic M. Light steel framing for residential buildings / M. Veljkovic, B. Johansson // Thin-Walled Structures. - 2006. - №44. - Pp. 1272-1279.

6. **Naji S.** Structure, energy and cost efficiency evaluation of three different lightweight construction systems used in low-rise residential buildings / **S. Naji, O. C. Çelik, U. J. Alengaram** [and other] // *Energy and buildings*. – 2014. – №84. – Pp. 727–739.
7. ETA 13/0312. Kits para los Sistemas de fachada AQUAPANEL® WM111.C; WM211.C; WM311.C; WM411.C; WM111.G; WM211.G; WM311.G; WM411.G. [Текст]. Kits para sistemas de paredes exteriores no portantes con paneles de origen mineral, The Catalonia Institute of Construction Technology – Madrid, Spain, 2013, 85 p.
8. Thermal performance of lightweight steel framed wall: The importance of flanking thermal losses/ Paulo Santos1 [and other]// *Article in Journal of Building Physics* – 2013. - Vol: 38 issue: 1, - Pp. 81-98.
9. Thermal bridging atlas of steel construction for improved energy efficiency of buildings (TABASCO). Grant Agreement RFSR-CT-2011-00028. Final report Directorate-General for Research and Innovation, European Commission. - 2011.-pp.141.
10. **Garay R.** Performance assessment of thermal bridge elements into a full scale experimental study of a building façade / **R. Garay, A. Uriarte, I. Apraiz** // *Energy and buildings*. – 2014. – №85. – Pp. 579–591.
11. Eduardo Roque and Paulo Santos. The Effectiveness of Thermal Insulation in Lightweight Steel-Framed Walls with Respect to Its Position * *Buildings* 2017, 7, 13.
12. **Kontogeorgos D. A.** Numerical investigation of the effect of vacuum insulation panels on the thermal bridges of a lightweight drywall envelope / **D. A. Kontogeorgos, I. A. Atsonios, I. D. Mandilaras, M. A. Founti** // *Journal of Facade Design and Engineering*. – 2016. – Vol. 4. issue: 1-2. – P. 3–18.
13. **Г.В. Шамрина** Комплексная система КНАУФ на основе цементных плит AQUAPANEL® Outdoor и перспективы ее применения в Украине / **Г.В. Шамрина, Д.А. Хохрякова, Н.В. Тимофеев** // *Енергоефективність в будівництві та архітектурі: наук.-техн. зб.* – 2017. – Вип. 9. – С. 243-248.
14. **Хохрякова Д.О.** Визначення техніко-економічних показників енергоефективних зовнішніх каркасно-обшивних стін з використанням плит AQUAPANEL® Outdoor / **Д. О. Хохрякова, Г.В. Шамрина, Е.І. Дмитроченкова** // *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: наук.-техн. зб.* – 2018. – Вип. 26. – С. 75- 82.
15. **Тимофеев М. В.** Теплотехнічні показники збірних систем зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Outdoor/ **М.В. Тимофеев, Г. В. Шамрина, Д. О. Хохрякова,** // *Slovak international scientific journal*. – 2020. – № 38, VOL.1. – Pp. 19- 26

Рукопис подано до редакції 16.03.2020

УДК 681.5.08:622.412.13

М.О. АЛЕКСЕЄВ, д-р техн. наук, проф., О.В. ГОЛІНЬКО, магістрант
Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

АВТОМАТИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ЧУТЛИВОСТІ ДАТЧИКІВ СТАЦІОНАРНИХ ТЕРМОКАТАЛІТИЧНИХ АНАЛІЗАТОРІВ МЕТАНУ

Мета. Підвищення надійності контролю вибухонебезпечності рудникової атмосфери та зменшення витрат на обслуговування стаціонарних аналізаторів метану за рахунок застосування автоматичної діагностики та корегування чутливості первинних перетворювачів стаціонарних термокаталітичних аналізаторів метану.

Методи дослідження. Для вирішення цього завдання використано: наукове узагальнення раніше виконаних досліджень; теоретичний аналіз газодинамічних і теплових процесів в термокаталітичних первинних перетворювачах аналізаторів метану; експериментальні дослідження зміни характеристик датчиків аналізаторів з подвійним дифузійним фільтром при зниженні чутливості термоелементів під впливом різних факторів.

Наукова новизна полягає в розробці та обґрунтуванні нового метода автоматичного контролю та регулювання чутливості первинних перетворювачів стаціонарних аналізаторів метану, який полягає в аналізі зміни вихідних характеристик перетворювачів на ділянці виходу вихідної напруги вимірювального моста на горизонтальну частину (плато) характеристики при зміні величини струму через чутливі елементи.

Практичне значення. Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили вдосконалити алгоритм і програму роботи стаціонарного аналізатора метану, реалізованого на базі мікропроцесора ATMEGA8, що дозволяє здійснювати автоматичний контроль і корегування чутливості первинних перетворювачів аналізаторів, шляхом управління електроживленням чутливих елементів перетворювачів та аналізу зміни їх вихідних характеристик.

Результати. Виконані дослідження дозволили обґрунтувати метод автоматичної діагностики стану стаціонарних термокаталітичних аналізаторів метану в частині автоматичного дистанційного контролю чутливості первинних перетворювачів. Показано, що при використанні сучасних мікропроцесорних засобів обробки інформації є можливість не тільки автоматично перевіряти стабільність чутливості первинних перетворювачів, а і здійснити корегування показань газоаналізатора при зміні чутливості. Для реалізації результатів досліджень розроблено алгоритм і програму роботи аналізатора з функцією автоматичного дистанційного контролю чутливості датчиків метану.

Ключові слова: вугільні шахти, вміст метану, контроль, аналізатор, автоматична діагностика, первинні перетворювачі, чутливість.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Широке впровадження сучасних мікропроцесорних засобів обробки інформації в пристроях для контролю та керування машинами, механізмами та технологічними процесами дозволяє не тільки поліпшити якісні показники цих пристроїв та їх надійність, а і реалізувати принципово нові функції, наприклад в частині автоматичної діагностики їх стану. Нині системи автоматичної діагностики активно розробляються і впроваджуються в самих різних галузях виробництва та побуту, починаючи від таких складних об'єктів, як енергоблоки атомних електростанцій [1] і закінчуючи побутовою технікою [2]. Широке застосування системи автоматичної діагностики знаходять і в гірничодобувній галузі, наприклад для діагностики технічного стану конвеєрів [3, 4].

Однією з перспективних сфер для розробки та впровадження системи автоматичної діагностики, є їх використання для контролю працездатності засобів та систем виявлення та спостереження за надзвичайними ситуаціями, в тому числі на таких травмонебезпечних об'єктах як вугільні шахти. Складні гірничо-геологічні умови вугільних родовищ України, значна газовість, схильність вугілля до самозаймання, раптові викиди вугілля та газу обумовлюють значний ризик виникнення аварій, у тому числі таких небезпечних подій як вибухи метаноповітряних сумішей. Однією з причин вибухів є неспрацьовування шахтних стаціонарних аналізаторів метану за наявності недопустимої концентрації метану в атмосфері гірничих виробок шахт [5], що обумовлюється недостатньою їх надійністю.

Зниження ймовірності вибуху метаноповітряних сумішей досягається при збільшенні ймовірності безвідмовного функціонування системи контролю метану і захисного вимкнення напруги. Це пояснюється тим, що ймовірність безвідмовної роботи є зворотною функцією ймовірності відмови і в разі збільшення ймовірності безвідмовної роботи системи контролю метану зменшується ймовірність її відмови, що призводить до зменшення ймовірності загазування виробок і як результат до зменшення ймовірності вибуху метану у виробках [6]. В свою чергу важливе значення для збільшення ймовірності безвідмовної роботи апаратури має збільшення частоти профілактичних заходів із встановлення її працездатності оскільки це призводить до зменшення часу, на який розраховується безвідмовність.

Важливим заходом контролю справності роботи апаратури контролю метану є пробні перевірки її спрацьовування. Нині для перевірки справності системи контролю метану застосовують випробувальну суміш метану з повітрям. Таку перевірку виконують спеціально навчені працівники. Встановлено, що щоденна перевірка справності апаратури контролю метану у порівнянні зі щомісячною перевіркою дозволяє знизити ймовірність вибуху у 300 разів, а за умови зменшення терміну між перевірками апаратури до 4 годин ймовірність вибуху за рік може бути зменшена до 10^{-6} [6]. В той же час щоденна перевірка справності апаратури контролю метану в шахтних умовах з використанням атестованих газових сумішей, обумовлює значні експлуатаційні витрати. Зважаючи на це, актуальною задачею є обґрунтування методів автоматичної дистанційної діагностики стану аналізаторів метану.

Аналіз досліджень і публікацій. При діагностиці стану стаціонарних аналізаторів метану проводиться контроль нульових показань та чутливості аналізаторів. Нині такий контроль здійснюється працівниками шахт шляхом подачі з балонів до виносних датчиків аналізаторів чистого атмосферного повітря та суміші метану з повітрям відомої концентрації.

Здійснити таку перевірку в автоматичному режимі складно. Спроби розробити та реалізувати такий метод автоматичної діагностики здійснювалися ще у вісімдесяті роки минулого століття [7], проте, зважаючи на відносно низький рівень розвитку електроніки, відсутність ефективних засобів для збереження інформації й мікропроцесорних засобів її обробки та недостатню вивченість процесів, що протікають в термokatалітичних датчиках, всі вони виявилися безуспішними.

Питання автоматизації процесу контролю нульових показань розглянуто в роботі [8], авторами якої обґрунтовано метод автоматичної діагностики нульових показань термokatалітичних аналізаторів метану шляхом короткочасного переведення термогрупи газоаналізатора у такий режим роботи, коли на робочому елементі не відбувається окислення метану. Показано, що при використанні сучасних мікропроцесорних засобів обробки інформації є можливість не тільки автоматично перевіряти стабільність нульових показань аналізаторів, а і здійснити корегування

цих показань при їх зміні. Для реалізації результатів досліджень розроблено алгоритм і програму роботи аналізатора з автоматичною діагностикою нульових показань реалізованого на базі мікропроцесора ATMEGA8.

Питання автоматизації процесу контролю чутливості термокаталітичних датчиків аналізаторів метану розглянуто в роботі [9], авторами якої було запропоновано здійснювати діагностику чутливості аналізаторів шляхом аналізу зміни відносного значення амплітуди сплеску вихідної напруги вимірювального моста після паузи постійної тривалості, під час якої вимірювальний міст аналізатора переводиться в режим роботи коли на робочому елементі не відбувається окислення метану. Показано, що нормоване значення сплеску вихідної напруги моста після паузи, яке обумовлене накопиченням метану в реакційній камері датчика, характеризує ефективну дифузійну провідність робочого термоелементу датчика, що дозволяє за цим показником діагностувати зміни чутливості аналізатора. Така діагностика чутливості термокаталітичних датчиків аналізаторів може бути суміщена з процесом контролю їх нульових показань. Проте, як зазначають автори цієї роботи, зміни нормованого значення сплеску вихідної напруги моста після паузи виникають і при забрудненні металокерамічного фільтру датчика, а також при порушенні цілісності реакційної камери. Перехідні процеси, які виникають при цьому в різних конструкціях термокаталітичних датчиків розглянуто в роботі [10]. В такому випадку аналіз зміни відносного значення амплітуди сплеску вихідної напруги вимірювального моста після паузи постійної тривалості не дає можливості однозначно виявити зміну чутливості датчика і тим більше автоматично здійснити корегування показань аналізатора.

Постановка задачі. Мета публікації – підвищення надійності контролю вибухонебезпечності рудникової атмосфери та зменшення витрат на обслуговування стаціонарних аналізаторів метану а рахунок застосування автоматичної діагностики та корегування чутливості первинних перетворювачів стаціонарних термокаталітичних аналізаторів метану.

Викладення матеріалу та результати. При невеликій концентрації метану і протіканні реакції окислення на робочому елементі термокаталітичного сенсора в дифузійній області потік метану до його поверхні лінійно залежить від концентрації метану в реакційній камері і ефективної дифузійної провідності елемента [5]

$$Q_m = g_e C_{mk}, \quad (1)$$

де $g_e = 10^{-2} K_{ef} b_m F_e$ – ефективна дифузійна провідність елемента, м³/с; C_{mk} – концентрація метану в реакційній камері; K_{ef} – коефіцієнт ефективності окислення метану; b_m – коефіцієнт масопередачі, м/с; F_e – площа поверхні елемента, м².

Вихідна напруга вимірювального моста за низьких концентрацій метану при цьому може бути визначена за виразом [9]

$$U_{вих} = \frac{R_{e0} I_e b_e Q_{mn} g_e C_{mk}}{2K}, \quad (2)$$

де R_{e0} , – опір елемента при нульовій температурі, Ом; I_e – величина струму, що протікає через елементи, А; β_e – температурний коефіцієнт опору елемента, 1/°С; K – теплова провідність елемента, Вт/°С; Q_{mn} – нижча теплота спалювання метану, Дж/м³.

В термокаталітичних датчиках метану, в тому числі тих, що використовуються в стаціонарній апаратурі контролю метану, термоелементи розміщують в реакційній камері, яка утворена всередині пористого керамічного або металокерамічного газообмінного фільтрелемента. В такому випадку потік метану до поверхні робочого елемента термокаталітичного сенсора визначається як [10]

$$Q_m = C_{ma} g_e g_f / (g_e + g_f) \quad (3)$$

де C_{ma} – концентрація метану в атмосфері; g_f – провідність фільтра, м³/с.

З виразів (2, 3) видно, що потік метану до каталітично активного елемента і, відповідно, вихідна напруга вимірювального моста при постійній концентрації метану залежить від провідності фільтрелемента і каталітичної активності робочого елемента. Зміна цих величин можлива при зміні режиму живлення вимірювального моста, під впливом шкідливих газів, в процесі старіння та накопичення продуктів термічної деструкції вуглеводнів на поверхні чутливих елементів, засмічення фільтрелемента тощо.

Для підвищення стабільності роботи аналізаторів метану було запропонована вдосконалена конструкція датчика з подвійним дифузійним фільтром [11]. Чутливі елементи у цьому датчику розміщуються в додатковій камері, виконаній у вигляді газонепроникного стакану з каліброваним отвором в стінці з дифузійною провідністю g_{ome} , який розташований всередині обсягу обмеженого від атмосфери фільтрелементом. В такому випадку потік метану до поверхні робочого елементу датчика визначається як [11]

$$Q_m = C_{ma} g_e g_{\phi} g_{ome} / (g_{\phi} g_e + g_e g_{ome} + g_{\phi} g_{ome}) \quad (4)$$

При виборі $g_{ome} \ll g_{\phi}$ і $g_{ome} \ll g_e$ потік метану, що окислюється на робочому елементі, практично визначається дифузійним опором отвору і на вихідну напругу вимірювального моста практично не впливає засмічення фільтрелемента та зміна чутливості робочого елементу термокаталітичного сенсора. Проте виконання такої умови супроводжується зниженням вихідної напруги моста та збільшенням постійної часу датчика. Тому на практиці вибирають g_{ome} в діапазоні від $2\gamma_{ome}$ до $6\gamma_{ome}$. Вихідна напруга вимірювального моста в цьому випадку знаходиться в межах 10-4 мВ/% об. і зберігається постійна часу датчика не більше 15 с [11].

Особливістю датчика з подвійним дифузійним фільтром є те, що вихідна напруга вимірювального моста в значному діапазоні значень струму через термоелементи практично не залежить від зміни його величини [11]. Для прикладу на рис. 1 наведені характеристики датчика з додатковим дифузійним фільтром отримані експериментально при концентрації метану в атмосфері $C_{ma}=1,02$ об.% [11].

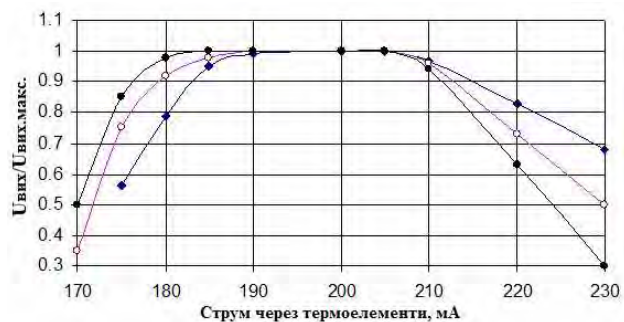
Рис. 1. Вихідні характеристики датчика з подвійним дифузійним фільтром ($C=1,02$ об.%):
 \bullet - $\gamma_e=2\gamma_{ome}$; \circ - $\gamma_e=4\gamma_{ome}$; \cdot - $\gamma_e=6\gamma_{ome}$ [11]

Такий характер залежності вихідної напруги вимірювального моста від величини струму через термоелементи пояснюється тим, що потік метану, що окислюється на робочому елементі, практично визначається дифузійним опором отвору. При цьому, зростання величини струму через елементи і, відповідно, ефективної дифузійної провідності робочого елемента обумовлюють зростання вихідної напруги вимірювального моста, але одночасно і до зниження концентрації метану у вимірювальній камері. Крім того, при високих температурах розігріву чутливого елемента процеси окислення метану відбуваються не лише на поверхні каталізатора, а це викликає додаткове розсіювання енергії реакції і зниження реального значення вихідної напруги вимірювального моста [12].

Режим живлення вимірювального моста при цьому вибирають такий, щоб за умови мінімального енергоспоживання робоча точка знаходилась на плато (горизонтальній частині) характеристики. В даному випадку при температурі газової суміші 20°C , для датчика з наведеними на рис. 1 характеристиками, це відповідає струму через термоелементи 190 мА і величині напруги на порівняльному термоелементі біля 750 мВ.

Виходячи з (4) за незмінної величини γ_{ome} і постійної концентрації метану зменшення ефективної дифузійної провідності робочого елемента з $6\gamma_{ome}$ до $2\gamma_{ome}$ призводить до зменшення потоку метану до поверхні робочого елемента і відповідно чутливості аналізатора до 20%.

Розглянемо можливість здійснення автоматичного контролю чутливості аналізатора шляхом зміни режиму живлення чутливих елементів. Допустимо, що при налагодженні аналізатора з використанням атестованої метаноповітряної суміші з концентрацією метану $C=1,02$ об.% режим живлення чутливих елементів вибраний так, щоб робоча точка знаходилась на початку плато характеристики (рис. 1), що відповідає величині струму через термоелементи 190 мА. Припустимо, що початкова ефективна дифузійна провідність робочого елемента становила $\gamma_e=6\gamma_{ome}$. Якщо зменшити величину струму через термоелементи до 180 мА то, виходячи з характеристики датчика (рис. 1) вихідна напруга вимірювального моста знизиться на 2%. При зменшенні ефективної дифузійної провідності робочого елемента в три рази (до $\gamma_e=2\gamma_{ome}$), наприклад



внаслідок отруєння каталізатора, аналогічна зміна режиму живлення чутливих елементів призведе до зниження вихідної напруги вимірювального моста на 22%. Таким чином при збереженні $\gamma_{e=}$ $\gamma_{отв}$ зміна режиму живлення вказаних межах практично не впливає на величину вихідної напруги вимірювального моста. З іншого боку зменшення ефективної дифузійної провідності робочого елемента призводить до суттєвого зниження вихідної напруги моста при зміні режиму живлення.

Такий характер зміни вихідної напруги вимірювального моста при зміні режиму живлення чутливих елементів дозволяє не тільки автоматично виявити зниження ефективної дифузійної провідності робочого елемента і, відповідно, зміни чутливості аналізатора, а і автоматично здійснювати корегування чутливості. При виборі режиму живлення чутливих елементів слід враховувати те, що на їх температурний режим впливає як величина струму так і температура газу. Температура елемента t_e в повітрі в загальному випадку можна оцінити за виразом [12]

$$t_e = bI_e^2 + t_2, \quad (5)$$

де b – терморезистивний коефіцієнт, Ом \times С/Вт; t_2 – температура газу, $^{\circ}$ С.

Терморезистивний коефіцієнт для робочого елемента є сталою величиною і для досліджуваних термоелементів пелістерного типу становить біля $9 \cdot 10^3$ Ом \times С/Вт. Виходячи з цього, для забезпечення сталого температурного режиму термоелементів при зміні температури газу, величина струму через елементи повинна коригуватися як

$$I_e = \sqrt{I_{ен}^2 - \frac{1}{b}(t_2 - t_{2н})}, \quad (6)$$

де $I_{ен}, t_{2н}$ – відповідно значення величини струму і температура газу при налаштуванні аналізатора.

Спираючись на проведені дослідження нами було вдосконалено алгоритм і програму роботи аналізатора з функцією автоматичної діагностики нульових показань, реалізованого на базі мікропроцесора АТМЕГА8 [12], що полягає в доповненні програми його роботи модулем, який забезпечує автоматичну діагностику чутливості термокatalітичного датчика та корегування показань аналізатора при її зміні.

Сутність процесу діагностики чутливості термокatalітичного датчика та корегування показань аналізатора при її зміні полягає в наступному. В режимі налагодження, коли до виносного датчика аналізатора подається атестована газова суміш з вмістом метану 1,0%, шляхом зміни струму через чутливі елементи (для дослідженого типу датчиків в діапазоні від 180 до 200 мА) визначається величина струму яка відповідає моменту виходу вихідної напруги моста на плато характеристики (рис. 1), визначається та запам'ятовується відносна величина зменшення вихідної напруги вимірювального моста аналізатора $DU_{ен}$ при зменшенні струму через елементи на 5% відносно величини струму, що відповідає моменту виходу вихідної напруги моста на плато характеристики

$$DU_{ен} = \frac{U_{1н} - U_{2н}}{U_{1н}}, \quad (7)$$

де $U_{1н}$ та $U_{2н}$ – відповідно значення вихідної напруги вимірювального моста в режимі налаштування при роботі на плато характеристики та зменшенні струму через елементи на 5%.

Фіксація моменту виходу вихідної напруги моста на плато характеристики здійснюється тоді, коли збільшення струму на 1 мА не призводить до зростання вихідної напруги моста більше ніж на 1%. Значення встановленої величини струму $I_{ен}$ і $t_{2н}$ температура газу при налаштуванні аналізатора заноситься в пам'ять аналізатора і використовується в подальшому для налаштування робочого режиму аналізатора.

В робочому режимі безперервно виконуються підтримка сталого температурного режиму термоелементів при зміні температури газу відповідно (6), здійснюються операції вимірювання напруг на елементах, визначення різниці напруг на елементах, розрахунок та передача інформації про вміст метану. За зовнішнім запитом оператора чи періодично, згідно визначеного програмою роботи аналізатора часу, здійснюється перевірка чутливості датчика та корегування показань аналізатора при її зміні. Для цього величина струму через чутливі елементи зменшу-

ється на 5% відносно встановленого робочого режиму та визначається відносна величина зменшення вихідної напруги вимірювального моста аналізатора при цьому

$$DU_{ep} = \frac{U_{1p} - U_{2p}}{U_{1p}}, \quad (8)$$

де U_{1p} та U_{2p} – відповідно значення вихідної напруги вимірювального моста в робочому режимі при роботі на плато характеристики та зменшенні струму через елементи на 5%.

Визначається відносна величина зменшення вихідної напруги DU_{ep} і порівнюється з DU_{en} . Якщо $DU_{ep} = DU_{en}$, то у датчика зберігається початкова величина чутливості і корегування її не потрібне. При зниженні DU_{ep} відносно DU_{en} до 10% здійснюється коригування чутливості аналізатора, шляхом її збільшення на величину $DU_{en} - DU_{ep}$. В іншому випадку надсилається повідомлення оператору про необхідність здійснення перевірки та налагодження аналізатора.

Слід відмітити те, що при зміні режиму живлення чутливих елементів датчика виникають перехідні теплові і газодинамічні процеси, тому зняття показань повинне здійснюватися після закінчення перехідного процесу, що становить для досліджуваних первинних перетворювачів біля 5с з моменту зниження струму через термоелементи. В шахтних умовах можлива ситуація, що за цей час змінилась концентрація метану, тому визначення відносної величини зменшення вихідної напруги DU_{ep} необхідно проводити декілька раз, а потім шляхом обробки даних вибирати ті, що неодноразово повторюються і вираховувати випадкові результати.

Висновок та напрямок подальших досліджень. Виконані дослідження дозволили обґрунтувати метод автоматичної діагностики стану стаціонарних термокаталітичних аналізаторів метану в частині автоматичного дистанційного контролю чутливості первинних перетворювачів шляхом аналізу їх вихідних характеристики при зміні струму через чутливі елементи на дільниці виходу вихідної напруги моста на плато характеристики. Показано, що при використанні сучасних мікропроцесорних засобів обробки інформації є можливість не тільки автоматично перевіряти стабільність чутливості первинних перетворювачів, а і здійснити корегування показань газоаналізатора при зміні чутливості. Для реалізації результатів досліджень розроблено алгоритм і програму роботи аналізатора з функцією автоматичного дистанційного контролю чутливості термокаталітичних датчиків метану.

Подальші дослідження з питань автоматичної діагностики стану стаціонарних термокаталітичних аналізаторів метану передбачено в напрямку теоретичного обґрунтування можливості автоматичного дистанційного виявлення випадків забруднення металокерамічного фільтру датчика внаслідок потрапляння води чи накопичення пилу, виявлення випадків порушення цілісності реакційної камери та розробки необхідного для цього програмного забезпечення. Результати виконаних досліджень будуть впроваджені на НВО «Червоний металіст» (М. Конотоп) при розробці та освоєнні виробництва стаціонарних аналізаторів метану нового технічного рівня.

Список літератури

1. Интеллектуальная система автоматической диагностики главных циркуляционных насосов ядерных энергоблоков / **И.Г. Шараевский, С.В. Широков, Е.И. Шараевская, Н.П. Дмитренко** // Промышленная теплотехника. — 2007. — Т. 29, № 7. — С. 49-53.
2. **Купін А.І.** Інформаційні моделі автоматичної діагностики побутової техніки у системах типу "Інтелектуальний дім" / **А.І. Купін, Д.І. Кузнецов** // Вісник Криворізького національного університету. - 2016. - Вип. 41. - С. 116-120.
3. **Ефіменко Л.І.** Принципи побудови автоматизованої системи діагностики технічного стану конвеєра / **Л.І. Ефіменко, М.П. Тиханський** // Вісник КТУ. - 2010. - Вип. 25. - С. 163-167.
4. **Тиханський М.П.** Прогнозування працездатності конвеєрної установки / **М.П. Тиханський, Л.І. Ефіменко, А.М. Тиханська** // Гірничий вісник. - 2019. - Вип. 105. - С. 160-163.
5. НПАОП 10.0-1.01-10 Правила безпеки у вугільних шахтах. – К.: Друкарня ДП «Редакція журналу «Охорона праці» 2010. – 430 с.
6. **Колосюк А.В.** Вибухонебезпека систем електропостачання гірничих машин на шахтах, небезпечних за раптовими викидами вугілля і газу. Монографія // **А.В. Колосюк, В.П. Колосюк.** – Кременчук: КрНУ імені Михайла Остроградського, 2017. – 178 с.

7. **Биренберг И.Э.** Стационарная система автоматического непрерывного контроля метана с диагностикой термодатчика. / **И.Э. Биренберг, Е.Ш. Ланда, Г.С. Тросман** // Системы автоматизации и связи в угольной промышленности. - М: 1986. – С. 38 – 46.

8. **Алексеев М.О.** Автоматична діагностика стану стаціонарних термокаталітичних газоаналізаторів / **М.О. Алексеев, О.В. Голинько** // Збірник наукових праць НГУ. – Д.: ДВНЗ «НГУ», 2018 – № 53 – С. 223-229

9. **Голинько В.И.** Разработка метода контроля чувствительности термокаталитических датчиков метана / **В.И. Голинько, А.К. Котляров** // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2004. Вип. 73. – С. 54-60.

10. **Голинько В.И., Котляров А.К.** Контроль взрывоопасности среды в горных выработках и оборудовании угольных шахт. Монография / **В.И. Голинько, А.К. Котляров** – Днепропетровск: изд-во «Лира», 2010. – 368 с.

11. **Голинько В.И.** Совершенствование термокаталитических средств контроля содержания метана / **В.И. Голинько, В.В. Белоножко** // Гірничя електромеханіка та автоматика: Наук. техн. зб. – 2003. – Вип. 70. – С. 92 – 100.

12. **Голинько В.И.** Исследование процесса окисления метана в термокаталитических датчиках / **В.И. Голинько, В.В. Белоножко** // Науковий вісник НГУ. - Дніпропетровськ, 2003 - №7, с. 62-65.

Рукопис подано до редакції 12.05.2020

УДК 622.271.4:622.271.32-027.235

С.А. ЛУЦЕНКО, канд. техн. наук, доц., С.А. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф.,

Ю.И. ГРИГОРЬЕВ, канд. техн. наук

Криворожский национальный университет

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЪЕМОВ ВСКРЫШНЫХ РАБОТ ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ В КАРЬЕРЕ НОРМАЛЬНЫЕ УСЛОВИЯ ДЛЯ ДОБЫЧИ ПОЛЕЗНОГО ИСКОПАЕМОГО

Цель. Усовершенствовать научно-методическую базу в области проектирования и планирования открытых горных работ путем разработки методов определения объемов вскрышных работ, обеспечивающих в карьере нормальные условия добычи полезного ископаемого при изменении его производительности, которые должны учитывать взаимосвязь параметров системы разработки, исходя из условия обеспечения нормативного объема готовых к выемке запасов.

Методы. При определении отставания вскрышных работ необходимо учитывать взаимосвязь ширины рабочей площадки и длины активного фронта горных работ, которые обеспечивают в карьере необходимый объем готовых к выемке запасов. Выведены формулы для определения текущих коэффициентов вскрыши при расширении рабочих площадок, а также объемов задолженности по вскрыше.

Научная новизна. При снижении производительности карьера по руде уменьшение коэффициента вскрыши достигается за счет уменьшения ширины рабочих площадок вследствие чего верхние горизонты (вскрышные) имеют меньшую скорость горизонтального подвигания, чем нижние горизонты (рудные). Несоответствие фактической длины активного фронта горных работ длине фронта принятой при определении максимально возможной производительности карьера по руде и составлении перспективного календарного плана горных работ без учета взаимосвязи ширины рабочей площадки и длины активного фронта горных работ, обеспечивающих норматив готовых к выемке запасов приводит к нарушению равенства скоростей перемещения рудных и нерудных уступов.

Практическая значимость. Усовершенствована методика определения объемов вскрышных работ, обеспечивающих в карьере нормальные условия добычи полезного ископаемого при изменении его производительности. Применение методики возможно, как в случае вовлечения в разработку одного, так и нескольких участков рабочей зоны карьера.

Результаты. Выведены формулы для определения текущих коэффициентов вскрыши, а также объемов задолженности по вскрыше при снижении производительности карьера по руде.

Ключевые слова: железорудные карьеры, вскрышные работы, коэффициент вскрыши, рабочая площадка уступа, опережение вскрышных работ, ширина рабочей площадки.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-22-26

Проблема и ее связь с научными и практическими заданиями. В современных условиях разработки месторождений, вопросы, связанные с выбором направления развития и установления рационального режима горных работ, занимают одно из ведущих мест в горном деле. В процессе эксплуатации большинства месторождений Кривбасса, особенно за последнее десятилетие, невыполнялись объемы вскрышных работ, что привело к накоплению значительных объемов задолженности по вскрыше. Такая тенденция привела к тому, что составление произ-

водственных программ предприятий, а в последующем и их выполнение, становится все более проблематичным, что подтверждается практикой производства.

Развитие карьера в этих условиях осложняется наличием в рабочей зоне целых участков временно нерабочих уступов, характеризуемых зауженными площадками до размеров транспортных и предохранительных берм. При этом, объем готовых к выемке запасов горной массы не отвечает нормативным требованиям, а производство горных работ характеризуется значительным их рассредоточением по карьерному пространству.

Повышение эффективности разработки действующих карьеров и вовлечение в разработку открытым способом новых месторождений требуют тщательного предварительного анализа и ответственной проектной работы с применением современных научных методов и средств. Это объясняется тем, что реконструкция действующих карьеров или освоение новых месторождений требуют больших капитальных затрат с длительным сроком их окупаемости и любое необоснованное решение или ошибка в проекте может привести к снижению эффективности капиталовложений, усложнению и удорожанию эксплуатации месторождения.

Однако практика работы железорудных карьеров Украины показывает, что проблема отставания вскрышных работ полностью не решена и может обостряться, особенно в периоды изменения производительности карьеров по руде.

В этих условиях большое значение приобретают научные исследования, связанные с установлением оптимальных параметров системы разработки, определением размеров отставания вскрышных работ и его расположения в карьерном пространстве.

Поэтому поиск новых конструктивных технологических решений регулирования режима вскрышных работ, методов определения задолженности карьеров по вскрышным работам и путей ликвидации данной задолженности имеет важное значение.

При работе ГОКов в рыночных условиях происходит постоянное изменение потребности в различных видах полезных ископаемых и их цен, что приводит к изменению плановых показателей по добыче того или иного вида минерального сырья. В периоды кризисных явлений при падении спроса на минеральное сырье на карьерах снижают производительность. Коэффициенты вскрыши в эти периоды принимаются постоянными на уровне запланированных в проектах, а иногда и необоснованно уменьшаются. При этом одной из важнейших задач при разработке месторождений открытым способом, является поддержание работоспособности карьеров в условиях, как сокращение объемов добычи полезных ископаемых, так и их увеличения.

Анализ исследований и публикаций. Большинство исследований направленных на установление объемов отставания вскрышных работ [1-6] не учитывают взаимосвязь режима горных работ и производительности карьера по руде [7] исходя из условия обеспечения в карьере норматива готовых к выемке запасов руды. Анализ научных публикаций показал, что в процессе определения ширины рабочей площадки при заданной производительности карьера по руде учитывается только длина активного фронта по руде и вскрышным породам на момент оценки. При этом не учитывается влияние на нее изменение ширины рабочей площадки [8, 9].

Для определения отставания вскрышных работ разработаны методики [10, 11] определения объемов вскрышных работ, обеспечивающих в карьере нормальные условия для добычи полезного ископаемого. При этом данные методики не учитывают возможность уменьшения производительности карьера по руде в периоды снижения спроса на продукцию горно-обогатительных комбинатов.

Это свидетельствует об актуальности разработки новых и корректировки существующих методик определения объемов вскрышных работ, обеспечивающих в карьере нормальные условия для добычи полезного ископаемого, особенно в условиях рыночных отношений, что требует надежных оптимальных проектных решений.

Постановка задач. Целью работы является усовершенствование методики определения объемов вскрышных работ, обеспечивающих в карьере нормальные условия добычи полезного ископаемого при снижении его производительности.

Изложение основного материала и результаты. Исследованиями установлено, что снижение производительности карьера по руде обеспечивается, как за счет уменьшения количества участков вовлекаемых в разработку, а также размеров данных участков [12], так и за счет увеличения угла откоса рабочего борта карьера [7] на одном участке рабочей зоны, что приводит к снижению коэффициентов вскрыши.

Методику определения объемов вскрышных работ при снижении производительности карьера по руде рассмотрим на примере условного карьера (рис. 1).

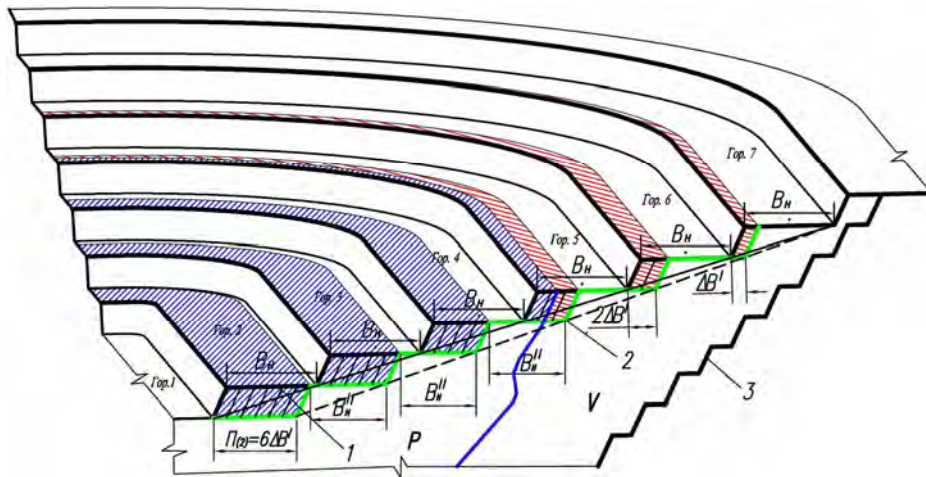


Рис. 1. Схема для определения объемов вскрышных работ при снижении производительности карьера по руде: 1 и 2 – положение рабочего борта карьера при работе с производительностью по руде A_p и A''_p ; 3 – проектный контур карьера; B_H – нормальная ширина рабочей площадки при производительности карьера по руде A_p ; B''_H – нормальная ширина рабочей площадки при работе карьера с производительностью по руде A''_p

При снижении годовой производительности карьера по руде с величины A_p до A''_p нормальная ширина рабочей площадки на каждом горизонте изменится с B_H до B''_H , т.е. уменьшится на DB'_H , м

$$DB'_H = B''_H - B_H. \quad (1)$$

Как видно с рис. 1, при снижении производительности карьера по руде до A''_p можно уменьшить ширину рабочей площадки на *гор. 6* на величину DB'_H ; на нижележащем горизонте (*гор. 5*) – на величину $2DB'_H$ и так далее до самого нижнего рабочего уступа. В этом случае все рабочие площадки в карьере уменьшаются до нормативных размеров.

Текущий коэффициент вскрыши определяется по формуле, $\text{м}^3/\text{м}^3$,

$$n_t = \frac{A_v}{A_p} = \frac{L_v \times h_y \times l_p}{L_p \times h_y \times A_p}, \quad (2)$$

где l_v и l_p – скорость горизонтального подвигания вскрышных и рудных уступов, м/год.

При принятых ширине рабочей площадки, высоте уступов, производительности по руде и пустым породам, угол откоса рабочего борта карьера будет постоянным, а текущий коэффициент вскрыши определится соотношением активных фронтов работ по пустым породам (L_v) и руде (L_p), $\text{м}^3/\text{м}^3$

$$n_t = \frac{L_v}{L_p}. \quad (3)$$

Необходимое подвигание i -го горизонта обеспечивающее уменьшение рабочих площадок до величины B''_H определяется по формуле, м

$$\Pi_{(i)} = (I - i) \times DB'_H. \quad (4)$$

Текущий коэффициент вскрыши с учетом объемов добычи руды и выемки вскрышных, которые извлекаются при уменьшении ширины рабочих площадок станет равным, $\text{м}^3/\text{м}^3$

$$n_t = \frac{\sum_{i=2}^I (\Pi_{(i)} \times L_{v(i)} \times h_{y(i)}) + \sum_{i=2}^I (\Pi_{pv(i)} \times L_{p(i)} \times h_{y(i)}) + L''_{v(i)} \times h_{y(i)} \times \Pi'_{l(i)}}{A''_p}. \quad (5)$$

Объем опережения вскрышных работ составит, м^3

$$Q_{\text{вн}} = DA_{pB} \frac{L''_v}{L''_p} - DA_{vB} \cdot \quad (6)$$

Исходные данные и результаты расчетов по определению объемов вскрышных работ при снижении производительности карьера по руде представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные показатели и результаты расчетов для условного примера

Показатели	Варианты					
	Базовый (1)	2	3	4	5	6
Производительность карьера по руде, м ³ /год	3000000	2750000	2500000	2250000	2000000	1750000
Снижение производительности по руде, м ³ /год	0	250000	500000	750000	1000000	1250000
Производительность карьера по вскрыше, м ³ /год	9000000	7749000	6524000	5267000	4032000	2782000
Длина рудного фронта, м	1600	1670	1760	1870	1990	2120
Длина вскрышного фронта, м	3400	3300	3190	3080	2960	2810
Минимальная ширина рабочей площадки В _н , м	35	35	35	35	35	35
Нормативная ширина рабочей площадки, м	50	48	46	45	43	42
Текущий коэффициент вскрыши с учетом опережения вскрышных работ, м ³ /м ³	2,1	1,8	1,33	0,98	0,53	0,2

На рис. 2 и 3 показано изменение текущих коэффициентов вскрыши и объемов выемки вскрышных пород в зависимости от изменения производительности карьера. Точка A_6 характеризует достигнутый уровень производительности карьера по руде (базовый вариант). Заштрихованные области на графике показывают опережение объемов выемки вскрышных пород (4) при уменьшении производительности карьера по руде. Линия 3 характеризует работу карьера с постоянным коэффициентом вскрыши.

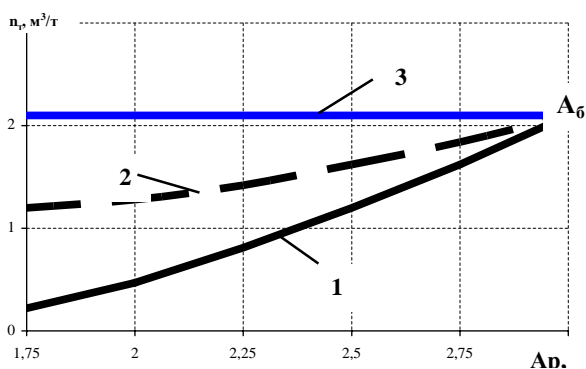


Рис. 2. Зависимость текущих коэффициентов вскрыши от изменения производительности карьера по руде:

1 - с учетом объемов горной массы, извлекаемых при реконструкции борта карьера; 2 - без учета объемов горной массы, извлекаемых при реконструкции борта карьера; 3 - постоянный коэффициент вскрыши

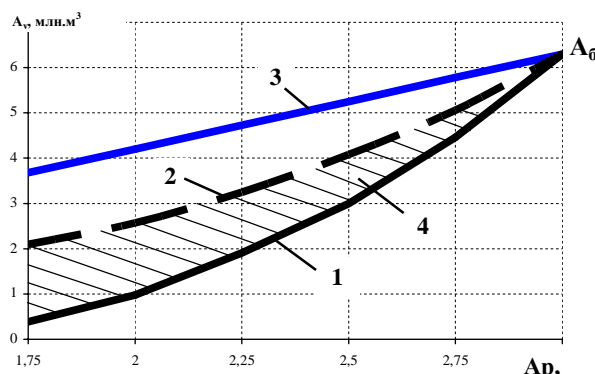


Рис. 3. Зависимость объемов вскрышных пород от изменения производительности карьера по руде:

1 - с учетом объемов горной массы извлекаемых при реконструкции борта карьера; 2 - без учета объемов горной массы извлекаемых при реконструкции борта карьера; 3 - при постоянном коэффициенте вскрыши; 4 - опережение вскрышных работ

Выводы и направление дальнейших исследований. Расчеты показали, что при снижении производительности карьера по руде снижается коэффициент вскрыши. Это объясняется тем, что за счет уменьшения ширины рабочей площадки верхние горизонты (вскрышные) имеют меньшую скорость горизонтального подвигания, чем нижние горизонты (рудные) и как следствие этого некоторый объем руды извлекается из карьера с меньшим коэффициентом вскрыши. В результате выполненных исследований была усовершенствована методика определения объемов вскрышных работ, обеспечивающих в карьере нормальные условия добычи полезного

ископаемого при изменении его производительности. Применение методики возможно, как в случае вовлечении в разработку одного, так и нескольких участков рабочей зоны карьера.

Список литературы

1. Арсентьев А.И. Проектирование горных работ при открытой разработке месторождений / А.И.Арсентьев, Г.А.Холодняков. – М.: Недра, 1994. – 336 с.
2. Ковальчук В.А. Исследование взаимосвязи отставания вскрышных работ и производительности карьера / В.А.Ковальчук // Разработка рудных месторождений.- Кривой Рог, 1999.- Вып. 67. – С. 3-7.
3. Новожилов М.Г. Технология открытой разработки месторождений полезных ископаемых. Ч.2 / М.Г.Новожилов, В.С.Хохряков, Г.Д.Пчелкин, В.С.Эскин. – Изд-во Недра, 1971. – 552с.
4. Ржевский В.В. Научные основы проектирования карьеров / В.В.Ржевский, М.Г.Новожилов, Б.П.Юматов. – М.: Недра, 1971. – 600 с.
5. Черепанов Е.В. Обоснование технологии горных работ на рудных карьерах, имеющих отставание по вскрыше / Е.В.Черепанов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева. – 2006. – №5. – С. 267–270.
6. Близиюков В.Г. Один из путей сохранения нормальной ширины рабочей площадки при уменьшении объемов вскрышных работ в карьере / В.Г.Близиюков, С.Ю.Оводенко // Разработка рудных месторождений.– Изд-во: «Техника», 1988.– №45. – С. 11–14.
7. Луценко С. А. Исследование режима горных работ, обеспечивающего достижение максимально возможной производительности карьера по руде / С.А. Луценко // Вісник НТУУ "КПІ". – Київ. – 2017. - Вип. 34. – С34-40.
8. Луценко С.А. Разработка метода определения максимальной, по горным возможностям, производительности карьера по руде / С.А. Луценко // Геотехническая механика. – Днепропетровск, 2017. - №130. С. 168-175.
9. Луценко С. А. Исследование взаимосвязи параметров системы разработки / С.А. Луценко // Вісник ЖДТУ. – Житомир, 2018. - №1 (81). – С. 269-273.
10. Близиюков В.Г. Планирование режима вскрышных работ с учетом производительности карьера по полезному ископаемому / В.Г.Близиюков, А.В.Савицкий, О.Ю.Близиюкова // Горный журнал, 2013. - №5. – С. 4-8.
11. Вилкул Ю.Г. О проблеме отставания вскрышных работ в железорудных карьерах / Ю.Г.Вилкул, С.А.Луценко, О.Ю.Близиюкова // Металлургическая и горнорудная промышленность. – Днепропетровск, 2013. - №3. - С. 92-96.
12. Луценко С.А. Исследование взаимосвязи параметров системы разработки при концентрации горных работ / С.А. Луценко // Вісник Національного університету водного господарства та природокористування: зб. наук. праць. – Вип. 4 (80). – 2017. – С. 194-203.

Рукопись поступила в редакцию 14.02.2020

УДК 624.042.41

С.І. САХНО, Є.В. ЛЮЛЬЧЕНКО, Л.О. ЯНОВА, О.В. ПИЩИКОВА,
кандидати техн. наук, доценти, Криворізький національний університет

АНАЛІЗ ВІТРОВИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА ЕЛЕМЕНТИ МАЛОПОВЕРХОВИХ БУДІВЕЛЬ ІЗ ДВОСХИЛИМ ДАХОМ МЕТОДОМ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ГІДРОГАЗОДИНАМІКИ

Мета. Знаходження вразливих для сильних вітрів місць в конструкції будинків з двоххилим дахом, що не враховуються стандартною методикою обліку вітрових навантажень.

Методи досліджень. Для дослідження розроблена математична твердотільна модель будинку з двоххилим дахом. Розрахунок навантажень, згідно ДБН проводився в програмному комплексі SCAD ++, моделювання розподілу вітрових навантажень твердотільної моделі виконувалося в програмному комплексі SolidWorks корпорації Dassault Systemes. Дослідження проводилися з урахуванням статичних вітрових навантажень при швидкості вітру 25 м/с. Розглядалися впливи з фронтального, бокового та діагонального вітру.

Наукова новизна. В результаті досліджень отримав подальший розвиток метод кінцевих елементів для підвищення надійності елементів будівель, що зазнають вітрові впливи які відрізняються від стандартних. Виявлено значні вітрові впливи в районі піддашкового звису спроможні спричинити руйнування даху. Виявлено, що розподілення вітрових навантажень знайдених методом обчислювальної гідрогазодинаміки не співпадає з розподіленням вітрових навантажень відповідно до ДБН В.1.2-2: 2006.

Практичне значення. Запропонована методика дозволяє, приймаючи за базу стандартні вітрові навантаження, забезпечити більш надійну, довговічну і безпечну роботу елементів даху будівлі, які зазнають вітрових впливів, що відрізняються від стандартних.

Результати. Виявлені розподілення вітрових навантажень на стіни і дах при різних напрямках вітру. Показано, що навантаження не має рівномірно розподілений характер, а концентрується в особливих точках конструкції будівлі. Особливі вітрові впливи спостерігаються в зонах козирків даху та карнизних звисів. В цих зонах на площину даху одночасно діє позитивний тиск знизу і негативний тиск зверху. Різниця в тисках створює великі відривні зусилля

спроможні відірвати дах від будівлі. Запропонована методика дозволяє швидко виявляти нестандартні, стосовно до вітрового навантаження, вузли і з урахуванням виявлених додаткових вітрових впливів знаходити методи їх підсилення.

Ключові слова: вітер, вітрове навантаження, малоповерхове житлове будівництво, конструювання.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-26-32

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Дослідження клімату України [1] свідчать про те, що протягом останніх десятиліть температура і деякі інші метеорологічні параметри відрізняються від значень кліматичних норм (усереднені значення за період 1961-1990 рр.).

Стихійні метеорологічні явища (СМЯ) є найнебезпечнішим проявом нестабільності клімату. Протягом останнього десятиріччя в усьому світі (включаючи Україну) їх кількість зростає. У багатьох випадках вони характеризуються значною інтенсивністю, завдають істотної шкоди економіці і призводять до людських жертв [2]. За висновком Четвертої доповіді з оцінки змін клімату [3], Україна не входить до числа найбільш уразливих до глобального потепління регіонів планети, але як свідчать результати досліджень, прояв кліматичних змін в Україні вже спостерігається, і буде тривати в найближчі десятиліття.

Найпоширеніші СМЯ в Україні - дуже сильний дощ, який може стати причиною надзвичайних ситуацій: катастрофічних злив, селів, повеней, затоплень значних територій сільськогосподарських угідь, житлових і виробничих приміщень і навіть призвести до змін ландшафту.

Друге місце серед СМЯ займає сильний вітер (19%) і явища, пов'язані з ним (шквал, смерч, пилова буря). За період 1986 - 2019 рр. було зафіксовано 498 випадків сильного вітру. Якщо врахувати всю вітрову діяльність в комплексі (шквал, смерч, пилова буря, сильна хуртовина), то за цей період зафіксовано 830 випадків, пов'язаних з сильним вітром (27% від загальної кількості стихійних явищ) [4].

Як видно, вчені – метеорологи вказують на суттєві зміни клімату на території України, що ведуть, в тому числі і до змін вітрових впливів. У той же час, при розрахунку будинків і споруд використовуються нормативні документи, засновані на багаторічних спостереженнях, проведених до початку прояву нестабільності клімату. Таким чином поступово збільшується розрив між фактичними значеннями вітрових навантажень і вітровими навантаженнями, закладеними в норми проектування, зокрема ДБН В.1.2-2: 2006 зі зміною №1.

Розробка та затвердження нормативних документів, процес кропіткий і нешвидкий. Тому в поточних умовах коригування нормативних значень вітрових навантажень завжди буде відставати від фактичних. Фактичне збільшення вітрових навантажень, може зробити істотний вплив на надійність існуючих і проєктованих будівель і споруд.

Вітрові навантаження - один з основних видів навантажень і впливів на будівлі і споруди, правильний облік яких визначає надійність і безпеку несучої системи будівлі. У зв'язку з цим, актуальним є вивчення розподілу вітрових тисків на окремі зони і конструктивні елементи будівель і споруд. При цьому з'являється можливість, проводячи розрахунки вітрових навантажень за чинними нормативними документами, розробляти додаткові конструктивні заходи щодо додаткового посилення або зміни елементів, які знаходяться в зоні найбільших впливів.

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідження вітрових впливів на будівлі і споруди проводилися як в Україні, так і за кордоном. Як правило, досліджувалися висотні будівлі і споруди [5-8]. Частина досліджень присвячена дослідженням вітровим впливів на одноповерхові промислові будівлі [9-11]. Дослідженням вітрових впливів на елементи малоповерхових будівель увага практично не приділяється.

Постановка завдання. Смерчі, що пройшли в Україні в 2014 - 2019 рр., показали високу вразливість від екстремальних вітрових впливів саме малоповерхових будівель. У зв'язку з цим в даній роботі поставлено завдання аналізу розподілу полів вітрового тиску в конструкції двоповерхової будівлі з двосхилим дахом. Дослідження повинні виявити найбільш небезпечні зони в конструкції. На даному етапі розглядаються тільки статичні впливи на конструкцію.

Викладення матеріалу і результати. Об'єкт досліджень - двоповерховий житловий будинок, розміром в плані 10 × 10 м і висотою поверху 2,7 м. Будинок покритий двосхилим дахом з кутлом нахилу 35° (рис. 1).

Розрахунок нормативних вітрових навантажень проводився в програмному комплексі SCAD ++. Моделювання розподілу вітрових навантажень на твердотільну модель виконувалося в програмному комплексі SolidWorks корпорації Dassault Systemes.

Математичне моделювання вітрових навантажень і впливів (CFD-моделювання, від англ. Computer Fluid Dynamics, CFD - обчислювальна гідрогазодинаміка) засновано на відтворенні процесу формування вітрових навантажень при русі вітрового потоку. У дослідженнях вивчалася відносний вітровий тиск на будівлю при температурі 293.20 К і статичному тиску 101325.00 Па. Для досліджень розроблена математична модель, що складається з будинку і навколишнього середовища (рис. 2). Розміри розрахункової області наведено в табл. 1.

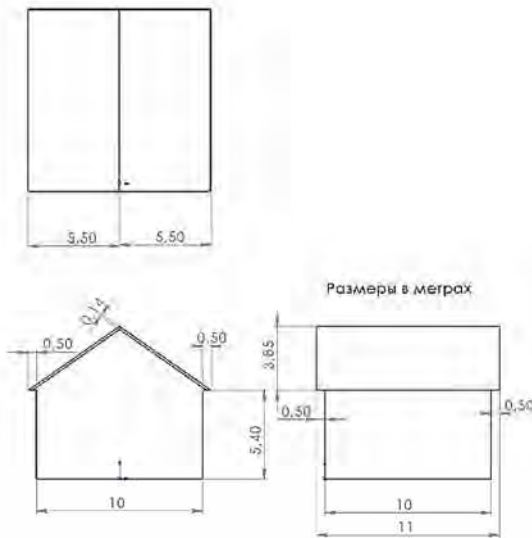


Рис. 1. Геометричні параметри математичної моделі будинку

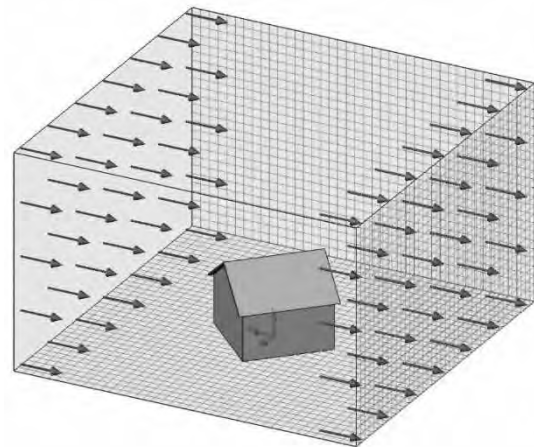


Рис. 2. Розрахункова область для досліджень полів тиску при діагональному вітрі

Розрахунок проводився з урахуванням гравітаційних ефектів і враховував ламінарний і турбулентний плин повітря. В якості граничних умов для вхідних і вихідних площин розрахункової області прийняті: напрямок векторів течії - по нормалі до поверхні; масова витрата: 30102.5000 kg/s (відповідає швидкості вітру 25 м/с).

Таблиця 1

Розміри розрахункової області

X min	-20.040 m
X max	20.040 m
Y min	-0.024 m
Y max	25.024 m
Z min	-20.040 m
Z max	20.040 m

Для бічних і верхньої площини в якості граничного умови прийнято тиск навколишнього середовища: 101325.00 Па і температура: 293.20 К. Тип примежового шару: ламінарний.

В результаті розрахунку отримано наступні мінімальні і максимальні значення розрахункових параметрів (табл. 2).

Візуалізації окремих результатів досліджень показані на рис. 3-6.

На рисунках добре видно, що вітрове навантаження розподілено нерівномірно як по поверхні стін будівлі, так і по його даху.

Фронтальний і бічний вітер. Стіни. При фронтальному вітру максимальні тиски спостерігаються в нижній частині будівлі (525 Па) і в області фронтона, безпосередньо у звисів даху (420 Па).

Мінімальні значення тиску на стінах при даному виді навантаження спостерігаються у верхній частині підвітряного фасаду (- 296 Па). Схожі значення вітрових тисків на стіни спостерігаються і при бічному вітрові.

Діагональний вітер. Стіни. При діагональному вітрові максимальний тиск на стіни справляється на нижню частину навітряного кута і досягає 643 Па. У зоні примикання до дальнього козирка і безпосередньо в нижній частині козирка тиск досягає 497 Па. Мінімальні значення тисків на стіни при діагональному вітрові спостерігаються на повітряному фасаді в районі схилу даху (- 288 Па.) і у верхній частині підвітряної бічної стінки (- 293 Па).

Таблиця Min/Max значень параметрів

Параметр	Фронтальний і бічний вітер		Діагональний вітер	
	min	max	min	max
Тиск [Pa]	100137.45	101799.32	99775.36	101916.13
Щільність (плинне середовище) [kg/m ³]	1.19	1.21	1.19	1.21
Швидкість [m/s]	0	39.510	0	45.299
Швидкість (X) [m/s]	-36.684	16.013	-26.746	39.061
Швидкість (Y) [m/s]	-15.352	25.383	-25.053	33.583
Швидкість (Z) [m/s]	-37.125	36.949	-37.944	25.947
Температура [K]	292.70	293.51	292.25	293.51
Температура (плинне середовище) [K]	292.70	293.51	292.25	293.51
Завихрення [1/s]	0.03	1465.37	5.71e-003	745.98
Швидкість в обертовій системі координат [m/s]	0	39.510	0	45.299
Швидкість в обертовій системі координат (X) [m/s]	-36.684	16.013	-26.746	39.061
Швидкість в обертовій системі координат (Y) [m/s]	-15.352	25.383	-25.053	33.583
Швидкість в обертовій системі координат (Z) [m/s]	-37.125	36.949	-37.944	25.947
Число Маха	0	0.12	0	0.13
Дотичне напруження [Pa]	0	7.87	0	10.91
Відносний тиск [Pa]	-1187.55	474.32	-1383.53	757.24
Акустична потужність [dB]	0	178.02	0	224.51

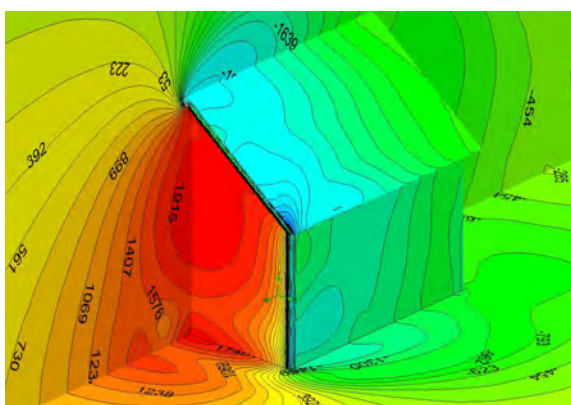


Рис. 3. Фронтальний вітер, навітряний бік

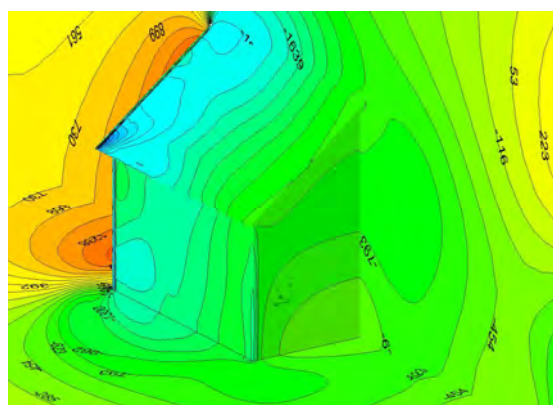


Рис. 4. Фронтальний вітер, підвітряний бік

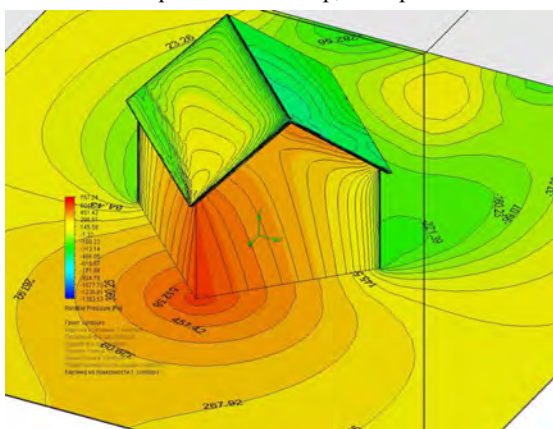


Рис. 5. Діагональний вітер, навітряний бік

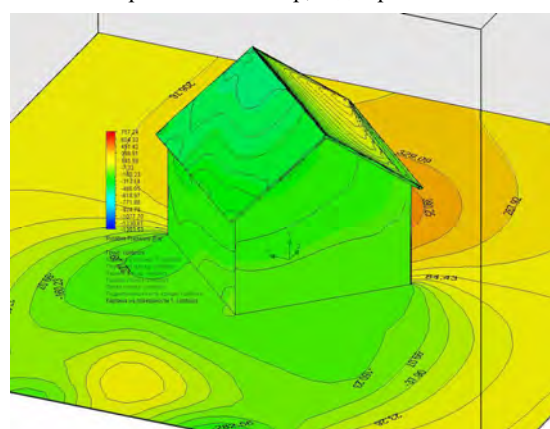


Рис. 6. Діагональний вітер, підвітряний бік

Діагональний вітер. Дах і звиси. Розподіл вітрового тиску по даху значно залежить від напрямку вітру. При діагональному вітрові тиск на навітряну частину даху швидко змінюється від позитивного в ближньому навітряному вугіллі (198 Па) до негативного у задній частині коника (- 350 Па). На більшій площі навітряної частини даху переважають негативні тиски

(розрідження). Підвітряна частина даху піддається впливу тільки негативних тисків, які змінюються від – 506 Па в районі коника до – 281 Па в районі заднього карнизного звису.

Крім розподілу тисків на верхній частині даху, важливе значення має розподіл тиску на нижній частині козирка.

При діагональному вітровому навантаженні на навітряному фасадному боці тиск змінюється від 550 Па на ближньому куті, до 428 Па в районі коника і до негативних значень – 1011 Па в зоні підвищеної турбулентності - задньому навітряному куті. На навітряному боці тиск поступово змінюється від 578 Па на ближньому куті до 40 Па на дальньому куті. На підвітряних боках тиск на нижній частині схилу знаходиться в межах - 280...- 200 Па для фасадної частини і - 700...- 280 Па для бічної частини.

Фронтальний і бічний вітер. Дах і звиси. При фронтальному вітрові на поверхні даху спостерігаються негативні тиски, які змінюються від – 532 Па на передній частині коника до 317 Па над заднім звисом. Одночасно на нижній частині навітряного карниза спостерігається позитивний тиск, який змінюється в межах 416...381 Па. Вітрова навантаження на дах при даному виді завантаження симетрична щодо поздовжньої осі будівлі. При бічному вітрі картина розподілу вітрового тиску симетрична щодо поперечної осі будівлі. На навітряній половині тиск змінюється від 51 Па в зоні карниза до – 309 Па в зоні коника. На підвітряній стороні спостерігаються виключно негативні тиски, що змінюються від – 546 Па в зоні карниза до – 390 Па в зоні коника. Області низького тиску, що досягають – 550 Па також спостерігаються в районі підвітряних фронтальних звисів. На нижньому боці навітряних карнизних звисів спостерігається позитивний тиск, змінюється від 455 Па по поперечній осі будинку до 170 Па біля кутів. На нижній частині фронтонних карнизів тиск змінюється від – 560 Па в районі навітряного кута до – 500 Па в районі коника і до – 251 Па в районі підвітряного кута. Нижня частина карнизного звису підвітряного боку відчуває негативний тиск від – 332 до – 246 Па.

Вітрові навантаження відповідно до нормативних документів. Розрахунок нормативних вітрових навантажень для запропонованої моделі виконувався відповідно до норм проектування "ДБН В.1.2-2: 2006 зі зміною №1" із застосуванням програмного комплексу SCAD ++. Вихідні дані і параметри для розрахунку наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Вихідні дані і параметри для розрахунку

Вихідні дані	
Вітровий район	5
Характеристичне значення вітрового тиску	0.061 Т/м ²
Тип місцевості	I - відкриті поверхні морів, озер, котрі піддаються вітру на ділянці довжиною не менше 3 км і плоскі рівнини без перешкод
Тип споруди	Однопрогонові будівлі без ліхтарів
Висота розміщення будівельного об'єкта над рівнем моря	0 км
Параметри	
Поверхня	Бічні стіни, Права стіна, Ліва стіна, Покрівля
Крок сканування	0.5 м
Коефіцієнт надійності за граничним розрахунковим значенням γ_{fm}	0.96
Коефіцієнт надійності за експлуатаційним розрахунковим значенням γ_{fe}	0.21

Розрахункові схеми для різних елементів будівлі приведені на рис.7.

Аналіз отриманих даних

Стіни. Значення вітрового тиску, отримані за методикою ДБН В.1.2-2: 2006 практично однакові по всій поверхні будь-якої зі сторін будинку. При цьому, при швидкості вітру 25 м/с навітряна стіна відчуває позитивний вітровий тиск 647 Па або майже 69 кгс/м², підвітряні і бічні - негативний тиск по – 333 Па (– 34 кгс/м²) кожна.

Розрахунок вітрових тисків, методом CFD дає іншу картину. Залежно від напрямку вітру по відношенню до будівлі, максимальний тиск на навітряному боці змінюється від 525 Па (54 кгс/м²) при фронтальному і бічному вітрові до 643 Па (66 кгс/м²) при діагональному вітрові. При цьому, максимальні тиски припадають на нижню частину будівлі. Ще однією зоною високого тиску на навітряних стінах є область примикання стіни до козирка покрівлі: для фронтального і бічного вітру — 420 Па (43 кгс/м²), для діагонального — 497 Па (51 кгс/м²).

Бічні і підвітряні стіни відчувають негативний тиск, який також розподілений по поверхні нерівномірно. Для фронтального і бічного вітру максимальні розрідження спостерігаються у верхній частині стіни в області прилеглої до кута з навітряною стіною. У цьому місці спостерігається висока турбулентність, яка веде до розрідження до -547 Па (-58 кгс/м^2). Значення для діагонального вітру трохи нижчі і складають -398 Па (-41 кгс/м^2). На підвітряних стінах негативний тиск не перевищує -290 Па (-30 кгс/м^2) і його найбільші значення знаходяться в області примикання стіни до даху. Таким чином, екстремальні значення вітрового тиску на стіни, отримані методом CFD нижче отриманих за методикою ДБН В.1.2-2: 2006. Тому, при розрахунку стін малоповерхових будівель, методику CFD можна рекомендувати до застосування для випадків, коли важливим є врахування нерівномірності розподілу тиску на стіни, або важливе врахування динамічних впливів на стіни внаслідок зриву повітряного потоку і турбулентного руху повітря.

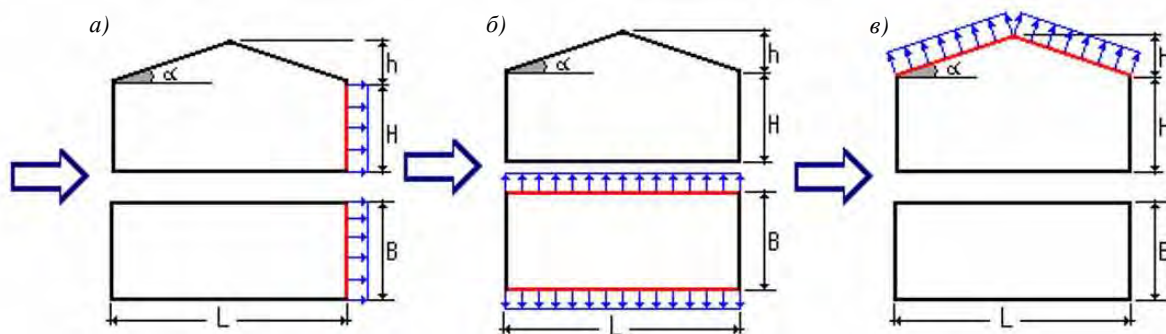


Рис. 7. Розрахункові схеми для визначення вітрових навантажень відповідно до ДБН В.1.2-2: 2006: *а* - права стіна, *б* - бічні стіни, *в* - покрівля

Дах. Відповідно до даних отриманими за методикою ДБН В.1.2-2: 2006 на навітряну сторону даху діє тиск 39 Па (4 кгс/м^2), на підвітряну — 78 Па (8 кгс/м^2).

Метод CFD дає іншу картину розподілу вітрових тисків. При бічному вітрові, позитивний тиск на навітряній стороні даху спостерігаються в області, що не перевищує $1/3$ всієї навітряної площі даху. При цьому максимальний тиск становить 51 Па (5 кгс/м^2). На велику площу навітряної частини даху діє негативний тиск, що досягає в ділянці коника — -116 Па (-12 кгс/м^2), а в карнизній — -179 Па (-18 кгс/м^2). Одночасно на нижню частину навітряного карниза діє позитивний тиск, що досягає 455 Па (46 кгс/м^2). Таким чином, на карнизну частину даху впливає сумарне навантаження 634 Па або (65 кгс/м^2), яке прагне підняти дах вгору.

На більшу частину підвітряного боку даху діє негативний тиск — 390 Па (-40 кгс/м^2), що значно вище значень, отриманих за методикою ДБН В.1.2-2: 2006. Для діагонального вітру максимальний негативний тиск досягає -729 Па (-74 кгс/м^2), для фронтального — -508 Па (-52 кгс/м^2). Таким чином, екстремальні значення вітрового тиску на дах, отримані методом CFD значно вище отриманих за методикою ДБН В.1.2-2: 2006.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Дослідження виявило, що розрахунок вітрових тисків на малоповерхові будівлі за методикою ДБН В.1.2-2: 2006 не завжди дозволяє отримати результати, що забезпечують надійність конструкції. Це, зокрема, стосується вітрових тисків на дахи. Метод розрахунку CFD показує значно більші негативні навантаження як на навітряний, так і на підвітряний бік даху. Методика ДБН В.1.2-2: 2006 також не враховує значні позитивні тиски в нижній площині карнизного звису. Даний позитивний тиск в поєднанні з негативним на верхній площині створює значні зусилля, які прагнуть відірвати дах від стіни і створити розрив між стіною і дахом. Високі позитивні тиски у верхній частині навітряних стін сприяють перетіканню позитивного надлишкового тиску під дах, що в поєднанні з негативним тиском на зовнішній поверхні даху веде до відриву конструкції даху від будівлі. Дані явища необхідно враховувати при проектуванні дахів малоповерхових будівель, що знаходяться в зоні можливих екстремальних вітрових впливів, до яких останнім часом можна віднести і Кривий Ріг.

Подальші дослідження необхідно вести в напрямку пошуку конструкції даху, що знижує великі перепади вітрового тиску на її поверхні, крім того, великий інтерес являє вивчення впливу розміру і форми піддашкового звису на розподіл вітрового тиску на стіни і дах.

Список літератури

1. Бабиченко В. Н., Адаменко Т. И., Бондаренко З. С., Николаева Н. В., Рудишина С. Ф., Гущина Л. М. Экстремальная температура воздуха на территории Украины в условиях современного климата. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://uhmi.org.ua/conf/climate_changes/presentation_pdf/oral_1/Babichenko_et_al.pdf. – Название с экрана.
2. О. Шевченко, О. Власюк, И. Ставчук, М. Ваколюк, О. Илляш, А. Рожкова Оценка уязвимости к изменению климата: УКРАИНА Климатический форум восточного партнерства (КФВП) и Рабочая группа неправительственных организаций по вопросам изменения климата (РГ НУО ВИК), 2014. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://necu.org.ua/wp-content/uploads/2014/07/Ukraine_cc_RUS.pdf – Название с экрана.
3. Christensen, J. H., B. Hewitson, A. Busuioc, A. Chen, X. Gao, I. Held, R. Jones, R. K. Kolli, W.-T. Kwon, R. Laprise, V. Magaña Rueda, L. Mearns, C. G. Menéndez, J. Räisänen, A. Rinke, A. SarrandP. Whetton. **Regional Climate Projections. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of WG I to the Fourth Assessment Report of the IPCC** [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. – 2007. – 94 pp.
4. Осадчий В. І., Бабіченко В. М. Динаміка стихійних метеорологічних явищ в Україні [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://ukrgeojournal.org.ua/sites/default/files/UGJ-2012-4-08.pdf>. – Название с экрана.
5. Р.Н. Павловский, С.Г. Кузнецов Оценка ветровых воздействий на высотные здания и сооружения Вторая научно-практическая конференция "Спецпроект: анализ научных исследований" (7-11 декабря 2005г.)
6. С.Ю. Скрипченкова Воздействие ветровых нагрузок на высотные здания Астраханский вестник экологического образования №2 (40) 2017 с. 103-108)
7. С.И. Дубинский Численное моделирование ветровых воздействий на высотные здания и комплексы Научная библиотека диссертаций и авторефератов disserCat <http://www.dissercat.com/content/chislennoe-modelirovanie-vetrovykh-vozdeystviy-na-vysotnye-zdaniya-i-kompleksy#ixzz5BJdQxXXs>
8. Mendis P. [et al.] Wind Loading on Tall Buildings // Ejs Special Issue: Loading on Structures. - 2007. - pp. 41-54.
9. Золина Т.В., Садчиков П.Н. Исследование случайных воздействий ветровой нагрузки на работу каркаса однопэтажного промышленного здания // Вестник МГСУ. 2016. № 9. С. 15–25. DOI: 10.22227/1997-0935.2016.9.15-25
10. Симиу, Э. Воздействие ветра на здания и сооружения / Э. Симиу, Р. Сканлан; пер. с англ. Б.Е. Маслова, А.В. Швецово; под ред. Б.Е. Маслова. — М.: Стройиздат, 1984. — 360 с
11. Tayfun E. CFD methods for three-dimensional computation of complex flow problems Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Volume 81, Issues 1–3, May 1999, Pages 97-116

Рукопис подано до редакції 16.03.2020

УДК 622.14

П.І. ФЕДОРЕНКО, д-р техн. наук, проф., А.В. ПЕРЕМЕТЧИК, канд. техн. наук, доц.,
Т.О. ПОДОЙНІЦІНА, ст. викл., Криворізький національний університет

СТАТИСТИКО-ЙМОВІРНІЙ РОЗПОДІЛ ПРОГНОЗНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ ПРИ ГЕОМЕТРИЗАЦІЇ НАДР

Мета. Мета роботи полягає у знаходженні закономірностей розташування найважливіших якісних показників у масиві для того, щоб визначити їх зміну у процесі розвитку гірничої розробки. Найважливішим напрямом застосування геометризації родовищ залізорудних корисних копалин є гірничо-геометричне прогнозування їх якісних показників для вирішення задач довгострокового та короткострокового планування для того, щоб налагодити з великим ступенем ефективності роботу підприємства, що видобуває залізорудні корисні копалини, в режимі усереднення та підвищити ступінь раціоналізації процесу видобутку руди та ведення гірничих робіт.

Методи дослідження. Для розв'язання нагальних задач передбачено багато методів, в тому числі, застосування теоретичних досліджень, натурні та виробничі випробування. Під час робіт застосовувались геостатистичні методи оцінки. Методика полягає у знаходженні закономірності просторового розташування показників покладу для розв'язання задачі прогнозування властивостей родовищ корисних копалин.

Наукова новизна. За спосіб огляду маркшейдерсько-геологічної інформації, взятої за неоднорідною розвідувальною мережею пропонується застосовувати спосіб крайгінга. Розглянуто спосіб оцінювання закономірності розташування чинників родовища з нелінійним характером мінливості.

Практичне значення. Висвітлено загальні способи оцінювання геологічних показників при розрахунку якісних показників залізорудних родовищ і показано їх властивості. Подано найзручніший спосіб оцінювання в умовах Криворізьких залізорудних родовищ. Найзначущим є створення методики прогнозування просторового розміщення показників родовищ залізорудних корисних копалин.

Результати. Отримано результати, які можуть давати випадкові функції з декількома компонентами, які є стаціонарними збільшеннями. Виходячи з того, що на родовищах Кривбасу детальна геологічна розвідка проводиться, як правило, за допомогою неоднорідної мережі свердловин, крайгінг є самим оптимальним способом для оцінювання та збільшення істотності геологічної інформації. Результатом геометризації родовищ та покладів корисних копа-

лин є знаходження прогнозного просторового розміщення якісних показників у просторі масиву гірських порід і рудних тіл.

Ключові слова: геометризація, гірничо-геометричні методи прогнозування, варіограма, крайгінг, мінливість геологічних показників, розвідувальна мережа.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-32-36

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Креслення, що змальовують важливі показники родовищ, мають здатність встановити основну закономірність між компонентами, які вміщуються у складі корисної копалини, що дає можливість змалювати характер розміщення цих компонентів. Цей факт має велике значення при проектуванні розробки родовища і подальшій експлуатації. Якщо є такі креслення, можливо спланувати видобування корисних копалин з відомим складом, який необхідний для процесів їх перероблення.

Дуже необхідним застосуванням геометризації родовищ залізорудних корисних копалин є гірничо-геометричне прогнозування їх якісних показників для розв'язання задач планування для налагодження з найбільш ефективного видобутку корисних копалин в режимі усереднення якості корисної копалини та раціоналізації відпрацювання родовища.

Аналіз досліджень і публікацій. Детальний розгляд сучасних знань стосовно геометризації покладів твердих корисних копалин змалював, що попередні гірничо-геометричні горизонтальні та вертикальні графіки, що змальовують просторове положення важливих чинників родовища і гірничих робіт, які застосовуються у перспективному і поточному плануванні, отримуються із застосуванням кількісних методів гірничо-геометричного прогнозування. Вагомою вадою методів, що оцінюють характер розміщення показників є те, що на покладах з високим характером мінливості розташування корисних копалин ці способи не дозволяють отримати високих результатів, не задовольняють бажаній точності прогнозування, а також не враховують впливу на прогнозування «ураганних» значень проб. Такі способи не дозволяють у повному обсязі вісвітити закономірності просторового розташування корисних копалин.

Постановка задачі. Задачою геометризації, у процесі розвитку гірничої справи, є створення гірничо-геометричних моделей покладів, що дозволяють показувати закономірності розташування важливих чинників якості в масиві для прогнозування їх змінюваності в процесі видобування корисних копалин.

Викладення матеріалу та результати. В ході обробки початкової геологічної інформації виникає проблема відбору безлічі проб, вміст в яких впливає на вміст в даному блоці або ділянці родовища. Вона пов'язана з будь-яким методом визначення зважених середніх. Важливими є два напрями задачі: техніка пошуку і критерій його закінчення. Критерій зупинки може бути заснований на значенні відстані від проби до блоку або до точки, вміст в якій має бути визначений. У найбільш складних програмах розрахунку зважених середніх пошук точок навколо блоку ведеться за допомогою кута 45° на площині або конуса в просторі, щоб забезпечити відносну показність усіх напрямів, перш ніж знайти перші N сусідів. Це дозволяє уникнути ефекту, пов'язаного із скупченням проб в одних напрямках і відсутністю їх в інших.

Цей крок є, проте, зайвим при крайгінгу, оскільки за наявності скупчень точок введення коваріацій проб дозволяє автоматично врахувати вплив складових кластера, ліквідовуючи його «надпоказність». За допомогою крайгінгу розподіляються ваги між найближчими пробами, якщо не забезпечена постійна щільність випробування.

Щільність мережі не має особливого значення. Але це ще нічого не говорить про те, наскільки багато проб потрібно розглянути. Будь-який метод крайгінгу не вказує на число проб, яке потрібно при оцінюванні вмісту в цьому блоці. З теоретичних позицій мають бути використані усі наявні проби. Проте ясно, що далеко розташовані проби представляють малий інтерес. Крім того, витрати на розв'язання системи лінійних рівнянь, кількість яких дорівнює N , пропорційні N^3 . Тому очевидно, що не слід брати надто багато проб. Наприклад, розгляд шістнадцяти точок замість дванадцяти збільшує час обчислень приблизно в три рази, а шістнадцяти проб – у вісім разів.

Вважається, що проба, віддалена від блоку в заданому напрямі більш ніж на інтервал впливу (якщо він існує), має нульову вагу і її шкідливо використати. Як приклад зробимо оцінку розвідувальної мережі Скелеватського родовища залізистих кварцитів, що розробляється кар'єром ПівдГЗКа. Випробування Скелеватського родовища впродовж тривалого часу ведеться

двома способами. Детальна розвідка ведеться шляхом випробування шламу свердловин, розташованих в нерегулярному порядку з інтервалом від п'ятидесяти до двохсот метрів. Експлуатаційна розвідка ведеться шляхом випробування підірваної маси точковим методом. При однорідних рудах в одну пробу відбираються шматочки з ділянки завдовжки близько п'ятдесят метрів (у напрямі, паралельному укусу уступу) і з шириною, що визначається розмірами блоку, що підривається. При різномірному складі руд кожен різновид кварцитів випробується окремо. Вага проби близько тридцять кг.

Дані для оцінки були відібрані по маркшейдерській осі 77 по простяганню у бік основного напрямку посування гірських робіт. Шляхом порівняння виберемо найкращий спосіб оцінки, що відповідає реальним умовам залізородних родовищ Кривбасу. На початку оцінимо залежність закономірної складової мінливості від інтервалу випробування, а потім знайдемо коефіцієнти автокореляції при різних інтервалах випробування.

З рис. 1, 2 видно, що найменша критична відстань геологічного розвідування для магнетитового заліза для Скелеватського родовища складає шістьсот метрів і для магнетитового заліза, і для заліза загального. Висновок який звідси випливає, говорить, що характеристики геологічної мережі відповідають вимогам, що пред'являються до них.

З рис. 3, 4 видно, що коефіцієнт автокореляції дає неоднозначні результати. Це відбувається тому, що цей коефіцієнт за своєю суттю оцінює в тій чи іншій мірі відхилення від середнього по вибірці значення. Таким чином, для того, щоб якісно оцінити родовище з нелінійним характером мінливості показників, необхідно з великою точністю підібрати об'єм і інтервал вибірки, а також згладити початкові дані, що дуже трудомістко, і не завжди можливо. У даному ж випадку графіки мають вигляд синусоїди із зростаючою амплітудою. Відхилення показників, що стоять поруч, від середнього також змінюються згідно із законом, близьким до синусоїдального, тому можна сказати, що на родовищі дійсно присутня синусоїдальна складова в розміщенні

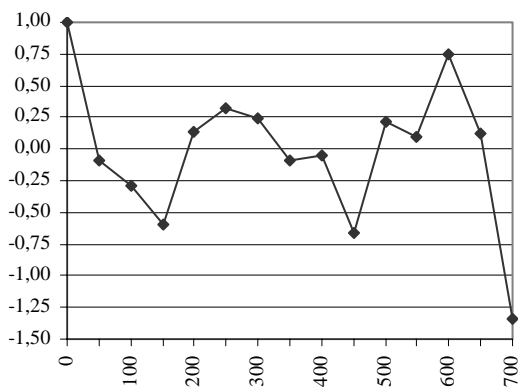


Рис. 3. Залежність коефіцієнта автокореляції вмісту магнетитового заліза гор. 165-180 від інтервалу випробування

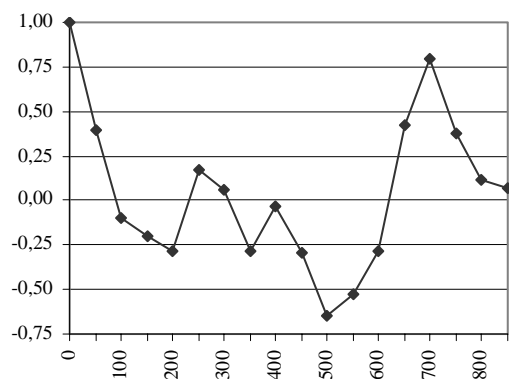


Рис. 4. Залежність коефіцієнта автокореляції вмісту загального заліза гор. 165-180 від інтервалу випробування

показників, а коефіцієнт автокореляції не цілком прийнятний для оцінки розвідувальної мережі залізородних родовищ Кривбасу.

Якщо вплив проб, що виходять за межі критичного інтервалу розвідки несуттєвий, але всетаки не дорівнює нулю, то підсумовування їх незначних вагів може іноді викликати помітну зміну оцінки вмісту. Тому перш ніж знаходити ваги для кожної з наявних проб, можна спробувати об'єднати усі проби, які віддалені від блоку, застосувавши оцінку типу

$$Z^* = \sum_{i=1}^{n-1} a_i Z(X_i) + a_n \bar{X}, \quad (1)$$

де \bar{X} – середнє по усіх наявних пробах.

Введення середнього вмісту призводитиме до тієї ж самої системи рівнянь крайгінгу. Єдина турбота пов'язана зі знаходженням коефіцієнтів s_{in} , s_{un} і s_{nn} , причому необхідно пам'ятати, що в n -му рівнянні системи замість вмісту в одиничній точці фігурує середній вміст \bar{X} по усіх пробах. Проте цей шлях зазвичай не використовується на практиці. Частіше розглядають усі проби, що лежать у середині площі, радіус якої дорівнює інтервалу впливу вариограмми. Кількість проб при цьому зазвичай буває менше тридцяти. Важливіше значення задача, як знайти безліч найближчих для цього блоку проб.

Звичайно, в загальному випадку неможливо розглядати усю безліч точок з урахуванням їх відстаней до кожного блоку. Хороше рішення полягає в

тому, щоб спочатку розсортувати усі проби напрямів x, y, z залежно від порядку, в якому оцінюватимуться блоки. Це впорядкування, доповнене введенням максимально допустимої відстані, дозволяє обмежити операції з початковими даними. Коли задану кількість блоків оцінено, розгляд припиняється.

Визначення розмірів оцінюваних блоків можна поставити як завдання детального оцінювання, виділяючи блоки найменших можливих розмірів. Але ця тенденція, крім того, що призводить до непотрібного дорожчання робіт, дає також і результати, що розчаровують. Виявляється, що невеликі близько розташовані блоки характеризуються дуже схожими оцінками. Потрібно пам'ятати, що у міру того як розміри блоків зменшуються, помилки оцінювання збільшуються. Так, скорочення лінійних розмірів блоків удвічі призводить до росту кількості блоків, що підлягають оцінці і, ймовірно, числа систем лінійних рівнянь, які необхідно вирішити, у вісім разів. В якості робочого правила можна прийняти, що мінімальний розмір блоку повинен складати не менше чверті середнього інтервалу бурової мережі. Наприклад, блоки повинні мати сторону п'ятдесят метрів при кроці бурової мережі двісті метрів, або сторона двісті метрів при кроці вісімсот метрів.

При відкритій розробці інформацію часто отримують на основі борозенних і точкових проб, що відбираються на окремих сторонах блоків, і на основі свердловин колонкового буріння, розташованих усередині блоків.

Можна стверджувати, що оцінка Z^* вмісту у блоці виходитиме на основі середнього вмісту, що визначається по керновим пробах, узятих усередині блоку, і середнього по борозенних пробах. Позначимо цей середній вміст як X і Y відповідно. Тоді

$$Z^* = a_1 X + (1 - a_1) Y. \quad (2)$$

Система рівнянь крайгінгу в цьому випадку має вигляд

$$\begin{cases} a_1 s_1^2 + a_2 s_{12} + m = s_{01}; \\ a_1 s_{12} + a_2 s_2^2 + m = s_{02}; \\ a_1 + a_2 = 1. \end{cases} \quad (3)$$

Величина s_1^2 є дисперсією середнього вмісту в кернових пробах усередині родовища, s_2^2 – дисперсією середнього вмісту у борозенних пробах, s_{12} – коваріацію цього середнього вмісту, яка є окремим різновидом коваріації блоків. Величини s_{01} та s_{02} є коваріаціями блоків і колонкових свердловин і блоків і борозенних проб відповідно.

Часто родовище характеризується керновими і валовими пробами.

Якість проб різних типів сильно розрізняється. Валові проби надають значно більше інформації. Але зона впливу цих проб не співпадає із зоною впливу кернових проб, і застосування звичайного крайгінгу на основі інформації обох типів може обійтися занадто дорого. Кернові проби розглядаються в якості точкових. Валові ж проби за точкові прийматися не можуть. Трудомісткість знаходження коваріацій проб один з одним і з блоками може бути серйозною перешкодою для проведення оцінювання.

В цьому випадку можна отримати оцінку вмісту в кожному блоці, враховуючи тільки вміст у кернових пробах. Потім можна повторити оцінювання, використовуючи експериментальну вариограму, побудовану тільки для валових проб, і знайти значення оцінки Y . В результаті для кожного блоку ми матимемо в розпорядженні дві оцінки, кожна з яких характеризується своєю дисперсією.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Показано розв'язання актуальної наукової задачі. Виходячи з того, що на залізрудних родовищах Кривбасу детальне геологічне розвідування найчастіше проводиться за неоднорідною мережею свердловин, спосіб крайгінгу є найприйнятнішим при оцінюванні вірогідності вихідних геологічних даних. Встановлено, що оцінку розвідувальної мережі доцільно робити на основі методу послідовних різниць показника, а оцінку вмісту корисного компонента прийнятніше робити шляхом побудови вариограми на основі методів крайгінгу.

Список літератури

1. Букринский В.А. Геометрия недр: Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1985.
2. Гудков В.М. Сравнение распределения пространственных переменных. // Маркшейдерский вестник, 1997. –

№ 1. – С. 8-11.

3. Давид М. Геостатистические методы при оценке запасов руд. – Л.: Недра, 1980.
4. Де Гроот М. Оптимальные статистические решения. – М., – 1974. – 481 с.
5. Девис Дж. С. Статистический анализ данных в геологии. Книга 1. – М.: Недра. – 1990. – 246 с.
6. Калинин В.М. Многомерная геометрия форм и качественных свойств месторождений // Маркшейдерское дело и геодезия. Межвузовский сборник. – 1979. – вып. 6. – с. 99-105.
7. Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. – М.: Мир. – 1969. – 400 с.
8. Крамбейн У., Кауфман М., Мак-Кеммон Р. Модели геологических процессов – М.: Мир. – 1973. – 150 с.
9. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. – М.: Мир, 1982.
10. Миллер Р.Л., Кан Дж. С. Статистический анализ в геологических науках. – М.: Мир. – 1965. – 482 с.
11. Низгурецкий З.Д. К приложению теории нестационарных случайных функций для оценки результатов геометризации месторождений. – Л.: изд. ВНИМИ. – 1974. – Сб. № 93. – С. 99–113.
12. Низгурецкий З.Д. Использование элементов теории случайных функций для оценки точности определения содержания полезного компонента и мощности залежи при геометризации. – Тр. ВНИМИ. – Т. 40. – 1963. – С. 292-311.
13. Переметчик А.В. Разработка эвристического алгоритма прогнозирования геологических показателей месторождений полезных ископаемых // Разработка рудных месторождений: Респ. межвед. науч.-техн. сб. – Кривой Рог: КТУ. – 2004. – Вып. 85 – С. 194 – 200.
14. Krige D.G. A review of development of geostatistics in South Africa // In: Advanced Geostatistics in the Mining Industry. Reidel, Dordrecht, Netherlands. 1976. P. 279-294.
15. Marechal A., Serra J. Random kriging // In: D.F. Merriam (Editor), Geostatistics. A Colloquium. Plenum Press, New York. 1970. P. 91-112.
16. Matheron G. Kriging or polynomial interpolation procedures. – CIMM Trans., 70. 1967. P. 240-244.
17. Matheron G. The intrinsic random functions and their applications. – Adv. Appl. Prob., 5. 1973. P. 439-468.

Рукопис подано до редакції 18.03.2020

УДК 624.153.524

Р.О.ТІМЧЕНКО, д-р техн.наук, проф., Д.А. КРІШКО, канд.техн.наук, ст. викл.,
І.В.ХОРУЖЕНКО, аспірантка
Криворізький національний університет

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЗАЄМОДІЇ СКЛАДЧАСТИХ ФУНДАМЕНТІВ ПРИ НЕРІВНОМІРНИХ ДЕФОРМАЦІЯХ ОСНОВИ

Мета. Математичне моделювання за допомогою програмних комплексів на основі методу кінцевих елементів (МКЕ) дозволяє в повному обсязі вирішувати складні інженерні задачі, досліджувати процеси та явища, аналізувати і прогнозувати роботу досліджуваної системи, мати змогу адекватно порівнювати роботу моделі та натурального процесу, явища тощо. Метою було проаналізувати значення та характер осідань фундаментних конструкцій, а також дослідження напружено-деформованого стану основи, аналіз перерозподілу напружень під подошвою фундаменту за умов виникнення нерівномірних деформацій основи.

Методи дослідження. Для виконання дослідження необхідно досконало володіти інструментами спеціалізованих програмних комплексів, що використовують в своїх алгоритмах метод кінцевих елементів. Завдяки аналітичним методам ми маємо змогу дослідити роботу фундаменту при математичному моделюванні, проаналізувати результати та зробити висновки для подальших досліджень.

Наукова новизна. Актуальність даної роботи пов'язана із розв'язанням поставленої задачі. Її результатом є встановлення залежності між зовнішнім навантаженням та осіданням фундаментних конструкцій двох типів при нерівномірних деформаціях основи.

Практична значимість. Дослідження дають змогу оцінити роботу структурних фундаментів різного конструктивного рішення, математичне моделювання дозволяє всесторонньо проаналізувати результати та врахувати недоліки системи при подальших дослідженнях.

Результати. Було виконано математичне моделювання в програмному комплексі Ліра-САПР двох типів фундаментів в об'ємній постановці. В результаті було встановлено, що поле осідань більш рівномірне для альтернативної фундаментної системи в об'ємній картині вертикальних переміщень. Дві крайні складки прототипної конструкції фундаменту мають менші межі значень вертикальних переміщень. При моделюванні нерівномірних деформацій основи аналогічно було доведено переваги альтернативної моделі фундаменту. Загальний принцип розподілення вертикальних напружень узгоджується із місцями найбільших зовнішніх сил, при цьому дана фундаментна система не дозволяє перерозподілити напруження рівномірно під кожною із складок. Якщо порівнювати числову складову нормальних напружень, що виникли в тілі ґрунту основи, то абсолютні максимальні значення нормальних вертикальних напружень N_z в площині XOZ було отримано для прототипної моделі фундаменту на рівні $1,56 \text{ т/м}^2$, в той час як для альтернативної конструкції фундаменту це значення склало $1,42 \text{ т/м}^2$.

Ключові слова: складчастий фундамент, метод кінцевих елементів, напружено-деформований стан

© Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Хоруженко І.В., 2020

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В процесі наукових досліджень в області інженерних геотехнологій невід'ємним є використання сучасних засобів математичного моделювання. Ускладненням для дослідження роботи складчастих фундаментів під опори ліній електропередач є недостатня вивченість проблеми математичного моделювання таких фундаментів в спеціальних програмних комплексах.

При проектуванні та розрахунку фундаментів особливу увагу слід приділяти питанню роботи фундаментів у складних інженерно-геологічних умовах, коли можливі виникнення нерівномірних деформацій основи, локальні осідання основи, і, внаслідок цього, можливе утворення безопорних зон.

Одним із ускладнень при математичному моделюванні складчастих фундаментів під опори ліній електропередач (ЛЕП) є моделювання сумісної роботи фундаментної конструкції складної форми та ґрунтової основи, де необхідно вдало підібрати модель ґрунтової основи, врахувати всі вихідні параметри, зімітувати роботу фундаменту до моменту повного залучення ґрунтової основи у роботу.

Аналіз досліджень і публікацій. Завдяки стрімкому розвитку використання спеціалізованих програмних комплексів для вирішення геотехнічних задач на сьогоднішній день є можливість дослідити роботу фундаментних систем при взаємодії їх з основою, використовуючи математичне моделювання. Застосування програмних комплексів на базі методу кінцевих елементів є незамінним інструментом при наукових дослідженнях як вітчизняних, так і закордонних вчених [1-5].

Пронозін Я.О. у своїй науковій роботі представив теоретичні дослідження напружено-деформованого стану (НДС) основи, що моделювалася лінійно-деформованим середовищем [6]. У якості інструменту реалізації методу кінцевих елементів була використана геотехнічна програма PLAXIS 2D. Навантаження приймалось гнучким, по полосі, що діє до нормалі поверхні, задача виконувалася у плоскому середовищі.

Вчені Nisha P. Naik та Sabna Thilakan [7] досліджували роботу фундаменту-оболонки стовпчастого типу, аналізуючи різні кути нахилу бічних поверхонь. Моделі фундаментної деформації та властивості ґрунту були численно змодельовані за допомогою програмного забезпечення OptumG2 із застосуванням кінцевих елементів.

В своїй науковій роботі [8] вчені Кравченко Г.М., Труфанова Е.В., Вержиковський В.В., Заритовський Д.С. розробили кінцево-елементну модель «ґрунт – фундаментна плита – верхня будова» в програмному комплексі Ліра-САПР. Було досліджено напружено-деформований стан фундаментної плити з урахуванням моделей Вінклера і Пастернака. За результатами розрахунку отримані графіки осідання фундаментної плити. Кінцево-елементна модель містить наступні кінцеві елементи: стрижневий універсальний просторовий KE 10, оболонковий універсальний чотирикутний

KE 44, спеціальний законтурний елемент пружної основи KE 53 для моделі Пастернака.

В своїх наукових дослідженнях Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Хоруженко І.В. дослідили напружено-деформований стан структурних фундаментів та основи при їх контактній взаємодії при різних умовах їх взаємодії [9]. При цьому для математичного моделювання було використано програмний комплекс Ліра-САПР. В першому випадку моделювалася ситуація, коли призматична складка контактує з основою тільки у межах горизонтальних опорних полиць. В другому випадку ґрунт основи повністю включався у роботу шляхом заповнення ним порожнини складки. В результаті було зроблено висновки, що кращі результати продемонструвала робота фундаменту сумісно з ґрунтом, що можна пояснити тим фактом, що ґрунт та фундамент в такому випадку діють як єдине ціле.

Паралельно з попереднім було проведено дослідження впливу геометричних параметрів складчастого фундаменту-оболонки на величину несучої здатності [10]. Було виконано моделювання однієї призматичної складки фундаменту з відомими геометричними параметрами та фізичними характеристиками [11, 12], надалі досліджувалася робота одного типового призматичного штампу при зміні умов роботи та взаємодії з ґрунтовою основою. В якості змінного параметру на даному етапі дослідження було обрано ширину опорної частини складки. В процесі аналізу було встановлено, що при математичному моделюванні фундаментної складки в

плоскій задачі зміна ширина опорної частини суттєво не впливає на несучу здатність основи. Дані результати стали основою для подальшого аналізу та досліджень при моделюванні об'ємної задачі.

Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Хоруженко І.В. виконали дослідження роботи структурного фундаменту при взаємодії із основою у об'ємній постановці задачі за допомогою програмного комплексу Ліра-САПР [13]. Для моделювання призматичної складки використовувався кінцевий елемент КЕ 41. Для моделювання ґрунтової основи було використано універсальний просторовий восьмивузловий ізопараметричний КЕ 36.

Для моделювання балок було використано універсальний просторовий стрижневий КЕ 10 [14]. Була встановлена залежність між зовнішнім навантаженням та осіданням фундаментної конструкції двох типів. Визначено, що модель фундаменту-прототипу має більше нерівномірний характер осідань у кожній контрольній точці, в той час як криві осідань за показниками трьох різних точок оптимальної фундаментної конструкції мають практично аналогічні значення. Додатково, більше значення гранично допустимого навантаження в 14 т було отримано для оптимальної конструкції фундаменту.

Постановка завдання. Метою дослідження є вивчення контактної взаємодії фундаментної конструкції та ґрунту основи за допомогою математичного моделювання при нерівномірних деформаціях основи

Викладення матеріалу та результати. Для моделювання нерівномірних деформацій необхідно було обрати тип основи, в тілі якої містяться прошарки слабкого ґрунту. Згідно відомих класифікацій [15] в залежності від розміщення шарів або лінз слабкого ґрунту, було обрано тип основи, стислива товща якої в межах зони забудови містить декілька вклинюючих лінз, складених слабкими ґрунтами.

Як основний тип ґрунту основи при математичному моделюванні було використано суглинок із межами текучості $0,5 \leq IL \leq 0,75$ із наступними фізико-механічними характеристиками: $E = 600 \text{ т/м}^2$; $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$; $e = 0,95$; $c = 14 \text{ кПа}$; $\varphi = 14^\circ$. У якості прошарку слабкого ґрунту було використано ґрунт із характеристиками: $E = 340 \text{ т/м}^2$; $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$; $c = 30 \text{ кПа}$; $\varphi = 10^\circ$.

Задачею даного етапу моделювання було проаналізувати значення та характер осідань фундаментних конструкцій, а також дослідження напружено-деформованого стану основи, аналіз перерозподілу напружень під підшовою фундаменту за умов виникнення нерівномірних деформацій основи.

Для моделювання призматичної складки використовувався кінцевий елемент КЕ 41. Даний кінцевий елемент призначений для міцнісного розрахунку тонких пологих оболонок (плит, балок-стінок). В кожному вузлі в такому кінцевому елементі є по 6 ступенів свободи: U – горизонтальне переміщення, додатній напрям якого співпадає із напрямком вісі X_1 ; V – горизонтальне переміщення, додатній напрям якого співпадає із напрямком вісі Y_1 ; W (w) – вертикальне переміщення (прогин), додатній напрям якого співпадає із напрямком вісі Z_1 ; U_x – кут повороту відносно вісі X_1 ; U_y – кут повороту відносно вісі Y_1 ; U_z – кут повороту відносно вісі Z загальної системи координат [14].

Для моделювання ґрунтової основи було використано універсальний просторовий восьмивузловий ізопараметричний КЕ 36. Даний тип КЕ призначений для міцнісного розрахунку континуальних об'єктів та масивних просторових конструкцій.

Для моделювання балок було використано універсальний просторовий стрижневий КЕ 10. Такий стрижень має місцеву праву декартову систему координат X_1, Y_1, Z_1 , відносно якої визначаються зусилля та задається місцеве навантаження.

Для поєднання такого стрижня до вузлів схеми передбачені різні можливості: за допомогою абсолютно жорстких вставок вздовж місцевих осей; за допомогою зняття зв'язку по будь-якому із напрямків (зняття лінійного зв'язку забезпечує прослизання, знаття кутового зв'язку – вільний поворот, тобто циліндричний шарнір).

Шарнірну взаємодію між балками та складкою змодельовано об'єднанням відповідних вертикальних переміщень (за допомогою створення груп об'єднання переміщень).

Основним критерієм граничної несучої здатності основи було виникнення пластичних деформацій основи. Для визначення головних та еквівалентних напружень було обрано теорію Кулона-Мора (модель ґрунтової основи) у якості теорії міцності при оцінці несучої здатності ґрунтової основи.

Кінцево-елементні моделі для обох типів фундаментів зображені на рис. 1. При цьому темнішим кольором виконані кінцеві елементи прошарок слабого ґрунту.

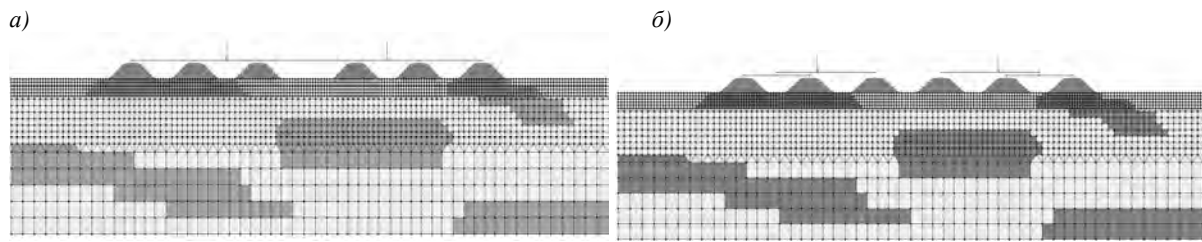


Рис. 1. Кінцево-елементні моделі ґрунтового масиву і фундаментної системи та схема навантаження: *а* – прототипної моделі фундаменту; *б* – альтернативної моделі фундаменту

Навантаження прикладалося поступово з кроком 1 т у вигляді зосередженої сили, місцерозташування якої визначалося за місцем встановлення бази опори ЛЕП. Далі фіксувалися значення вертикальних переміщень (осідання) при кожному етапі навантаження. Значення вертикальних переміщень фіксувалися під верхньою полицею складки, на кожній із шести складок в місцях спирання на них опорної балки (всього шість контрольних точок).

В результаті було отримано значення вертикальних переміщень (осідань) кожної із контрольних точок при зміні зовнішнього навантаження для обох типів фундаментних систем. Для візуального аналізу переміщень було зафіксовано картину виникнення осідань в контрольному перерізі під опорними балками для кожного фундаменту. На рис. 2 можна побачити ізолінії вертикальних переміщень у ґрунтовій товщі під складками та поблизу них під дією навантаження у 6 т на кожну із опорних точок.

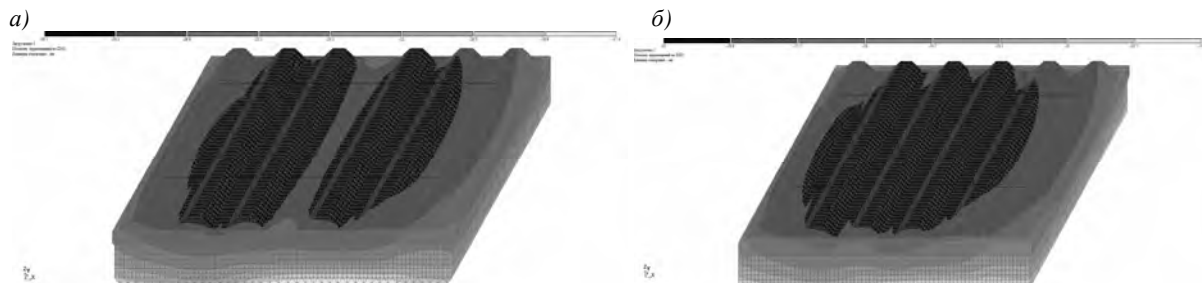


Рис. 2. Ізолінії вертикальних переміщень під дією зовнішнього навантаження в 6 т в ізометричній проекції: *а* – прототипної моделі фундаменту; *б* – альтернативної моделі фундаменту

На рис. 3 зображені ізолінії вертикальних переміщень в площині XOZ під дією зовнішнього навантаження в 6 т для обох типів фундаментів.

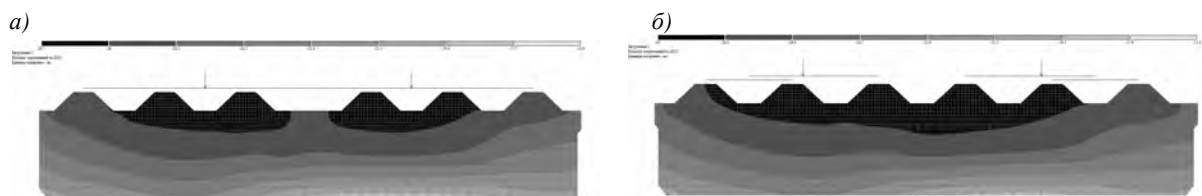


Рис. 3. Ізолінії вертикальних переміщень в площині XOZ під дією зовнішнього навантаження в 6 тон: *а* – прототипної моделі фундаменту; *б* – альтернативної моделі фундаменту

Аналізуючи об'ємну картину вертикальних переміщень (рис. 2) можна побачити, що поле осідань більш рівномірне для альтернативної фундаментної системи. Дві крайні складки прототипної конструкції фундаменту мають менші межі значень вертикальних переміщень згідно зі шкалою. Більш чітко різниця у роботі фундаментів видно на рис. 3, де максимальні значення вертикальних переміщень мають більш рівномірний характер для альтернативної конструкції фундаменту.

В результаті фіксації значень вертикальних переміщень в кожній із контрольних точок для кожного із етапу навантажень було отримано графіки залежності осідань від зовнішнього навантаження (рис. 4).

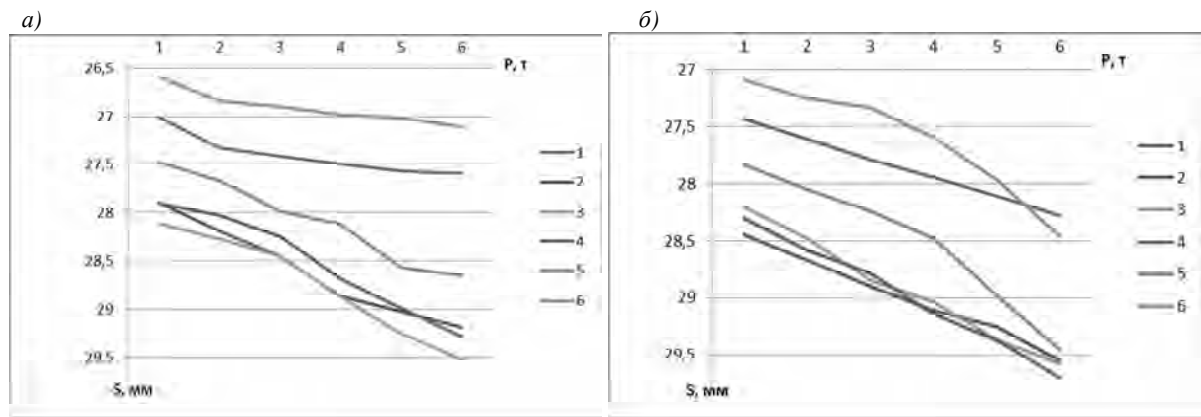


Рис. 4. Графіки залежності осідань від зовнішнього навантаження при математичному моделюванні: *a* – прототипної моделі складчастого фундаменту; *б* – альтернативної моделі складчастого фундаменту; 1...6 – контрольні точки на складках фундаменту

Аналізуючи характер осідань фундаментних конструкцій згідно графіків на рис. 4 можна побачити, що прототипна модель фундаменту має менші значення осідань в кожній із контрольних точок у порівнянні із альтернативною моделлю фундаменту. Проте тут важливі не кількісні значення, а якісні. Суттєвим є рівномірність вертикальних переміщень для кожної із контрольних точок. Важливим є розміщення кожної із кривих на графіку по відношенню одна до одної – чим далі криві у площині графіку, тим менша рівномірність вертикальних переміщень. Більша сукупність кривих на графіку спостерігаються для альтернативної моделі фундаменту (рис.4б). Також точки 1 та 6 прототипної моделі фундаменту (рис. 4а) майже не реагують на зміну зовнішнього навантаження.

Аналогічно було отримано значення нормальних напружень N_z для обох типів фундаментів. На рис. 5, 6 зображено ізолінії нормальних напружень для прототипної та альтернативної конструкцій фундаментів. При цьому для порівняння зміни нормальних вертикальних напружень із збільшенням навантаження для аналізу було обрано результати математичного моделювання під дією навантаження в 2 т та 6 т на кожну точку.

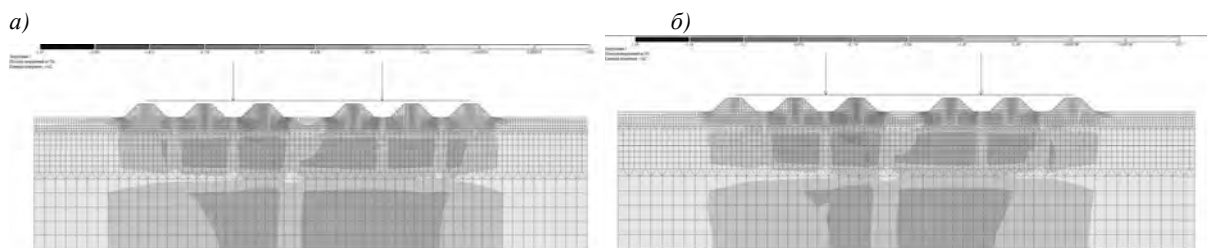


Рис. 5. Ізолінії нормальних напружень N_z в площині XOZ для прототипної моделі фундаменту: *a* – під дією навантаження в 2 т; *б* – під дією навантаження в 6 т

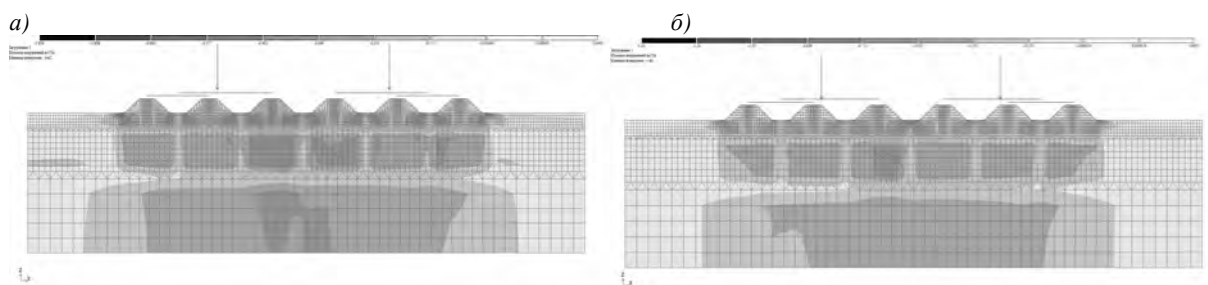


Рис. 6. Ізолінії нормальних напружень N_z в площині XOZ для альтернативної моделі фундаменту: *a* – під дією навантаження в 2 т; *б* – під дією навантаження в 6 т

Аналізуючи ізолінії нормальних напружень прототипної моделі фундаменту (рис. 5) можна побачити значну концентрацію напружень у місцях спирання складок на поверхню ґрунтової основи (приопорна зона) та під верхніми горизонтальними полицями складок (у місцях спирання на них опорних балок). В центральній зоні фундаменту напруження мають значно нижчі

значення, ізолінії нормальних напружень не розповсюджуються на цю зону, що свідчить про те, що ґрунт основи в цьому місці майже не включається в роботу. При цьому інтенсивність напружень наявна переважно під центральними складками; під двома крайніми складками напруження мають значно менші значення, що свідчить про нерівномірність розповсюдження нормальних напружень під кожною із складок при центральному навантаженні. Розподілення напружень відбувається нерівномірно, без утворення спільного ядра.

В той же час спостерігається відмінність у характері ізоліній нормальних напружень N_z для альтернативної моделі фундаменту (рис. 6). Аналогічно можна побачити концентрацію напружень у місцях спирання складок на поверхню ґрунтової основи та під верхніми горизонтальними полицями складок. На глибині до 0,7 м ізолінії напружень біля основи мають локальний характер, незамкнутий під центром кожної із складок. Вирівнювання ізоліній напружень разом із замкненням під віссю кожної із складок відбувається на глибині 2,4 м. Відбувається вирівнювання вертикальної компоненти напруженого стану N_z на глибині нижче 2,4 м згідно з характером утворення ізоліній. При цьому чітко видно, що характер утворення ізоліній однаковий під кожною із складок, що свідчить про рівномірність перерозподілу нормальних напружень під всією фундаментною системою.

Якщо порівнювати числову складову нормальних напружень, що виникли в тілі ґрунту основи, то абсолютні максимальні значення нормальних вертикальних напружень N_z в площині XOZ було отримано для прототипної моделі фундаменту на рівні $1,56 \text{ т/м}^2$, в той час як для альтернативної конструкції фундаменту це значення склало $1,42 \text{ т/м}^2$.

Висновки та напрямок подальших досліджень. При аналізі НДС основи прототипної моделі фундаменту утворення трикутних та трапецевидних ущільнених ядер відбувається переважно під 3, 4 та 5 складками, і має нечіткий, нерівномірний характер. Розподілення напружень відбувається нерівномірно, без утворення спільного ядра. Загальний принцип розподілення вертикальних напружень узгоджується із місцями найбільших зовнішніх сил, при цьому дана фундаментна система не дозволяє перерозподілити напруження рівномірно під кожною із складок.

При аналізі значень вертикальних переміщень було встановлено, що максимальні значення осідань в 29,7 мм спостерігаються у альтернативної моделі фундаменту при дії навантаження в 6 т. Проте саме у прототипної моделі фундаменту різниця показань вертикальних переміщень більша і становить 2,424 мм, в той час як у альтернативної моделі цей показник – 1,422 мм. Це свідчить про більш рівномірне розподілення навантаження при нерівномірних деформаціях основи в даній системі.

Якщо порівнювати числову складову нормальних напружень, що виникли в тілі ґрунту основи, то абсолютні максимальні значення нормальних вертикальних напружень N_z в площині XOZ було отримано для прототипної моделі фундаменту на рівні $1,56 \text{ т/м}^2$, в той час як для альтернативної конструкції фундаменту це значення склало $1,42 \text{ т/м}^2$.

Список літератури

1. **Тимченко Р.А.** Совершенствование фундаментов-оболочек для высотных сооружений / **Р.А.Тимченко, В.В. Васильченко** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ, 2003. – Вип. 1. – С. 104-107.
2. **Тетиор А.Н.** Фундаменты-оболочки / **А.Н. Тетиор, А.Г. Литвиненко.** – Москва: Стройиздат, 1975. –136 с.
3. **Kurian N.P.** Behaviour of shell foundations under subsidence of core soil / **N.P. Kurian** // Proc. 13 Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engrg., New Delhi, India, 1994. – №2 – pp.591-594.
4. **Huat B. K. B.** Finite Element Study Using FE Code (PLAXIS) on the Geotechnical Behavior of Shell Footings / **В. К. В. Huat , А.Т. Mohammed** // Journal of Computer Science, 2 (1), 2006. – pp.104-108.
5. **Mohammed Y. Fattah.** The Behavior of Conical Shell Foundation under Dynamic Loads / **Mohammed Y. Fattah, Waleed A. Waryos, Mohammed A. E. Al-Hamdani** // The 2nd International Conference of Buildings, Construction and Environmental Engineering (BCEE2-2015), Volume:1 – At Beirut, Lebanon, 2015.
6. **Пронозин Я.А.** Экспериментальные исследования взаимодействия мембранного фундамента с грунтовым основанием / **Я.А. Пронозин, Л.Р. Епифанцева** // Всероссийская науч.-практ. конф. Молодых ученых и специалистов, посвященная XX-летию создания ООО НПО «Фундаментстройаркос»: Стратегия инновационного развития, строительства и освоения севера. – Тюмень, 2011. – С.131-134.
7. **Nisha P. Naik.** Geotechnical behavior of shell foundations / **Nisha P. Naik, Sabna Thilakan** // 50th Indian geotechnical conference. – Pune (India), 2015. – pp. 205-216.
8. **Кравченко Г.М.** Исследование напряженно-деформированного состояния фундаментной плиты выставочного павильона Технопарка РГСУ с учетом различных моделей основания / **Г.М. Кравченко, Е.В. Труфанова, В.В. Вержиковский, Д.С. Заритовский** // Инженерный вестник Дона, №4 – 2015, с.30-38.
9. **Timchenko R.A.** Mathematical modeling of the folded foundation interaction with the base by varying the structure stiffness / **R.A. Timchenko, D.A., Krishko, I.V. Khoruzhenko** // Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil

Engineering. – Issue 2 (51), 2018. – pp. 145-150.

10. **Тімченко Р.О.** Дослідження впливу геометричних параметрів складчас-того фундаменту-оболонки на величину несучої здатності основи / **Р.О.Тімченко, Д.А. Крішко, І.В. Хоруженко** // Гірничий Вісник – Вип.104 – Кривий Ріг: КНУ, 2019 – с.65-69.

11. **Timchenko R.A.** Construction solution of folded-plate shell foundation for power transmission towers / **R.A. Timchenko, D.A., Krishko, I.V. Khoruzhenko** // Academic Journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2 (49), 2017. – pp. 207-214.

12. Пат. 130294 Україна, МПК (2018.01) E02D 27/00. Фундамент під опори ліній електропередач / **Р.О. Тімченко, Д.А. Крішко, І.В. Хоруженко**; заявник і патентовласник – Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет». – u201802105, заявл. 28.02.2018; опубл. 10.12.2018, Бюл. № 23.

13. **Тімченко Р.О.** Дослідження напружено-деформованого стану основи під структурними фундаментами за допомогою математичного моделювання / **Р.О. Тімченко, Д.А. Крішко, І.В. Хоруженко** // Вісник Криворізького національного університету – Вип.49 – Кривий Ріг: КНУ, 2019. – С.74-79.

14. **Гензерский Ю.В.** ЛИРА – САПР 2011. Учебное пособие / **Ю.В., Гензерский, Д.В. Медведенко, О.И. Пащенко, В.П. Титок** – Киев: Электронное издание, 2011, – 396 с.

15. ДСТУ-Н Б В.1.1-40:2016 Настанова щодо проектування будівель і споруд на слабких ґрунтах. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 70с.

Рукопис подано до редакції 17.03.2020

УДК [622.271:338.32-048.34]:622.012

І.В. БАРАНОВ, **Є.М. ШВЕЦЬ**, кандидати техн. наук, ст. викладачі,
Є.В. ЧЕРЕДНИЧЕНКО, **Д.В. ПОЛЬЩІН**, магістранти
Криворізький національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ ВИРОБНИЧОЇ ПОТУЖНОСТІ ГРУПИ КАР'ЄРІВ У СКЛАДІ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ

Мета статті. Метою роботи є обґрунтування методів визначення оптимальних показників відкритої розробки, з урахуванням оптимізації роботи групи кар'єрів, які дозволяють підвищити ефективність розробки залізрудних родовищ відкритим способом.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у статті було використано методи: узагальненого аналізу досягнень науки та практичного досвіду роботи гірничо-видобувних підприємств, щодо розробки родовищ корисних копалин відкритим способом групою кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату; аналітичного та графоаналітичного аналізу; економіко-математичного моделювання спільної роботи кар'єрів, як єдиної системи, або єдиного комплексу; факторного аналізу; техніко-економічного аналізу показників роботи окремих кар'єрів та гірничо-збагачувального комбінату в цілому.

Наукова новизна результатів. В роботі запропоновано кар'єри, які розробляють залізрудні родовища та входять до складу гірничо-збагачувального комбінату, розглядати як єдиний комплекс, або єдину систему. При цьому їх технологічні показники необхідно визначати по взаємозв'язаному впливу на технічні та економічні показники роботи гірничо-збагачувального комбінату до складу якого вони входять.

Практична значимість результатів. Запропоновано розрахунковий метод визначення продуктивності кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату, на основі якого можна визначити найкращий варіант сумісної роботи цих кар'єрів з забезпеченням таких техніко-економічних показників гірничо-збагачувального комбінату, які дозволяють підвищити ефективність розробки залізрудних родовищ. Результати досліджень можуть бути використані гірничими підприємствами та проектними організаціями при плануванні гірничих робіт та проектування кар'єрів.

Результати досліджень. Виконано оптимізацію роботи групи кар'єрів за критеріями мінімального коефіцієнту розкриття та мінімальної повної собівартості видобутку руди кожного кар'єру на основі якої визначено пріоритетність роботи кожного кар'єру. Встановлено, що затрати на видобуток однієї тони руди в цілому по гірничо-збагачувальному комбінату можуть бути знижені на 6 %, якщо оптимізацію роботи групи кар'єрів виконувати за критерієм мінімальної повної собівартості видобутку руди.

Ключові слова: кар'єр, руда, розкритві породи, коефіцієнт розкриття, продуктивність, собівартість, техніко-економічні показники.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-42-48

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. При розробці родовищ групою кар'єрів, які входять в систему гірничо-збагачувального комбінату, існує ряд відмінних особливостей, притаманних періодам досягнення оптимальних потужностей і експлуатації групи кар'єрів при їх спільній роботі. Таким чином, задачі експлуатації і введення групи

кар'єрів, які входять в склад комбінату, в експлуатацію повинні вирішуватися з урахуванням особливостей, властивих кожному окремо взятому кар'єру. Проектування відкритої розробки складної структури родовищ зв'язано з вирішенням комплексу задач, потребуючих системного підходу до створення методик визначення оптимальних параметрів і показників розробки, враховуючих специфіку цих родовищ.

В сучасних умовах, які характеризуються структурними змінами ринків мінеральної сировини, проявилась необхідність в зміні основних теоретичних і методологічних підходів до методів оптимізації продуктивності групи кар'єрів, що входять до складу гірничозбагачувального комбінату. Особливо гостро це питання виникає при подальшому підвищенні ефективності розробки залізорудних родовищ відкритим способом.

Аналіз досліджень і публікацій. У складі гірничого підприємства знаходяться в роботі один і більше кар'єрів. Спочатку можливу продуктивність кар'єру по корисній копалині визначали по можливій швидкості посування уступів у горизонтальному напрямку. На основі аналізу перспектив розробки залізорудних родовищ відкритим способом, попиту на мінеральну сировину та досліджень по визначенню продуктивності кар'єрів були розроблені система економіко-статистичного прогнозування показників гірничовидобувних підприємств, економіко-математичні моделі гірничодобувних підприємств з встановленням гірничо-геологічних факторів, які впливають на рентабельність цих підприємств [1-5]. У нормах технологічного проектування [6, 7] та наукових працях [8-11] рекомендовано встановлювати продуктивність кар'єру за корисною копалиною виходячи зі швидкості зниження гірничих робіт. Однак в них, для сучасних умов роботи кар'єрів, що розробляють крутоспадні поклади, не враховується зміна площі рудного покладу із глибиною, включення порід, що вміщують, і розташування в кар'єрному просторі переважувальних пунктів. У роботі [12] запропоновано метод мінімального виймання обсягів розкривних порід при встановлених параметрах системи розробки та напрямку розвитку гірничих робіт, що забезпечує безпечну роботу кар'єру із заданою продуктивністю по руді. Результати досліджень [13] показали, що багатофакторний вплив на продуктивність кар'єрів не можна врахувати в одному критерії оцінки. У такому випадку необхідна розробка декількох критеріїв. Цей набір критеріїв повинен ґрунтуватися на заміні розв'язання однієї великої системи розв'язанням взаємозалежних між собою окремих підсистем.

Постановка задачі. Виходячи з аналізу наукових досягнень та практичного досвіду у галузі розробки залізорудних родовищ корисних копалин метою статті є обґрунтування методів визначення оптимальних показників відкритої розробки, з урахуванням оптимізації продуктивності групи кар'єрів, які дозволяють підвищити ефективність розробки залізорудних родовищ відкритим способом.

Викладення матеріалу та результатів. При вирішенні питання щодо продуктивності групи кар'єрів у складі ГЗК насамперед виконується аналіз умови залягання родовища щоб визначити можливість забезпечення ефективної роботи комбінату цими кар'єрами. Таким чином, один або декілька кар'єрів, які розробляють родовище, складають сировинну базу комбінату [14].

Особливості періоду експлуатації кар'єрів в системі комбінату полягають в наступному. В залежності від будови родовища, потужності корисної копалини та розкривних порід, які покривають та вміщуються у корисній копалині, а також від прийнятого порядку відпрацювання кар'єрного поля кожним кар'єром у визначені періоди експлуатації будуть вийматися неоднакові обсяги корисних копалин і порід розкриву. Відповідно, собівартість видобутку однієї тони корисної копалини на різних кар'єрах буде різною. Корисна копалина, що видобувається в кожному кар'єрі по рокам експлуатації може бути різноманітного сорту та якості. Тому для отримання однієї тони товарної продукції заданої якості необхідно видобути із кожного кар'єру та переробити на збагачувальній фабриці неоднакову кількість корисної копалини, що визначає різні затрати на переробку сировини.

Оптимізація продуктивності групи кар'єрів за рудою полягає у складанні календарного плану їх роботи на визначений експлуатаційний період у якому визначаються показники розвитку гірничих робіт (поточні коефіцієнти розкриву, якість корисних копалин і можлива виробнича потужність кар'єрів). При цьому враховується наявність гірничого обладнання у кар'єрах, планова якість товарної продукції, можлива виробнича потужність комбінату за випуском цієї продукції [14]. Календарний план розвитку гірничих робіт в кар'єрі складається у вигляді гра-

фіків, таблиць і креслень. Крім цього, для більш скорішого та приблизного визначення варіантів роботи групи кар'єрів у складі ГЗК, дослідження виконують на поперечних перерізах.

На прикладі трьох умовних кар'єрів, які входять до складу гірничо-збагачувального комбінату, розглянемо оптимізацію їх роботи.

Умовний кар'єр № 1 відпрацьовує рудний поклад, у якого: кут падіння становить 80° ; горизонтальна потужність – 350 м; протяжність – 2700 м. Параметри цього кар'єру наступні: кут робочого борта – 16° ; кут неробочого борта – 45° ; проектна глибина відпрацювання – 630 м. У даного кар'єру границі гірничих робіт по поверхні вже підійшли до проектного їх положення і подальше відпрацювання кар'єру відбувається з розвитком гірничих робіт тільки в глибину. Умови відпрацювання кар'єру представлені на рис. 1.

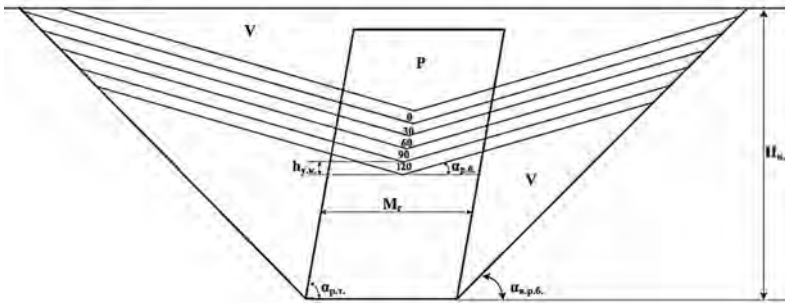


Рис. 1. Поперечний переріз родовища, яке відпрацьовується умовним кар'єром № 1: V – розкриті породи; P – руда; $h_{y.k.}$ – глибина пониження гірничих робіт; $\alpha_{p.b.}$ – кут робочого борта кар'єру; $\alpha_{n.p.b.}$ – кут неробочого борта кар'єру; $\alpha_{p.t.}$ – кут падіння рудного покладу; M_r – горизонтальна потужність покладу; H_k – кінцева глибина кар'єру

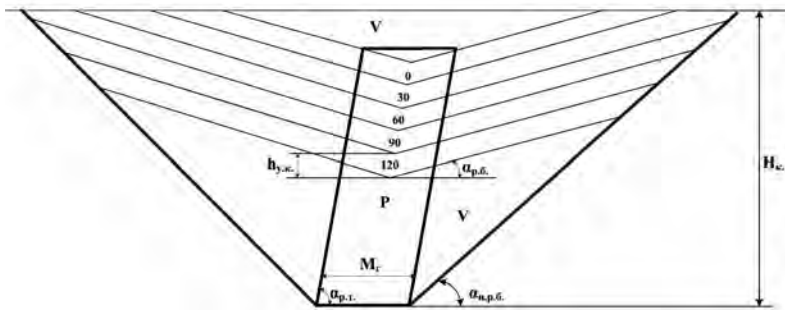


Рис. 2 Поперечний переріз родовища, яке відпрацьовується умовним кар'єром № 2

ня кар'єру, становить 560 м. На відміну від перших двох кар'єрів цей кар'єр, на даний час введений в експлуатацію. Умови відпрацювання кар'єру представлені на рис. 3.

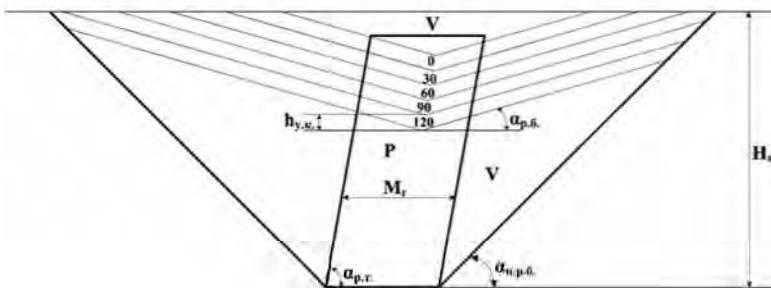


Рис. 3 Поперечний переріз родовища, яке відпрацьовується умовним кар'єром № 3

руди та розкритих порід з визначенням поточних коефіцієнтів розкриття. За результатами таких замірів та розрахунків складаються відповідні таблиці. Враховуючи те, що середньорічне пониження гірничих робіт на залізородних кар'єрах складає 10 м, то тривалість кожного періоду

Умовний кар'єр № 2 відпрацьовує рудний поклад, у якого: кут падіння становить 80° ; горизонтальна потужність – 120 м; протяжність – 4500 м. Параметри цього кар'єру наступні: кут робочого борта – 16° ; кут неробочого борта – 45° ; проектна глибина відпрацювання – 345 м (рис. 2). На рис. 2 наведені позначення аналогічні позначенням, які наведено на рис. 1. На відміну від стану гірничих робіт першого умовного кар'єру відпрацювання кар'єру № 2 відбувається з розвитком гірничих робіт, як в горизонтальному напрямку, так і в глибину. Тобто ці два умовні кар'єри вже мають тривалий термін експлуатації.

Умовний кар'єр № 3 відпрацьовує рудний поклад, у якого: кут падіння становить 80° ; горизонтальна потужність – 230 м; протяжність – 3200 м; кінцева глибина відпрацювання

На представлених рисунках цифрами 0, 30, 60, 90, 120 позначені етапи пониження гірничих робіт. Положення робочого борту кар'єру на етапі «0» характеризує поточний стан гірничих робіт в кар'єрі і слугує вихідним положенням для подальших досліджень. На кожному етапі розвитку гірничих робіт виконуються заміри обсягів

ду роботи кар'єрів буде складати три роки. Якщо у кожного кар'єру різні умови розробки родовища, то відповідно будуть розрізнятися і техніко-економічні показники їх роботи, які наведено в табл. 1 та прийнято для подальших розрахунків.

Таблиця 1

Техніко-економічні показники роботи умовних кар'єрів

Показники	Кар'єр № 1	Кар'єр № 2	Кар'єр № 3
Обсяг видобутку руди, млн. т/рік	31,3	18,3	24,4
Вихід концентрату, частка од.	0,42	0,37	0,39
Обсяг виробництва концентрату, млн. т/рік	13,15	6,78	9,5
Загальний обсяг виробництва концентрату, млн. т/рік	29,43		
Собівартість видобутку руди (без затрат на розкриття), грн./т	25	13	15
Собівартість виймання розкривних порід, грн./м ³	50	35	40

За результатами замірів та виконаних на їх основі розрахунків поточних коефіцієнтів розкриття будемо графік зміни цих коефіцієнтів за етапами пониження гірничих робіт умовних кар'єрів. Ця зміна представлена на рис. 4.

На основі значень поточних коефіцієнтів розкриття та прийнятих вихідних даних, які наведено в табл. 1, було виконано розрахунки повної собівартості видобутку однієї тонни руди за періодами роботи умовних кар'єрів (табл. 2). За розрахунковими даними побудовано графік зміни повної собівартості видобутку однієї тонни руди при пониженні гірничих робіт у кар'єрах. Ця залежність представлена на рис. 5.

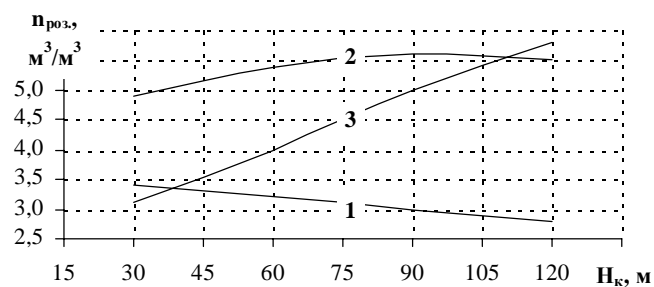


Рис. 4 Залежність поточних коефіцієнтів розкриття від збільшення глибини відпрацювання умовних кар'єрів: 1 – кар'єр № 1; 2 – кар'єр № 2; 3 – кар'єр № 3

Таблиця 2

Повна собівартість видобутку руди за періодами експлуатації кар'єрів, грн./т

Кар'єр	Періоди			
	I	II	III	IV
Кар'єр № 1	76,0	73,0	69,5	67,0
Кар'єр № 2	64,1	69,7	71,8	70,8
Кар'єр № 3	51,8	63,0	74,6	84,6

У вище наведеному було розглянуто роботу та отримано техніко-економічні показники кожного кар'єру окремо.

Оптимізація роботи групи кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату виконується в умовах потреби ринку збуту в залізородній товарній продукції. В даному випадку прийнято те, що на ринок збуту постачається такий вид товарної продукції, як концентрат. Попит в концентраті на ринку збуту становить 25,0 млн. т. З табл. 1 видно, що при роботі трьох кар'єрів обсяг виробництва концентрату становить близько 30,0 млн. т. Необхідно відмітити, що для задоволення попиту на ринку збуту повинна виконуватися наступна умова, млн. т/рік

$$A_k^{P3} = \sum_{i=1}^n A_{k,i}$$

де – A_k^{P3} – обсяг попиту концентрату на ринку збуту, млн. т/рік; $A_{k,i}$ – обсяг виробництва концентрату i -тим кар'єром, млн. т/рік.

Досвід роботи гірничих підприємств з відкритим способом розробки родовищ показує, що завжди прагнуть видобувати корисну копалину з міні-

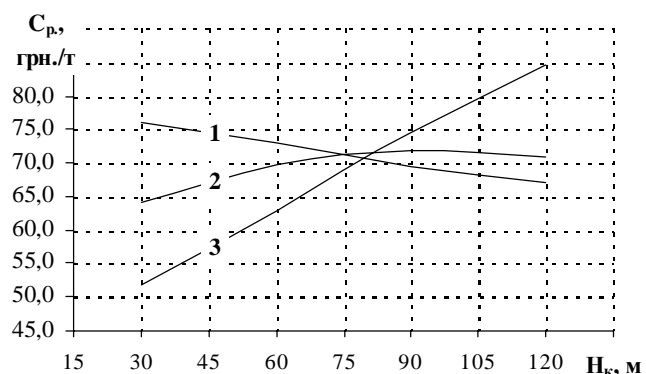


Рис. 5 Залежність повної собівартості видобутку однієї тонни руди від глибини відпрацювання умовних кар'єрів: 1 – кар'єр № 1; 2 – кар'єр № 2; 3 – кар'єр № 3

мальним коефіцієнтом розкриву. Тому, в першу чергу виконаємо оптимізацію групи кар'єрів за критерієм мінімального поточного коефіцієнту розкриву. Базуючись на отриманій залежності (рис. 4) визначимо пріоритетність роботи (виробництво концентру) кожного кар'єру у розглянутих етапах їх роботи. Вочевидь, що перший за пріоритетністю кар'єр буде працювати з повною виробничою потужністю за виробництвом концентрату. Для другого за пріоритетністю кар'єру обсяг виробництва концентрату буде становити, млн. т/рік

$$A_k^{2\Pi} = A_k^{P3} - A_k^{1\Pi}, \quad (1)$$

де $A_k^{2\Pi}$ – обсяг виробництва концентрату другого за пріоритетом кар'єру, млн. т/рік; $A_k^{1\Pi}$ – обсяг виробництва концентрату першого за пріоритетом кар'єру, млн. т/рік.

Обсяг виробництва концентрату третього за пріоритетністю кар'єру ($A_k^{3\Pi}$) буде становити, млн. т/рік

$$A_k^{3\Pi} = A_k^{P3} - A_k^{1\Pi} - A_k^{2\Pi}. \quad (2)$$

Відповідно до визначеної пріоритетності роботи кар'єрів встановлюється виробнича потужність кожного кар'єру за видобутком руди ($A_{p,i}$), яка визначається як, млн. т/рік

$$A_{p,i} = \frac{A_{k,i}}{g_{k,i}}. \quad (3)$$

Розподіл продуктивності кар'єрів за видобутком руди, яка визначена за критерієм мінімального поточного коефіцієнту розкриву наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Продуктивність кар'єрів за розподілом пріоритетності, млн. т/рік

Період	Кар'єр № 1	Кар'єр № 2	Кар'єр № 3
I	31,3	6,4	24,4
II	31,3	6,4	24,4
III	31,3	6,4	24,4
IV	31,3	18,3	13,0

Також однією із умов ефективної роботи гірничорудних підприємств є досягнення мінімальних затрат на видобуток руди. Визначення пріоритетності роботи кар'єрів в цьому випадку виконується за аналогією з мінімальним поточним коефіцієнтом розкриву, але за залежністю, яку наведено на рис. 5. Тобто першим кар'єром, який буде працювати з максимальною продуктивністю по руді буде той, у якого найменші затрати на видобуток однієї тонни руди. Останнім буде видобувати руду кар'єр той, у якого найбільша повна собівартість видобутку однієї тонни руди і лише в тому випадку, якщо виникає нестача в обсягах попиту товарної продукції. Обсяги виробництва товарної продукції та продуктивність за рудою визначаються за формулами (1-3). Розподіл продуктивності кар'єрів за видобутком руди, яку визначено за критерієм мінімальної повної собівартості видобутку руди наведено в табл. 4.

Таблиця 4

Продуктивність кар'єрів за розподілом пріоритетності, млн. т/рік

Період	Кар'єр № 1	Кар'єр № 2	Кар'єр № 3
I	20,8	18,3	24,4
II	20,8	18,3	24,4
III	31,3	18,3	13,0
IV	31,3	18,3	13,0

За даними табл. 3 та 4 видно, що пріоритетність роботи кар'єрів є різною. Як в першому так і в другому випадку оптимізації роботи групи кар'єрів собівартість видобутку однієї тони руди в цілому по комбінату ($C_p^{ГЗК}$) буде визначатися наступним чином, грн./т

$$C_p^{ГЗК} = \frac{\sum_{i=1}^n A_{p,i} \times c_{p,i}}{\sum_{i=1}^n A_{p,i}},$$

де $c_{p,i}$ – собівартість видобутку однієї тони руди i -го кар'єру з урахуванням затрат на виконання розкривних робіт, грн./т.

Зміна собівартість видобутку однієї тони руди в цілому по комбінату за обома розглянутими критеріями наведено на рис. 6.

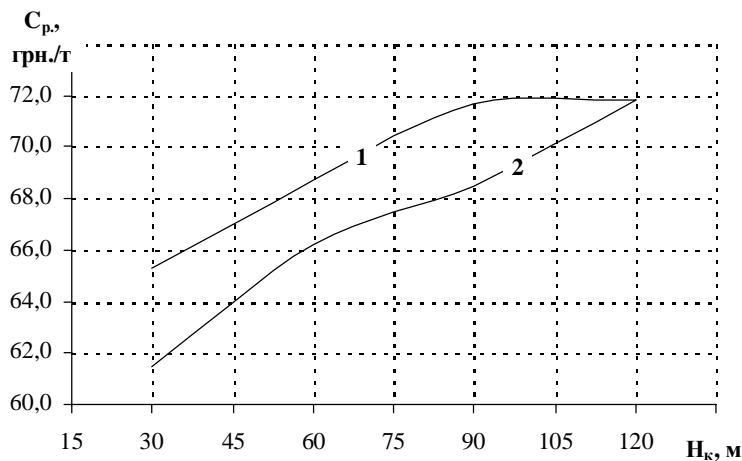


Рис. 6 Графік залежності собівартості видобутку однієї тони руди в цілому по гірничо-збагачувальному комбінату від приросту глибини відпрацювання умовних кар'єрів: 1 – по критерію мінімального коефіцієнту розкриття; 2 – по критерію мінімальної повної собівартості видобутку руди

В подальшому необхідно виконати дослідження оптимізації виробничої потужності кар'єрів з урахуванням екологічних аспектів їх роботи.

Список літератури

1. **Бизов В.Ф.** Обґрунтування технологічних параметрів і показників для оптимізації розвитку гірничих робіт на кар'єрах / В.Ф.Бизов, В.М.Коробко // Проблемы комплексного освоения недр.: Сборник научных трудов. – Днепропетровск: НГАУ. – 2002. – т. 2. – № 14. – С.104-109.
2. **Блізнюков В.Г.** Гірничо-геологічні фактори рентабельності гірничовидобувних підприємств / В.Г.Блізнюков, В.О.Півень, О.В.Плотніков // Проблемы научного обеспечения горнопромышленного комплекса Украины на пороге XXI века.: Сборник научных трудов Государственного научно-исследовательского горнорудного института. – Кривой Рог. – 2001. – С.116-119.
3. **Завсєгдашний В.О.** Система економіко-статистичного аналізу прогнозування показників гірничодобувних підприємств / В.О.Завсєгдашний // Відомості Академії гірничих наук України. – Кривий Ріг.: Мінерал. – 1997. – вип. 2. – С.6-7.
4. **Завсєгдашний В.А.** Экономико-математическая модель горнодобывающего предприятия / В.А.Завсєгдашний, Н.И.Часнык // Разработка рудных месторождений : Респ. межведом. научн.-техн. сборник. – Киев.: Техника. – 1994. – Вып. 55. – С.26–34.
5. **Арсєтьєв А.И.** Производительность карьеров – Москва.: Издательство Санкт-Петербургский горный институт. 2002. – 85 с.
6. **Нормы технологического проектирования горнодобывающих предприятий черной металлургии с открытым способом разработки.** – Ленинград: –Гипроруда, 1986. – 264 с.
7. **Нормы технологического проектирования горнорудных предприятий с открытым способом разработки месторождений полезных ископаемых. Горные работы. Ликвидация горнодобывающих предприятий. Техно-экономическая оценка и показатели.** СОУ-Н МПП 73.020-078-1:2007. Киев. Министерство промышленной политики Украины. – 224 с.
8. **Ржевский В.В.** Открытые горные работы Часть 2. Технология и комплексная механизация: Учебн. для вузов – 4-е изд. перераб. и дополн. – Москва.: Недра. 1985. – 549 с.
9. **Новожилов М.Г., Дриженко А.Ю., Маевский А.М.** Высокопроизводительные глубокие карьеры – Москва.: Недра. – 1984. – 188 с.
10. **Реєтович Э.И.** Установление производственной мощности карьеров / Э.И.Реєтович // Теория и практика открытых разработок. – М. – 1973. – № 7-8. – С.73-91.
11. **Шпанский О.В.** Совершенствование методов проектирования производственной мощности карьеров по полезному ископаемому и горной массе / О.В.Шпанский, Д.Н.Лигоцкий, И.А.Ишкулова [и др.] // Известия вузов. Горный журнал. – 2005. – № 4. – С.9-17.

Висновки та напрямок подальших досліджень. За результатами роботи отримано техніко-економічні показники роботи кожного кар'єру окремо. Виконано оптимізацію роботи групи кар'єрів, що входять до складу ГЗК за наступними критеріями: за мінімальними коефіцієнтами розкриття по кожному кар'єру; за мінімальною повною собівартістю видобутку руди кожного кар'єру.

Затрати на видобуток однієї тони руди можуть бути знижені на 6 %, якщо оптимізацію роботи групи кар'єрів у системі ГЗК виконувати за критерієм мінімальної повної собівартості видобутку руди на кожному кар'єрі.

12. Холодняков Д.Г. Метод определения равномерного режима горных работ с помощью графика минимальных текущих объемов вскрыши / Д.Г.Холодняков // Горный информационно-аналитический бюллетень : Научно-технический журнал. – Москва. – 2011. – № 2. – С.212-217.

13. Ракишев Б.Р. Определение производительности группы карьеров при многих критериях / Б.Р.Ракишев, К.И.Есенберлин // Горный журнал. – М. 1989. – № 8. – С.18-20.

14. Полищук А.К., Полищук Г.К., Михайлов А.М. Разработка месторождений группой карьеров в системе комбината. – Москва.: Недра. – 1975. – 200 с.

Рукопис подано до редакції 19.03.2020

УДК 532.3:622.765.061

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., А.В. ПІКІЛЬНЯК, канд. техн. наук
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ГАЗОВИХ БУЛЬБАШОК У ПРОЦЕСІ ФЛОТАЦІЇ РУДНОЇ ПУЛЬПИ

Мета. Метою роботи є встановлення залежності зміни форми та граничної швидкості впливання бульбашки в залежності від чисел Рейнольдса, Мортонна і Бонда, від його початкової форми, співвідношення коефіцієнтів густини та в'язкості, залежності коефіцієнта опору від числа Рейнольдса.

Методи дослідження. У роботі використані: аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду, систематизація існуючих підходів і методів оптимізації управління процесом флотації залізної руди.

Наукова новизна. Установлено залежності зміни розмірів газової бульбашки з урахуванням зміни його форми, швидкості потоку, сили поверхневого натягу, густини й в'язкості середовища і фізичних властивостей його оболонки, що дозволяє з більшою точністю управляти газовою фазою у процесі флотації.

Практична значимість. Результати роботи використані при проектуванні та освоєнні технічного та алгоритмічного забезпечення систем автоматичного управління технологічним процесом флотації на гірничих підприємствах.

Результати. В результаті досліджень встановлено залежність швидкості впливання бульбашки від її діаметра для розчинів з різною в'язкістю, залежність швидкості впливання від часу для різних діаметрів бульбашок, побудовано карту режимів зміни форми бульбашки, залежність зміни граничної швидкості бульбашки від співвідношення коефіцієнтів густини рідини й бульбашки та в'язкості рідини. Основний вплив на зміну форми газової бульбашки здійснюють числа Рейнольдса і Бонда. Високі числа Рейнольдса можуть посилити деформацію форми бульбашки в вертикально-му напрямку за рахунок утворення мікропотоків рідини під бульбашкою. З іншого боку, число Бонда управляє деформацією бульбашки і його відхиленням від сферичної форми. Співвідношення коефіцієнтів густини впливає на зміну форми тільки при низьких значеннях і більш істотно впливає на швидкість спливання. Форма бульбашки і кінцева швидкість спливання в більшій мірі залежить від співвідношення коефіцієнтів в'язкості між бульбашкою і рідиною в режимі з низькою в'язкістю.

Ключові слова: флотація, діаметр газової бульбашки, газова фаза пульпи, зміна форми, розподіл за розміром.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-48-54

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Одним з найбільш поширених процесів поділу в збагачувальній промисловості і найбільш повною та універсальною операцією переробки мінеральної сировини є флотація. Кількість подрібненої руди, яка переробляється за допомогою флотації, становить близько 9 млрд т на рік, тому важливість флотаційної технології в глобальній економіці дуже велика. Оптимальна ступінь поділу мінералів в процесі флотації при зміні характеристик мінеральної сировини досягається шляхом управління кількістю повітря, що подається у флотаційну камеру, товщиною пінного шару і рівнем пульпи, а також продуктивністю мішалки. Для розуміння фізичних процесів, що визначають флотацію необхідні точні дані про параметри газової фази, з яких найбільш важливими є розмір і розподіл газових бульбашок за розміром. Ефективність процесу прямо пов'язаний із числом зіткнень між частками й бульбашками, які залежать від співвідношення їх розмірів. Розмір бульбашки газу визначає площа поверхні на якій взаємодіють тверді частки й бульбашки, яка вносить істотний вклад у гідродинаміку системи й загальну продуктивність флотації. Розмір одиничної бульбашки газу й розподіл газових бульбашок за розміром у камері сильно залежить від різних експлуатаційних, технічних і хімічних факторів, вплив яких слід ураховувати при проектуванні або моделюванні процесу флотації.

Враховуючи вищевикладене, щоб забезпечити оптимальні умови флотації необхідно, щоб розподіл газових бульбашок за розміром і розподіл часток твердої фази пульпи за крупністю відповідали один одному. В іншому випадку, якщо розміри бульбашок будуть значно більше розмірів часток, гідродинамічні потоки поблизу поверхні бульбашки будуть зносити частки й тим самим перешкоджати їхньому приєднанню до бульбашки, бульбашки ж значно менших розмірів не зможуть підняти гідрофобні частки руди до поверхні пульпи. Для вирішення поставленого завдання необхідно досліджувати можливість управляти параметрами газової фази пульпи, а саме концентрацією й розподілом бульбашок за розміром.

Аналіз досліджень і публікацій. Одним із серйозних факторів, що стримують розвиток систем автоматичного керування процесом флотації, є відсутність простої й зручної моделі даного процесу, що дозволяє одержувати точні кількісні результати. Існуючі моделі, як правило, носять феноменологічний характер і не враховують багато важливих параметрів, що спричиняють істотний вплив на процес (зокрема, це концентрація й розподіл газових бульбашок за розміром). У результаті з їхньою допомогою неможливо одержувати кількісні дані про ступінь впливу параметрів газової фази на вихідні параметри збагачувального процесу у всьому просторі керуючих, та обурюючих впливів [1,2]. У якості основної вимоги до автоматизованого керування процесом флотації є одержання заданої якості продуктів збагачення й можливість оперативного централізованого керування основними й допоміжними процесами й комплексом устаткування, що входять у технологічну схему [3]. У роботі [4] була розроблена математична модель, що імітує процес флотації в камерних машинах механічного типу, які найчастіше використовуються на вітчизняних і закордонних збагачувальних фабриках. У роботі [5] розглянуті математична й алгоритмічна сторони питання. Модель відбиває не тільки основні закономірності процесу флотації, але й такі особливості, як поліпшення збагачення великих часток в останніх камерах флотаційної машини, а також зменшення виходу концентрату в міру просування від першої камери до останньої. Однак питання керування параметрами газової фази не було враховано у повній мірі. Тому для кожного технологічного різновиду мінеральної сировини в процесі його збагачення флотацією, для отримання високих показників вилучення корисного компонента, необхідно сформулювати певний розподіл бульбашок газової фази пульпи за розміром, який повинен підтримуватися в усіх режимах роботи технологічного обладнання.

Динаміка бульбашок у рідині відіграє важливу роль у процесі флотації. Поведінка газової бульбашки в рідині може бути різною: супроводжуватися чисто сферичними пульсаціями, виникненням коливальних поверхні бульбашки й мікропотоків, бульбашки можуть взаємодіяти, з'єднуватися й дробитися на більш дрібні і т.д. Розглянемо рівняння для визначення динаміки сферичної бульбашки діаметром D у рідині під дією виштовхуючої сили, (залежність швидкості впливання бульбашки від часу $u(t)$) [6]

$$m \frac{d\vec{u}}{dt} = \sum_i \vec{F}_i, \quad (1)$$

де $m = (\pi D^3/6) \rho_g$ – маса бульбашки діаметром D і густиною газу ρ_g , \vec{u} – вектор швидкості бульбашки, \vec{F}_i – сили, що діють на бульбашку.

Діючі на бульбашку сили можна представити в наступному вигляді

$$F_g = - \rho D^3 r_g g / 6, \quad (2)$$

де F_g – сила ваги;

$$F_a = \rho D^3 r_p g / 6, \quad (3)$$

де F_a – сила Архімеда, ρ_p – густина рідини, V – об'єм бульбашки;

$$F_c = - C_D S \frac{\rho}{2} u^2, \quad (4)$$

де F_c – сила опору, $S = \pi D^2/4$ – площа міделевого перетину, C_D – безрозмірний коефіцієнт опору.

Для стоксовського режиму руху бульбашки ($Re \leq 1$) коефіцієнт опору дорівнює

$$C_D = 24/Re, \quad (5)$$

де $Re = r_p u D / m$ – число Рейнольдса, m – динамічна в'язкість рідини.

Враховуючи (5) і (4), силу опору можна представити в наступному вигляді

$$F_c = -3\mu D m_p. \quad (6)$$

Враховуючи (2), (3) і (6) для рівняння руху (1) можна одержати наступний вираз

$$\frac{\rho D^3}{6} r_p \times \frac{du}{dt} = -\frac{\rho D^3}{6} r_z g + \frac{\rho D^3}{6} r_p g - 3\mu D m_p. \quad (7)$$

Після перетворення, рівняння (7), може бути представлене в наступному вигляді

$$\frac{du}{dt} = g \frac{\alpha_p}{\epsilon r_z} - 1 \frac{\ddot{\phi}}{\phi} \frac{18m}{r_z D^2} u. \quad (8)$$

Швидкість стаціонарного впливання бульбашки для випадку $du/dt=0$ може бути представлена наступною формулою

$$u_0 = \frac{(r_p/r_z - 1) D^2 r_z}{18m_p} g = \frac{(r_p - r_z) D^2}{18m_p} g. \quad (9)$$

З (9) видно, що швидкість стаціонарного впливання бульбашки пропорційна квадрату її діаметру. Знайдемо максимальний діаметр бульбашки D_{max} , для якого виконується умова стоксовського режиму ($Re \ll 1$). Враховуючи (9), вираз для числа Рейнольдса може бути представлено в наступному вигляді

$$Re = \frac{r_p u D}{m_p} = \frac{r_p D}{m_p} \times \frac{(r_p - r_z) D^2}{18m_p} g = \frac{(r_p - r_z) D^3}{18m_p^2} g. \quad (10)$$

З рівняння (10), при $Re = 1$, D_{max} може бути отримано з наступної формули

$$D_{max} = \sqrt[3]{\frac{18m_p^2}{r_p (r_p - r_z) g}}. \quad (11)$$

Визначимо залежність швидкості впливання бульбашки від часу з рівняння (8) (рис. 1)

$$\frac{du}{dt} = g \frac{\alpha_p}{\epsilon r_z} - 1 \frac{\ddot{\phi}}{\phi} \frac{18m_p}{r_z D^2} u. \quad (12)$$

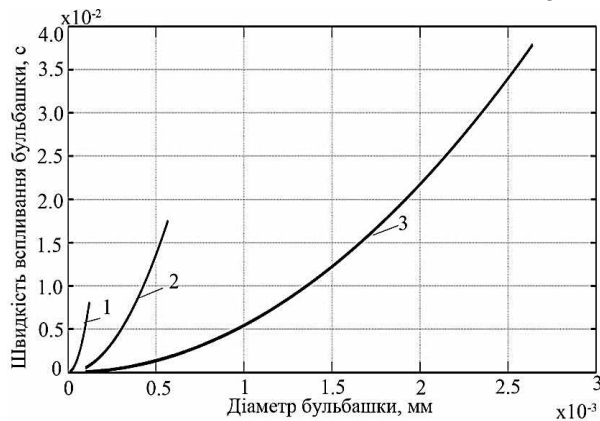


Рис. 1. Залежність швидкості впливання бульбашки u_0 від її діаметра D для розчинів з в'язкістю: 1 - $\mu = 10^{-3}$ Па·с; 2 - $\mu = 10^{-2}$ Па·с; 3 - $\mu = 10^{-1}$ Па·с

Із графіка видно, що зі збільшенням діаметра, швидкість впливання бульбашки збільшується квадратично, тому що графік являє собою гілку параболи спрямовану вгору. Приймемо $B = (r_p/r_z - 1)g$ і $A = 18m_p/r_z D^2$ й запишемо рівняння в наступному вигляді

$$\frac{du}{dt} = B - Au; Au - B = z;$$

$$dz = Adu; \frac{1}{A} \frac{dz}{dt} = -z; \frac{dz}{z} = -A dt. \quad (13)$$

Проінтегруємо обидві частини в межах від z до z_0 й за часом від 0 до t

$$\ln z \Big|_{z_0}^z = -At \Big|_0^t; \quad (14)$$

$$\ln z - \ln z_0 = -At. \quad (15)$$

Після перетворення, одержимо рівняння в наступному вигляді

$$\ln(z/z_0) = -At; \quad (16)$$

$$z/z_0 = \exp(-At). \quad (17)$$

У результаті перетворення одержимо рівняння залежності $z(t)$

$$z = z_0 = \exp(-At). \quad (18)$$

З початкових умов при $t=0$, $u=0$, знайдемо значення z_0 .

$$\frac{du}{dt} = Au - B = -z; z_0 = 0. \quad (19)$$

Повернемося до заміни й підставимо значення z

$$Au - B = -B \times \exp(-At); \quad (20)$$

$$u = \frac{B}{A} (1 - \exp(-At)). \quad (21)$$

З урахуванням значень A і B рівняння (19) може бути представлене в наступному вигляді

$$u = \frac{(r_p/r_z - 1)g}{18m_p/r_z D^2} \exp\left(-\frac{18m_p}{r_z D^2} t\right). \quad (22)$$

Приймемо $t \rightarrow \infty$, $u = u_0$. При $t \rightarrow \infty$, $\exp \rightarrow 0$, значить $u = B/A$. Перетворимо B/A

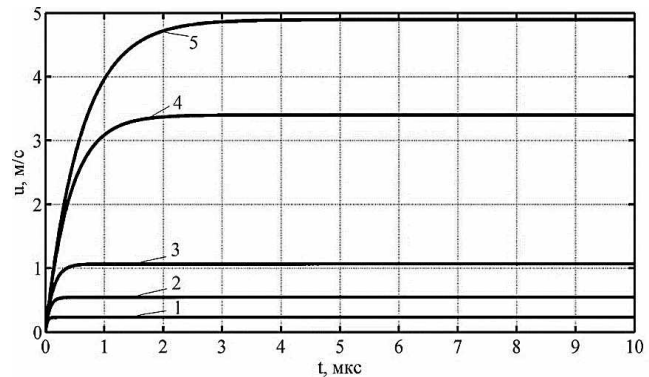
$$\frac{B}{A} = \frac{(r_p/r_z - 1)g}{18m_p/r_z} = \frac{(r_p - r_z)gD^2}{18m_p}; \quad (23)$$

$$u_0 = (r_p - r_z)gD^2/18m_p. \quad (24)$$

Враховуючи (22), (24) формулу (20) представимо в наступному вигляді (рис.2)

$$u = u_0 (1 - \exp\left(-\frac{18m_p}{r_z D^2} t\right)). \quad (25)$$

Рис. 2. Залежність швидкості вспливання u від часу t для різних діаметрів бульбашок: 1 – 0,65 мм; 2 – 1 мм; 3 – 1,4 мм; 4 – 2,0 мм; 5 – 2,5 мм для розчину з в'язкістю $\mu = 10^{-3}$ Па·с



Постановка задачі. За результатами аналізу наукових досліджень і публікацій встановлено, що чим більше радіус бульбашки, тим більше час досягнення граничної швидкості вспливання. У процесі вспливання в рідині під дією гравітаційної сили газова бульбашка може змінювати свою форму залежно від режиму в якому вона перебуває. У зв'язку з цим метою роботи є встановлення залежності зміни форми та граничної швидкості вспливання бульбашки в залежності від чисел Рейнольдса, Мортоні і Бонда, від його початкової форми, співвідношення коефіцієнтів густини та в'язкості, залежності коефіцієнта опору від числа Рейнольдса.

Викладення матеріалу та результати. Розглянемо основні режими зміни форми бульбашки: сферична, еліптична і сферична ковпакоподібна. Ці режими можуть бути досягнуті залежно від значень важливих безрозмірних величин: числа Бонда Bo , числа Мортоні Mo й числа Рейнольдса Re , які можуть бути представлені в наступному вигляді [7]

$$Bo = (r_p - r_z)gd_0^2/s; \quad (26)$$

$$Mo = (r_p - r_z)g\sigma_p^4/(s^3 r_p^2); \quad (27)$$

$$Re = r_p U_{zp} d_0 / \mu_p, \quad (28)$$

де d_0 – діаметр газової бульбашки, ρ_p – густина рідини, μ_p – в'язкість рідини, ρ_z – щільність газу, g – прискорення вільного падіння, σ – поверхневий натяг, U_{zp} – гранична швидкість бульбашки.

Число Бонда Bo виражає відношення об'ємних сил (ефективних гравітаційних сил) і поверхневого натягу, але також може розглядатися, як безрозмірна величина об'єму бульбашки [8]. Число Мортоні Mo описує властивості навколишньої рідини з основним акцентом на в'язкості й поверхневому натязі. Опишемо кожний із трьох основних режимів.

Сферичний режим. У цьому режимі переважають поверхневий натяг і сила в'язкого опору.

Як правило, початковий розмір бульбашки $\leq 1,3$ мм, форма – сферична, відношення малої осі до головної становить менш 10 %. У цьому режимі гранична швидкість впливання пропорційна розміру бульбашки й може бути представлена наступним виразом [9]

$$U_{\text{гп}} = \frac{gd_0^2 Dr (1 + m_p/m)}{6m_p (2 + 3m_p/m)} \quad (29)$$

Еліпсоїдальний режим. У цьому режимі переважає поверхневий натяг. Розмір бульбашки варіюється від 1,3 до 6 мм, а число Бонда перебуває в діапазоні $0,25 < Bo < 40$. Остаточна форма, як правило, сплюснена з опуклою поверхнею, без поздовжньої симетрії. Гранична швидкість може бути представлена наступним виразом [10]

$$U_{\text{гп}} = \sqrt{\frac{2.14s}{r_p d_0} + 0.505gd_0} \quad (30)$$

Сферичний ковпакоподібний режим: Цей режим регулюється силою інерції. Бульбашка має великий розмір ≥ 6 мм. $Bo > 40$, а $Re > 1,2$. У цьому режимі гранична швидкість впливання бульбашки пропорційна її розміру. Більша сила інерції створює більш високу деформацію шляхом створення високого тиску на передній і задній стінках бульбашки, у той час як низького на бічних стінках. Гранична швидкість може бути представлена наступним виразом [11]

$$U_{\text{гп}} = \frac{2}{3} \sqrt{\frac{gd}{2} \frac{Dr}{r_p}} \quad (31)$$

Спрогнозовані форми бульбашок у широкому діапазоні чисел Рейнольдса й Бонда представлені на рис. 3 [7]. У режимах з низькими числами Рейнольдса або Бонда ($Re < 1$ або $Bo < 1$) бульбашки зберігають сферичну форму в процесі впливання в рідині. При невеликому збільшенні числа Рейнольдса ($Re = 5$) форма бульбашки як і раніше залишається сферичною для низького числа Бонда, при якому поверхневий натяг вище. При більших числах Бонда нижня частина бульбашки стає плоскою або злегка з ямочками, зі збільшенням числа Рейнольдса ($5 < Re < 20$) або числа Бонда ($0,5 < Bo < 20$) бульбашки приймають еліптичну форму або форму сплюсненого еліпсоїда. При подальшому збільшенні числа Рейнольдса ($50 < Re < 100$) і числа Бонда ($20 < Bo < 100$) форма бульбашки змінюється від сильно деформованої еліптичної ковпакоподібної при низьких числах Рейнольдса до сферичної ковпакоподібної при більш високих числах Рейнольдса ($Re > 100$). Ковпакоподібні бульбашки утворюються при ($100 < Bo < 200$) і ($50 < Re < 200$). При збільшенні чисел Бонда й Рейнольдса в діапазоні $100 < Bo < 200$ і $100 < Re < 200$ спостерігається поява бульбашок тороїдальної форми. Розглянемо залежність зміни граничної швидкості впливання й форми бульбашки від співвідношення коефіцієнтів густини. Зміна граничної швидкості впливання бульбашки залежно від співвідношення густин показано на рис. 4а. З рисунка видно, що співвідношення

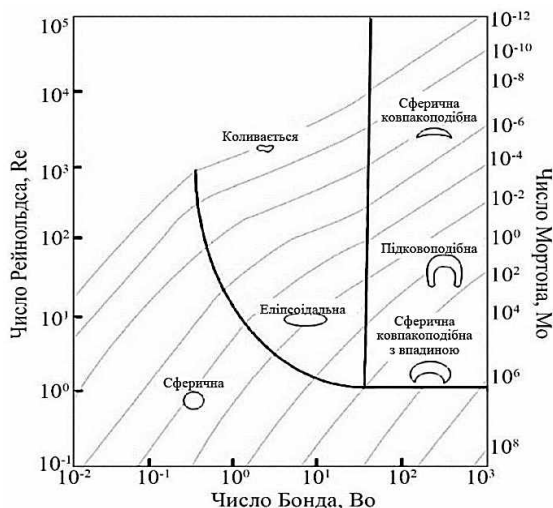


Рис. 3. Карта режимів зміни форми бульбашки

коефіцієнтів густини впливає на зміну форми тільки при низьких значеннях, при значенні > 50 воно чинить лише незначний вплив на остаточну форму й граничну швидкість впливання бульбашки, а вплив співвідношення коефіцієнтів густини на швидкість впливання більш суттєвий, ніж на зміну форми бульбашки.

Розглянемо залежність зміни граничної швидкості впливання й форми бульбашки від співвідношення коефіцієнтів в'язкості (рис. 4б). Відзначимо, що форма бульбашки й кінцева швидкість впливання більшою мірою залежить від співвідношення коефіцієнтів в'язкості між бульбашкою і рідиною в режимі з низькою в'язкістю. Вплив співвідношення коефіцієнтів в'яз-

кості на форму бульбашки більш значний, ніж на швидкість її вспливання. При зміні співвідношення коефіцієнтів в'язкості від 2 до 500 зміна швидкості вспливання бульбашки становить менш 10 %.

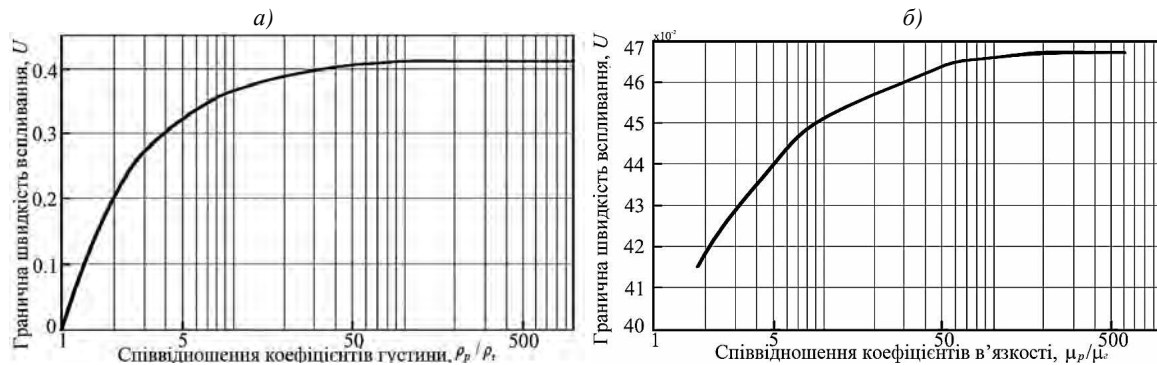


Рис. 4. Зміна граничної швидкості бульбашки від співвідношення коефіцієнтів: *a* – густини рідини й бульбашки: 1 – $\rho_p/\rho_r = 2$; 2 – $\rho_p/\rho_r = 5$; 3 – $\rho_p/\rho_r = 50$; 4 – $\rho_p/\rho_r = 100$ при $Bo = 120$; $Re = 14,6$; *б* – в'язкості: 1 – $\mu_p/\mu_r = 2$; 2 – $\mu_p/\mu_r = 5$; 3 – $\mu_p/\mu_r = 50$; 4 – $\mu_p/\mu_r = 100$ при $Bo = 116$; $Re = 8,75$; $\rho_p/\rho_r = 1000$

Висновки та напрямок подальших досліджень. Розглянуто залежності зміни форми і граничної швидкості спливання бульбашки в залежності від чисел Рейнольдса, Мортон і Бонда, від його початкової форми, співвідношень коефіцієнтів густини і в'язкості, залежності коефіцієнта опору від числа Рейнольдса. Основний вплив на зміну форми газової бульбашки здійснюють числа Рейнольдса і Бонда. Високі числа Рейнольдса можуть посилити деформацію форми бульбашки в вертикальному напрямку за рахунок утворення мікропотоків рідини під бульбашкою. З іншого боку, число Бонда управляє деформацією бульбашки і його відхиленням від сферичної форми. Високі числа Бонда дозволяють використовувати великі деформації. Співвідношення коефіцієнтів густини впливає на зміну форми тільки при низьких значеннях і більш істотно впливає на швидкість спливання. Форма бульбашки і кінцева швидкість спливання в більшій мірі залежить від співвідношення коефіцієнтів в'язкості між бульбашкою і рідиною в режимі з низькою в'язкістю. Вплив співвідношення коефіцієнтів в'язкості на форму бульбашки більш значний, ніж на швидкість його спливання. При зміні співвідношення коефіцієнтів в'язкості від 2 до 500 зміна швидкості спливання бульбашки становить менше 10%.

Список літератури

1. Nelson M. Hydrodynamic design of self-aerating flotation machines / M. Nelson, D. Lelinski. // Minerals Engineering. – 2000. – №13. – С. 991-998.
2. Gregory T.A. An advanced control system for fine coal flotation / T.A. Gregory, H.L. Gerald // Fourth quarterly technical progress report: technical report. – July 1 – September 30 1996, 1996.
3. Кильмник О.В. Метод автоматизації процесу флотації [Електронний ресурс] / О.В. Кильмник // Вестник Восточно-українського національного університету імені Володимира Даля: науч. журнал. – 2011. – № 3. – С. 157. – Режим доступу до журн.: <http://dspace.snu.edu.ua:8080/jspui/handle/123456789/1571>.
4. Погорелов О.А. Результаты испытаний имитационной модели флотації. [Електронний ресурс] / О.А. Погорелов // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2005. – Режим доступу до ресурсу: http://esteticamente.ru/portal/natural/vejpt/2005_2_2/EEJET_2_2_2005_88-91.pdf.
5. Погорелов О.А. Имитационная модель процесса фло-тации / О.А. Погорелов. // Математичне моделювання. – 2004. – №1. – С. 56-60.
6. Усанина А.С. Динамика и устойчивость формы капель и пузырьков при течении вязкой жидкости: дис. канд. физ.-мат. наук : 01.02.05 / А.С. Усанина ; Томский государственный уни-верситет. – Томск, 2011. – 158 с.
7. Clift R. Bubbles, drops, and particles / R. Clift, J. R. Grace, M. Weber. – New York: Academic Press, 1978. – 394 с.
8. Kurtoglu I.O. Lattice Boltzmann study of bubble dynamics. Numer Heat Transfer, Part B/ I.O. Kurtoglu, C-L Lin // An interna-tional journal of computation and methodology. – 2006. – vol.50(4):333–351.
9. Hadamard J.S. Mouvement permanent lent d'une sphre liquide et visqueuse dans une liquide visqueuse / J.S. Hadamard // Acad Sci. –1911. – vol.152. –№25. – P.1735-1738.
10. Mendelson H.D. The prediction of bubble terminal veloci-ties from wave theory // H.D. Mendelson // AIChE J. – 1967. – №13. – P. 250-252.
11. Davies R.M. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids in tube / R.M. Davies, G.I. Sir Taylor. // Proc. R. SOC. Lond. – 1950. – №200. – С. 375-390.

Рукопис подано до редакції 16.03.2020

А. А. АЗАРЯН, д-р техн. наук, проф., А. А. ТРАЧУК, канд. техн. наук, доц.,
Д. В. ШВЕЦ, ст. преподаватель
Криворожский национальный университет

ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗАТОРА ПРОБ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ КОНТРОЛЯ СОДЕРЖАНИЯ ПОЛЕЗНОГО КОМПОНЕНТА В УСЛОВИЯХ ГОРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Цель. Разработка устройства, обеспечивающего точность определения содержания железа общего на уровне химического анализа, при этом доступного и простого в эксплуатации. Вес материала анализируемых разрабатываемым устройством экспрессного контроля проб не должен превышать 100г.

Метод. Для контроля содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки предлагается использовать гамма-гамма метод.

Научная новизна. Предложено устройство, точность измерений которого сопоставима с методом химического анализа, позволяющее снизить временные затраты на проведение анализа содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки.

Практическая значимость. Для определения содержания железа общего в рудах и продуктах их переработки на большинстве горнообогатительных комбинатов и шахт Украины используется метод химического анализа. Временные затраты на подготовку проб к химическому анализу и сам анализ составляют, в зависимости от вида сырья, от 0,8 до 2,5 часов. Такое запаздывание в получении информации о качестве руды или продуктов ее переработки не позволяет оперативно управлять процессом переработки сырья с целью его оптимизации, что в результате снижает эффективность работы горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. Предлагаемый экспресс-анализатор позволяет уменьшить временные затраты на проведение анализа содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки.

Результаты. Проведенные исследования показали, что разработанный экспресс-анализатор содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки обеспечивает точность результатов анализов, не уступающую химическому методу. При этом затраты времени при использовании предложенного экспресс-анализатора на 1,5-2,0 часа меньше, чем на проведение химического анализа. Результаты экспериментальной работы подтвердили, что экспресс-анализатор проб пригоден для определения содержания железа в концентратах влажностью 9...12% без сушки материала проб, что позволяет сократить время получения результатов анализов еще примерно на 1 час.

Ключевые слова: железорудное сырье, гамма-гамма метод, экспресс-анализатор, оперативный контроль.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-54-58

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. На большинстве ГОКов и железорудных шахт Украины для определения содержания железа общего в рудах и продуктах их переработки используется химический метод. Затраты времени на подготовку проб к химическому анализу и сам анализ составляют, в зависимости от вида сырья, от 0,8 до 2,5 часов. Такое запаздывание в получении информации о качестве руды или продуктов ее переработки не позволяет оперативно управлять процессом переработки сырья с целью его оптимизации, что в результате снижает эффективность работы горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. Следовательно, проблема экспресс-анализа минерального сырья с минимизацией цикла измерения является актуальной задачей.

Анализ исследований и публикаций. Анализ информации о положении дел с контролем качества сырья в мировой практике показывает, что достаточно широко используются экспрессные методы контроля, базирующиеся на физических методах, преимущественно радиометрических [1-3]. Как правило, используемые методы заключаются в облучении исследуемых проб источниками высокоэнергетического излучения и последующей регистрацией рассеянных частиц [4-10]. Перечень этих методов и средств их реализации довольно полно приведен в работе [11]. Однако стоимость этих средств на мировом рынке, требования к условиям их эксплуатации и к квалификации обслуживающего персонала довольно высоки. Это является существенными факторами, сдерживающими применение средств экспрессного контроля качества сырья на предприятиях Украины. При этом в Украине уже имеется опыт разработки и изготовления относительно дешевых и простых в эксплуатации устройств экспрессного определения содержания железа в рудах и продуктах их переработки. Например, радиометрические устройства типа ПАКС, разработанные проблемно-отраслевой лабораторией контроля и управления качеством минерального сырья при Криворожском национальном университете, эксплуатируются на

всех железорудных шахтах Украины с 1995г [12]. Физическая основа принципа работы этих устройств в основном близка к устройствам типа РСР, разработанным в 80-ые годы [13]. Использование подобных мобильных устройств позволяет сократить время анализа одной пробы до 1,9 ч. по сравнению с химическим методом. Массовому использованию подобных мобильных устройств препятствует ограниченная точность результатов контроля. Например, для шахт Кривбасса расхождения между результатами мобильных анализаторов содержания железа в пробах аглоруды и данными химических анализов составляют более одного процента, что не всегда удовлетворяет требованиям потребителей [14].

Постановка задания. Задача, поставленная перед разработчиками, заключалась в создании устройства, обеспечивающего точность определения содержания железа общего на уровне химического анализа, при этом относительно недорогого и простого в эксплуатации. Вес материала анализируемых разрабатываемым устройством экспрессного контроля проб не должен превышать 100г. Поставленное требование обусловлено необходимостью использовать существующее на горнорудных предприятиях оборудование для подготовки проб.

Изложение материала и результаты. В соответствии с поставленной задачей, проблемно-отраслевой лабораторией контроля и управления качеством минерального сырья при Криворожском национальном университете разработан экспресс-анализатор. Устройство предназначено для экспрессного определения содержания железа в пробах руд и продуктах их переработки гамма-гамма методом. Допустимая крупность материала проб – до 1мм.

Основное отличие данного устройства от устройств типа ПАКС заключается в конструкции блока датчика. Оно позволило использовать один источник гамма-излучения вместо нескольких, что существенно снизило стоимость устройства в целом. В то же время, в новом устройстве в качестве верхнего уровня может использоваться радиометр типа ПАКС с его пультом управления и детектором. Кроме того, для приема, обработки, хранения и визуализации результатов измерения можно использовать персональные компьютеры. Вариант пульта имеет большие возможности по обработке, хранению, отображению данных контроля. В шахтных условиях использование пульта управления на основе ПАКС целесообразнее, т.к. он более устойчив к воздействию внешних негативных факторов (запыленность, влажность, диапазон температур) и может успешно эксплуатироваться в агрессивных условиях.

Разработке нового устройства-анализатора предшествовали разработки различных методик подготовки материала проб к контролю и разработка новой конструкции кюветы для материала проб. Новой методикой предусмотрено прессование материала пробы давлением заданной силы, что обеспечило постоянство плотности материала пробы по объему кюветы. Новые методика подготовки пробы и конструкция кюветы позволили отказаться от необходимости использования нескольких источников излучения, сократить более чем в 10 раз вес материала пробы и довести его до 70г, улучшить воспроизводимость результатов измерений, снизить погрешности определения содержания железа. Как правило, воспроизводимость результатов измерений содержания железа устройствами РСР находится в пределах до 0,5%, в зависимости от диапазона содержания железа [13], а для созданного устройства-анализатора это значение не выходит за пределы 0,2% во всем диапазоне содержания железа.

Разработанные экспресс-анализаторы с 2006г. эксплуатируются на предприятиях Кривбасса. Они нашли свое применение на ОАО ЦГОК для экспрессного определения содержания железа общего в концентрате секций обогащения, а также на карьере "Северный" завода им. Ильича - для формирования объемов товарной руды заданного качества и определения содержания железа в отгружаемой продукции, а также на рудообогатительных фабриках и на ШУ ПАО «АрселорМиттал Кривой Рог».

Использование экспресс-анализатора на карьере "Северный" позволило отказаться от проведения химических анализов. Наблюдения, проведенные при вводе устройства в эксплуатацию, показали, что среднеарифметическая величина расхождения между данными химических анализов проб и анализов описываемого устройства составила 0,194% абс., величина стандартного расхождения – 0,162. Эпизодические проверки работы устройства повторным химическим анализом проб показали, что расхождения данных в содержании железа не выходят за пределы $\pm 0,4\%$ абс.

На ОАО ЦГОК при такой же величине среднестатистического расхождения между данными химического анализа и показаниями анализатора имеются единичные случаи, когда значения

расхождений достигают 1% и более. Предположительно, одна из причин этого - нарушение методики подготовки проб к контролю на экспресс-анализаторе, а именно – различия во влажности проб. При этом нельзя исключить и погрешности результатов химического анализа. Последнее предположение базируется на том, что градуировки экспресс-анализатора приходится производить достаточно часто. При градуировках используются, преимущественно, дубликаты проб химических лабораторий тех предприятий, на которых предполагается использовать экспресс-анализатор. В процессе градуировки нередко возникали сомнения в достоверности данных химического анализа. Данные пробы отправлялись на повторный химический анализ, и в практике использования экспресс-анализатора не было случаев, чтобы подозрения, базирующиеся на результатах измерения содержания железа устройством, подтвердились, причем, иногда проведением даже 3-го или 4-го химического анализа. Для подтверждения сказанного, на рис.1 приведены данные первичных и повторных химических анализов одних и тех же проб и указано расхождение между данными первичного и повторных анализов. При этом отметим, что анализируемые пробы принадлежали двум предприятиям, имеющим свои химические лаборатории.

Причины столь высоких расхождений ($\Delta \gg 0,5\%$ допустимых для химических анализов) в данных химических анализов одних и тех же проб остаются неизвестными и их выяснение требует проведения дополнительных наблюдений. Если эти замеры отнести к случайным "выбросам", то настораживает большая вероятность (13%) этих "выбросов". Таким образом, в некоторых случаях причиной значительных расхождений в данных анализов проб устройством и химическим методом может служить недостоверность химических анализов.

Результаты первичных и повторных химических анализов железорудных проб приведены на рис.1.

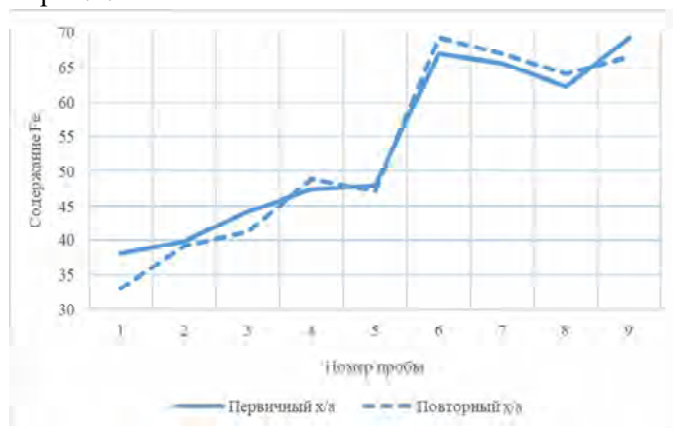


Рис. 1. Данные первичных и повторных химических анализов железорудных проб

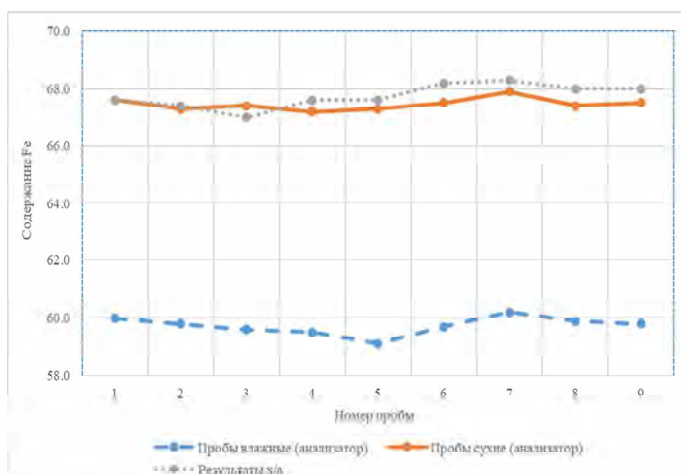


Рис. 2. Сравнение результатов анализов влажных и сухих проб при помощи экспресс-анализатора и результатов химического анализа

Использование нового экспресс-анализатора проб в условиях ЦГОК позволило примерно на час сократить время получения информации о качестве концентрата и, как следствие, иметь возможность более оперативно корректировать процесс обогащения при необходимости в этом. Однако, и в этом случае, время между отбором пробы и получением данных экспресс-анализа составляет почти час, причем основные затраты времени идут на сушку материала проб. Чтобы еще более сократить это время, была предпринята попытка использовать анализатор проб, проградуированный по сухим пробам, для анализа проб концентрата без их сушки, т.е. влажности 9...12%. В процессе экспериментов измерялась влажность проб, фиксировались значения содержания железа по показаниям анализатора проб, интенсивности рассеянного излучения влажных и высушенных проб, определялось содержание железа химическим методом, прогнозировались значения показаний анализатора проб после введения коррекции на влажность проб. Результаты отображены на рис. 2.

Результаты анализа показали, что при изменении влажности проб концентрата в пределах 9,6–12%, устройство показывает занижение содержания

железа в среднем на 7,72%, а диапазон занижений составляет 7,5-8,2%. С учетом средней величины занижений спрогнозированы показания экспресс-анализатора при вводе поправки на влажность или градуировке устройства по влажным пробам, которые приведены в столбце 9 табл. 1. Сравнение значений столбца 9 с данными химического анализа (столбец 8) одних и тех же проб показало, что средняя величина расхождений составляет 0,44%, а при анализе сухих проб – 0,38%, т.е. величины примерно равные. Безусловно, из-за ограниченного числа измерений делать утверждающие выводы о возможности использования анализатора для контроля содержания железа во влажных пробах концентрата преждевременно. Но стабильность величины занижений содержания во влажных пробах дает основания предположить, что при соответствующей градуировке устройства и доработке методики подготовки проб к контролю можно ожидать положительные результаты и при контроле влажных проб.

Таблица 1

Сравнение результатов анализов влажных и сухих проб при помощи экспресс-анализатора и результатов химического анализа

N, п/п	Влажность, %	Показания анализатора				$q_2 - q_1, \%$	$q_3, \text{Fe}, \% \text{ x/a}$	$q, \text{Fe}, \% \text{ коррек.}$
		Пробы влажные		Пробы сухие				
		$q_1, \text{Fe}, \%$	$N_1, \text{имп/с}$	$q_2, \text{Fe}, \%$	$N_2, \text{имп/с}$			
1	10	60.0	38970	67.6	36265	7.6	67.6	67.7
2	12	59.8	39033	67.3	36356	7.5	67.4	67.5
3	10	59.6	39091	67.4	36348	7.8	67.0	67.3
4	9.9	59.5	39200	67.2	36426	7.7	67.6	67.2
5	9.9	59.1	39370	67.3	36323	8.2	67.6	66.8
6	9.9	59.7	39012	67.5	36257	7.8	68.2	67.4
7	9.6	60.2	38568	67.9	35986	7.7	68.3	67.9
8	9.7	59.9	38746	67.4	36152	7.5	68.0	67.6
9	9.9	59.8	38789	67.5	36100	7.7	68.0	67.5
Ср. знач.	10.1	59,73		67.45		7.72	67.7	67.5

Анализируя результаты экспериментов, приведенные в табл. 1, нельзя не обратить внимание на некоторое противоречие, а именно в диапазоне изменения влажности от 9,6% до 12% величина поправки на влажность практически постоянна и не зависит от влажности материала проб, в то же время при изменении влажности от 0 до 9% поправка на влажность возрастает до 7,72%, т.е. в среднем увеличение влажности на 1% приводит к занижению содержания железа примерно на 0,8%. Это противоречие устраняется, если предположить, что зависимость величины поправки от влажности носит инверсионный характер, и зона инверсии находится в области 9...12% влажности. Данное предположение находит подтверждение в работе [15], где доказана инверсионность зависимости величины поправки от влажности материала проб. То, что в представленных исследованиях и данных работы [15] не совпадают по величине влажности значения зон инверсии (9...12% и 4...7% соответственно) объясняется различием крупности материала проб (-1мм и -5мм соответственно).

Выводы и направления дальнейших исследований. Подводя итог, можно отметить, что экспресс-анализаторы проб положительно зарекомендовали себя в работе при определении содержания железа общего в сухих порошковых пробах:

точность результатов анализов не уступает химическому методу;

затраты времени при использовании предложенного экспресс-анализатора на 1,5 – 2,0 часа меньше, чем на проведение химического анализа;

результаты экспериментальной работы подтвердили, что экспресс-анализатор проб пригоден для определения содержания железа в концентратах влажностью 9...12% без сушки материала проб, что позволяет сократить время получения результата анализов еще примерно на 1 час.

Список литературы

1. 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.
2. **Azaryan A.** Use of Bourger-Lambert-Bera law for the operative control and quality management of mineral raw materials / **A. Azaryan, V. Azaryan** // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 1. – P. 4–9. – URL: <https://bit.ly/39L1yFZ>.

3. **Azaryan A.** Research of influence single crystal thickness NaI (TL) on the intensity of the integrated flux of scattered gamma radiation / **A. Azaryan** // Metallurgical and Mining Industry. – 2015. – № 2. – P. 43–46. – URL: <https://bit.ly/2UMMbbQ>.
4. 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.
5. XRD, internal field-NMR and Mössbauer spectroscopy study of composition, structure and magnetic properties of iron oxide phases in iron ores / **M. Manjunatha, R. Kumar, A. Anupama [et al.]** // Journal of Materials Research and Technology. – 2019. – Vol. 8, issue 2. – P. 2192–2200. – DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.01.022.
6. Experimental and simulated study of detector collimation for a portable 3"×3" NaI(Tl) detector system for in-situ measurements / **K. U. Kiran, K. Ravindraswami, K. M. Eshwarappa, H. M. Somashekarappa** // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. – 2015. – Vol. 8, issue 4. – P. 597–605. – DOI: 10.1016/j.jrras.2015.07.006.
7. **Makek M.** Scintillator Pixel Detectors for Measurement of Compton Scattering / **M. Makek, D. Bosnar, L. Pavelić** // Condensed Matter. – 2019. – Vol. 4, issue 1. – P. 24. – DOI: 10.3390/condmat4010024.
8. **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. – URL: <https://bit.ly/2Xf1Vpx>.
9. Mössbauer forward scattering spectra of ferromagnets in radio-frequency magnetic field / **A. Y. Dzyublik, E. K. Sadykov, G. I. Petrov, V. V. Arinin [et al.]** // Yaderna fizyka ta enerhetyka. – 2013. – Vol. 13, issue 1. – P. 73–82. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/yadf_2013_13_1_12.
10. 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.
11. **Трачук А. А.** Состояние проблемы оперативного контроля качества минерального сырья / **А. А. Трачук, В. А. Азарян** // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 1999. – С. 63–73.
12. Пат. № 38216А Україна МПК G01V 5/00. Пристрій автоматичного контролю вмісту корисного компоненту в мінеральній сировині / **А. А. Азарян, А. А. Трачук** ; заявник Криворізький технічний університет. – № 2000063325 ; заявл. 07.06.2000 ; опубл. 15.05.01, Бюл. № 4. – 4 с.
13. Методическое руководство по опробованию железных руд Кривбасса и КМА гамма-гамма-методом аппаратурой РСР / ВАОГЕМ. – Белгород, 1975. – 74 с.
14. **Бызов В. Ф.** Проблемы контроля и управления качеством минерального сырья и пути их решения / **В. Ф. Бызов, А. А. Азарян** // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2002. – С. 9–13.
15. **Василенко В. Е.** Исследование влияния влажности на точность контроля качества железорудного сырья гамма-гамма методом / **В. Е. Василенко** // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. – Кривой Рог, 2002. – С. 230–237.

Рукопись поступила в редакцию 24.03.2020

УДК 622.274.3:622.224

С.В. ПИСЬМЕННИЙ, канд.техн.наук
Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ СТІЙКОСТІ ОЧИСНИХ КАМЕР ПРИ СЕЛЕКТИВНІЙ РОЗРОБЦІ СКЛАДНОСТРУКТУРНИХ РУДНИХ ПОКЛАДІВ

Мета. Метою виконаних досліджень є визначення стійкості міжкамерного цілика при розробці складноструктурних рудних покладів системами з відкритим очисним простором, що дозволить підвищити показники вилучення рудної маси за рахунок селективного виймання корисної копалини з виймального блоку.

Методи досліджені. На практиці існує велика кількість теоретичних та лабораторних методик по визначенню конструктивних елементів системи розробки з відкритим очисним простором, які дозволяють визначити параметри ціликів та оголень для статичного об'єкту. При селективній розробці родовищ виймальний блок необхідно розглядати як динамічний об'єкт. Тому, для визначення стійкого оголення в залежності від черги відпрацювання очисної камери в межах виймального блоку необхідно визначити дію еквівалентних напружень в міжкамерному цілику за допомогою чисельних методів, або програмних комплексів створених на основі чисельного методу.

Наукова новизна. Вперше за допомогою програмного комплексу ANSYS встановлено, що при формуванні цілика в виймальному блоці між очисними камерами в залежності від напрямку відпрацювання блоку в цілику еквівалентні напруження змінюються за параболічною функцією. Так, при відпрацюванні виймального блоку з лежачого до висячого боку еквівалентні напруження описуються параболічною функцією, а при веденні очисних робіт від висячого до лежачого боку – обернено-параболічною функцією.

Практична значимість. Відпрацювання складноструктурних покладів Криворізького залізрудного басейну селективним способом, системами з відкритим очисним простором, дозволить вилучати камерні запаси руди без додаткового засмічення пустими породами із збереженням міжкамерного цілика представленого безрудним чи рудним включенням.

Результати. Доведено, що відпрацювання виймального блоку селективним способом дозволить підвищити показники вилучення рудної маси. Відпрацювання блоку від висячого до лежачого боку зменшує концентрацію напружень в цілику з 30–35 МПа до 5–10 МПа, що сприяє підвищенню його стійкості в 1,5–2,0 рази. При відпрацю-

ванні блоку від лежачого до висячого боку доцільно застосовувати підповерхово-камерну систему розробки для забезпечення стійкості цілику та очисним камерам під час вилучення руди.

Ключові слова: підземна розробка, залізна руда, напруження, стійкість, камерна система розробки, цілик

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-58-64

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Родовище Криворізького залізорудного басейну складається з 6–7 різноманітних покладів залізних руд з вмістом заліза загального від 10 до 67%. Поклади залізних руд з вмістом заліза загального в масиві 24–32% відпрацьовуються відкритим способом, а 52–67% – підземним. На ділянках покладів зустрічаються безрудні або рудні включення з вмістом заліза менше ніж бортовий. Відпрацювання даних ділянок здійснюється шляхом масового обвалення гірського масиву [1].

На відкритих гірничих роботах після масового обвалення масиву здійснюється сортування обваленої рудної маси безпосередньо у вибою, в результаті чого пусті породи складають у зовнішні чи внутрішні відвали, а руду направляють на збагачувальні фабрики. В деяких випадках пусті породи застосовують в якості огороження робочих площадок.

На підземних гірничих роботах Криворізького залізорудного басейну здійснити розподіл відбитої рудної маси за якістю в підземних умовах практично неможливо. Це призводить до суттєвого зниження вмісту заліза в видобутій рудній масі з 67 до 58% в залежності від потужності безрудного або рудного включення (БРВ) [2]. За даними гірничодобувних підприємств загальна кількість запасів БРВ в масиві становить для бідних руд 10–15%, а для багатих руд 5–12% [3].

Підвищити ефективність відпрацювання складноструктурних рудних покладів (збільшити показники вилучення рудної маси) можливо шляхом збагачення видобутої рудної маси, або за рахунок впровадження селективної розробки ділянок покладів, що містять БРВ [4,5].

Аналіз досліджень і публікацій. Відпрацюванню складноструктурних родовищ присвячено цілий ряд досліджень пов'язаних з встановленням закономірностей показників вилучення, прояву гірського тиску, черговості їх виїмки та визначенню параметрів основних конструктивних елементів систем розробки.

В роботах [6-12] автори довели, що основними факторами для успішного відпрацювання родовища є: порядок очисного виймання, прояви гірського тиску, інтенсивність очисних робіт, кількість і стійкість ціликів, висота поверху, взаємне розташування камер і ціликів в покладах основного простягання.

На досвіді роботи шахт Криворізького басейну автори [6-8] розглянули порядок очисного виймання паралельно-зближених рудних покладів в залежності від потужності, міцності проміжної товщі (безрудного включення) та прийнятої системи розробки. Ними відзначається, що при масовому обваленні рудного масиву паралельного простягання початкове поле напружень в породах перерозподіляється, в наслідок чого виникають інтенсивні прояви гірського тиску, що призводить до порушення цілісності порід висячого боку. Порушення цілісності порід призводить до його руйнування та формування зони зсуву від горизонту що розробляється до земної поверхні, це ускладнює в подальшому відпрацювання рудного тіла основного простягання.

При розробці покладів основного простягання камерними системами в першу чергу, відбувається збільшення інтенсивності прояву гірського тиску, яке призводить до зниження стійкості оголень та збільшенню ймовірності до руйнування міжкамерних ціликів.

На підставі проведених досліджень автори [11, 13] приходять до висновку, що позацентрове розташування ціликів і камер недопустиме при розробці паралельно-зближених покладів камерними системами. Посилаючись на промислові дослідження з відпрацювання блоків на шахті "Гвардійська" автори вказують, що випереджене відпрацювання камер в покладах основного простягання збільшує гірський тиск та негативно впливає на безрудне включення, яке розташоване між покладами.

З метою забезпечення стійкості оголень стосовно відпрацювання паралельно-зближених покладів автори [10,14] рекомендують враховувати наступні заходи: взаємне розташування камер і ціликів в покладах основного і паралельного простягання; черговість очисних робіт в

однойменних камерах розташованих одна відносно іншої у висячому і лежачому боках; послідовність відпрацювання покладів у шахтному полі.

В роботі [11] автори відзначають, що при відпрацюванні складноструктурних покладів камерними системами розробки з залишенням ціликів, кількість ціликів повинна бути мінімальною, так як вони служать концентраторами напружень та ускладнюють умови подальшої розробки родовища.

Автори робіт [6-8], прийшли до протилежного висновку, тобто випереджувальна виїмка пластів зі сторони висячого боку знижує гірський тиск в пластах основного простягання. Такі суперечливі висновки про послідовність ведення очисних робіт виникли в наслідок того, що зазначені дослідження проводилися в неоднакових умовах і на різних глибинах.

В роботі [9] виділені різні зони зміни гірського тиску, обумовлені випереджаючим відпрацюванням одного з пластів, а також тимчасовим відставанням робіт і їх просторово-взаємним розташуванням. Встановлено, що зменшення взаємного впливу похилих покладів відбувається зі збільшенням їх кута падіння.

Дослідженнями [10-12] встановлено, що опорний тиск у гірських породах за простяганням розподіляється нерівномірно, а зосереджується на флангах виробленого простору. В результаті цього в породах розташованих між паралельно-зближеними покладами, за простяганням, виникають зони розвантаження та зони концентрації напружень.

Таким чином, при впровадженні ресурсозберігаючої технології при відпрацюванні покладів, що містять БРВ, необхідно визначити за допомогою сучасних програмних комплексів як впливає порядок відпрацювання покладу та прогін оголення на конструктивні елементи камерної системи розробки.

Постановка задачі. Для забезпечення високих показників виймання при селективній розробці виймального блока необхідно визначити: максимально-допустимий стійкий проліт оголення очисної камери в залежності від конструктивних елементів камерної системи розробки та зміни еквівалентних напружень в міжкамерному цілику від порядку ведення очисних робіт.

Викладення матеріалу та результати. За допомогою методу кінцевих елементів можливо не тільки описати об'єкт але й дослідити розподіл напружень навколо нього для пружно-пластичного гірського масиву. Метод кінцевих елементів знайшов широке застосування при визначенні полів напружень навколо виробленого простору. Даний метод надзвичайно універсальний, оскільки дозволяє аналізувати інженерні конструкції зі складною геометрією і дає можливість досліджувати тривимірні задачі, а також допускає використання пружно-пластичних елементів для обліку пластичності гірського масиву.

Сили взаємодії елементів передавались за допомогою вузлових точок, які замінюються на кінцеву кількість структурних елементів кінцевих розмірів, які з'єднуються один з одним. Припускаючи, що всередині кожного елемента переміщення можна уявити простою функцією координат в плоскій задачі тоді єдиним переміщенням є переміщення u і v , а в найпростішому випадку в межах елемента їх можна уявити лінійними функціями координат

$$\begin{cases} u = a'x + b'y + c; \\ v = e'x + f'y + g, \end{cases} \quad (1)$$

де u, v – координати переміщення досліджуваного об'єкта; x, y – початкові координати досліджуваного об'єкта; a, b, c, e, f, g – постійні величини, що описують досліджуваний об'єкт.

Рішення рівняння (1) з шістьма невідомими a, b, c, e, f, g дає нам вираз констант і координати вузлів (u, v) які відображають всі переміщення всередині елемента через переміщення вузлових точок. Оскільки переміщення двох загальних вузлових точок на кінцях лінії розділу для обох елементів (u, v) повинні бути загальними то деформації між сусідніми елементами та визначаються за формулою

$$\begin{cases} s_{ij} = \frac{\alpha K}{\epsilon \sqrt{2} p' r \varnothing} f_{ij}(q); \\ u_i = C' K' \sqrt{r'} f_i(q). \end{cases} \quad (2)$$

Вузлові сили в плоскій задачі мають дві складові: одну – в напрямку x , іншу – в напрямку y . Сили, що діють в вузлових точках граничних елементів, прирівнюються до зовнішнього навантаження або напруженням, які вирішуються методом кінцевих елементів.

На теперішній час вирішити рівняння (2) можливо за допомогою програмних комплексів "SolidWorks", "Ліра", "Ansys". Данні програмні комплекси дозволяють створити об'єкт і визначити не тільки поле напружень, але й деформацію гірського масиву навколо виробленого простору. З метою визначення зміни напружень в цілику розташованого в виймальному блоці між очисними камерами будують розрахункову схему, рис. 1.

При побудові моделі були виконані наступні умови:

у виймальному блоці формуємо ділянку з безрудним включенням;

припускаємо, що БРВ розповсюджується на всю глибину родовища;

зі сторони висячого та лежачого боків від виймального блоку формуємо вмичуючі породи;

у верхній частині ділянки масиву, що досліджується та зі сторін висячого і лежачого боків додаємо зовнішнє навантаження (головні вертикальні та горизонтальні напруження).

При виконанні досліджень були прийняті наступні вихідні умови: глибина розробки

1260 м, горизонтальна потужність складноструктурного рудного покладу 50 м, кут падіння 60 град, потужність безрудного включення 10 м, відстані розташування БРВ від контуру лежачого та висячого боків покладу відповідно 25 та 15 м, висота поверху 80 м, головні вертикальні та горизонтальні напруження відповідно склали 36 та 11,37 МПа, коефіцієнт Пуассона приймається для порід 0,24 і руди 0,23. Для безрудного включення прийняті наступні характеристики: питома вага 2800 кН, межа міцності на стискання та розтягання відповідно 160 і 11 МПа, Модуль Юнга 70000.

Згідно гірничо-геологічних умов підприємства фізико-механічні властивості порід лежачого та висячого боків наведені в табл. 1. Всього було проведено 6 серій досліджень, які відрізнялись між собою: чергою відпрацювання виймального блоку представленого складноструктурним рудним покладом, фізико-механічними властивостями руди та безрудного включення.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості гірського рудного масиву

№ досліду	Питома вага, кН	Межа міцності на, МПа		Модуль Юнга
		стискання	розтягання	
1	3600	90	6	50000
2	3400	70	4	50000
3	3800	110	8	50000

При проведенні досліджень на моделі фіксували розподіл еквівалентних напружень в масиві на різних стадіях ведення гірничих робіт: початкова, до начала ведення гірничих робіт; проміжна, коли в гірському масиві сформували очисний простір у висячого або лежачого боку виймального блоку (в залежності від напрямку ведення гірничих робіт); кінцева, на момент формування очисних камер першої та другої черг відпрацювання виймального блоку.

За допомогою програмного комплексу ANSYS проведено моделювання зміни поля напружень в гірському масиві навколо очисних камер на різних стадіях ведення гірничих робіт при відпрацюванні виймального блоку від висячого до лежачого боку, рис. 2: початкова – без ведення гірничих робіт; проміжна – формування очисної камери у висячого боку; кінцева – формування очисної камери у лежачого боку.

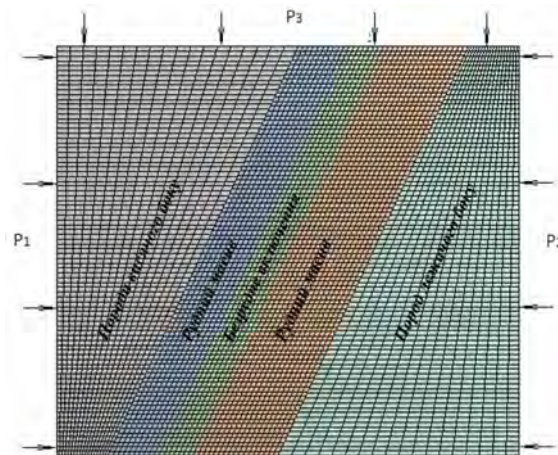


Рис. 1. Сітка кінцевих елементів при дослідженні поля напружень складноструктурного рудного покладу

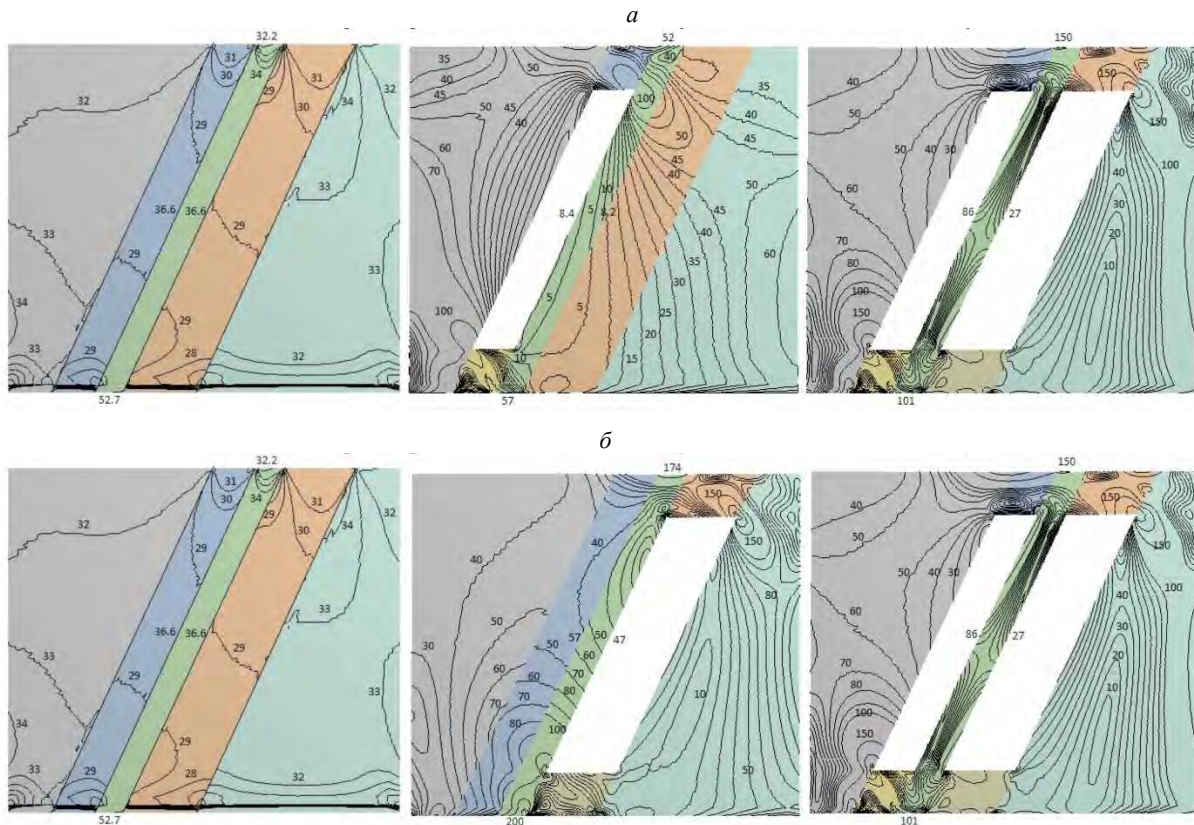


Рис. 2. Результати моделювання відробки ССРП від висячого до лежачого боку при межі міцності безрудного включення на стискання 160 МПа: *а, б* – порядок відпрацювання виймального блоку відповідно від висячого боку до лежачого та від лежачого до висячого

За результатами виконаних досліджень побудовані залежності зміни еквівалентних напружень в середній частині безрудного включення при відпрацюванні виймального блоку від висячого боку до лежачого та навпаки від лежачого до висячого боку, рис. 3.

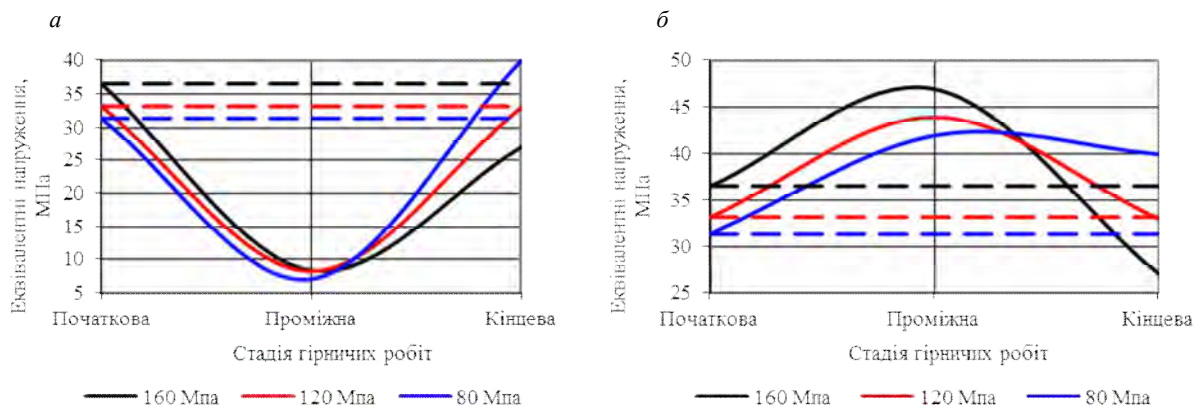


Рис. 3. Залежності зміни еквівалентних напружень в середній частині безрудного включення від межі міцності порід БРВ при межі міцності руди 90 МПа та висоті поверху 90 м при відпрацюванні виймального блоку: *а* – від лежачого до висячого боку; *б* – від висячого до лежачого боку

З графіків приведених на рис. 3*а* видно, що на характер зміни еквівалентних напружень в БРВ у середній його частині впливає тільки порядок гірничих робіт у виймальному блоці. При цьому відбувається підвищення межі пропорційності за законом Гука, яке викликане подальшим навантаженням матеріалу більшим за межу текучості [15].

Таким чином, у випадку коли межа міцності на стискання в породах безрудного включення буде більшою ніж за 120 МПа очисні камери першої та другої черги будуть стійкими.

З графіків приведених на рис. 3*б* видно, що при утворенні очисної камери у лежачого боку еквівалентні напруження в середній частині БРВ збільшуються з 33–37 до 42–47 МПа, створю-

ючи зону розтягуючих напружень. В подальшому, при відпрацюванні запасів у висячого боку, еквівалентні напруженні різко зменшуються до 27–40 МПа, що призведе до руйнування міжкамерного цілика.

З теорії опору матеріалів відомо, якщо зразок рівномірно навантажувати в часі, в ньому зростають нормальні напруження до межі міцності матеріалу на стискання, рис. 4а. Як тільки стискаючі напруження стануть більшими за межу міцності БРВ на стискання або з'являються лінійні деформації то міжкамерний цілик буде зруйновано (поз. 2, рис. 4).

У випадку коли на цілик протягом часу діють стискаючі та розтягуючі напруження, нормальні напруження в БРВ спочатку збільшуються, а потім зменшуються. При повторному навантаженні в цілику виникають лінійні деформації, що значно зменшують межу міцності порід на стискання, (рис. 4б).

Таким чином, з метою збереження цілісності БРВ, який представляє собою міжкамерний цілик під час ведення очисних робіт в блоці, необхідно виконання наступної граничної умови

$$\begin{cases} s \leq s_k @ [s_{cm}]; \\ e = 0, \end{cases} \quad (3)$$

де s – нормальні напруження МПа; s_k – критичні напруження МПа; $[s_{cm}]$ – межа міцності порід на стискання МПа; e – лінійні деформації.

Коли протягом часу в цілику зростають навантаження, то в ньому збільшуються нормальні напруження, згідно виразу (3), а при зменшенні навантаження, нормальні напруження не досягають межі міцності порід, що призводить до руйнування цілика при наступній умові

$$\begin{cases} s \ll s_k @ s_e \ll [s_{cm}]; \\ e \neq 0. \end{cases} \quad (4)$$

Слід зазначити, що при математичному моделюванні практично неможливо відтворити гірничий масив, тому проліт оголення очисної камери необхідно зменшити на коефіцієнт запасу стійкості.

Коефіцієнт запасу стійкості безрудного чи рудного включення визначається за виразом

$$K_{cm} = K_{cmp.o} / K_3, \quad (5)$$

де $K_{cmp.o} = 0,65 - 0,95$ – коефіцієнт структурного ослаблення порід тріщинами (приймається 0,85); $K_3 = 1,5 - 2,0$ – коефіцієнт запасу міцності порід (приймається 1,5).

При висоті поверху виймального блоку 90 м похилий прольот оголення складає 104 м, а з урахуванням виразу (5) він становить 58,9 м. За результатами моделювання встановлено, що при висоті поверху 90 м (проліт похилого оголення 58,9 м) та ширині очисної камери 25 м при межі міцності БРВ більшим ніж 120 МПа оголення зберігає свою стійкість. У випадку коли межа міцності порід буде меншою ніж за 120 МПа проліт оголення буде нестійким, БРВ та очисні камери будуть зруйновані.

Порівнюючи результати моделювання з аналітичними дослідженнями встановлено, що очисна камера шириною 25 з похилим прольотом оголення 57 м та межею міцності БРВ 120 МПа буде стійкою, а різниця між значеннями похилого прогону оголення не перевищує 3,2%.

У випадку коли межа міцності БРВ буде складати 80 МПа, при прольоті оголення 58,9 м очисні камери будуть зруйновані, так як за даними аналітичних розрахунків проліт оголення не повинен перевищувати 39 м.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином, встановлено, що при відпрацюванні складноструктурних рудних покладів необхідно не тільки визначати конструктивні елементи системи розробки але й зміну напружень навколо очисних камер та в цілику після початку ведення очисних робіт. Так, якщо після утворення очисних камер в блоці напруження в цілику буде збільшуватись до початкового стану та не перевищить його, можна вважати, що цілик та камери будуть стійкими. Якщо, значення еквівалентних напружень в середній частині перевищать значення напружень початкового стану системи, цілик буде зруйнований в процесі

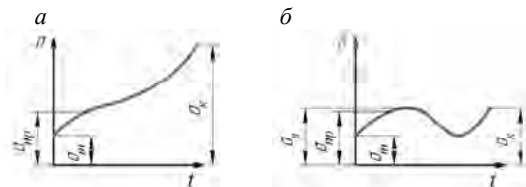


Рис. 4. Характер розподілу напружень та деформацій в матеріалі на різних стадіях навантаження: а – при дії на зразок протягом часу стискаючих зусиль; б – при дії на зразок протягом часу стискаючих і розтягувальних зусиль

відпрацювання очисної камери другої черги. Забезпечити стійкість очисним камерам і міжкамерному цілику можливо шляхом зменшення площі похилого оголення, однак, порядок відпрацювання необхідно визначити.

Список літератури

1. Письменный С.В. Отработка складно-структурных залежей богатых руд камерными системами разработки / С.В. Письменный // Гірничий вісник : Науково-технічний збірник. – 2014. – Вип. 97. – С. 3-7.
2. Ступник Н.И. Перспективные технологические варианты дальнейшей отработки железорудных месторождений системами с массовым обрушением руды / Н.И. Ступник, С.В. Письменный // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – Вип. 30. – С. 3-7.
3. М.І. Ступнік. Комбіновані способи подальшої розробки залізорудних родовищ Криворізького басейну / М.І. Ступнік, С.В. Письменный // Гірничий вісник: Науково-технічний збірник. – 2012. – Вип. 95(1). – С. 3-7.
4. Pysmennyi, S., Brovko, D., Shwager, N., Kasatkina, I., Paraniuk, D., Serdiuk, O. (2018). Development of complex structure ore deposits by means of chamber systems under conditions of the Kryvyi Rih iron ore field. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Vol. 5, Issue 1 (95), 33-45.
5. Гирич В.С. Пути совершенствования качества металлургического сырья на шахтах Кривбасса / В.С. Гирич, Н.К. Кравцов, В.А. Витряк // Разраб. рудн. месторождений. Кривой Рог: КТУ. – 2000. – Вип. 70. – С. 10-13.
6. Малахов Г.М. Исследование закономерностей проявления горного давления при отработке параллельных залежей / Г.М. Малахов, Г.Т. Фаустов, П.А. Абашин, А.И. Пикалов, Г.С. Шкробко // Разработка рудных месторождений: Республиканский межведомственный научно-технический сборник. – 1974. – Вип. 18. – С. 117-125.
7. Логачев Е.И. Снижение потерь и засорения обрушенной руды при отработке месторождений с углом падения 45-60° / Е.И. Логачев, С.В. Письменный // Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна». – 2010. – Вип. 11(161). – С. 96-99.
8. Ступник Н.И. Технология разработки рудных месторождений открыто-подземным способом / Н.И. Ступник, Б.Н. Андреев, С.В. Письменный // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – Вип. 33. – С. 3-8.
9. Сторчак С.А. Повышение качества рудной массы при поэтажном обрушении, за счет технологических факторов / С.А. Сторчак, С.В. Письменный, В.А. Сбитнев – Качество минерального сырья. Сборник научных трудов. – 2002. – С. 70-74.
10. Прохода А.З. Исследование комбинированной системе разработки / А.З. Прохода, Н.И. Ступник, В.М. Елезов, В.А. Зиненко // Разр. руд. месторождений. Кривой Рог. – 1983. - №36. – С. 68-73.
11. Золотарев И.И. Отработка параллельных залежей в условиях Криворожского бассейна / И.И. Золотарев, Н.И. Стариков, Г.Т. Фаустов // Горный журнал. – 1962. - №6. – С. 19-23.
12. Абашин П. А. Исследование устойчивости целиков при отработке параллельных залежей / П.А. Абашин, А.И. Пикалов, Г.Т. Фаустов, Г.С. Шкробко, А.В. Говоров // Горный журнал. – 1974. - №5. – С. 57-59.
13. Khomenko O. Laboratory research of influence of face area dimensions on the state of uranium ore layers being broken / O. Khomenko, D. Maltsev // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2013. Issue 2. P. 31-37.
14. Khomenko O. Principles of rock pressure energy usage during underground mining of deposits / O. Khomenko, A. Sudakov, Z. Malanchuk, Ye. Malanchuk // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2017. Issue 2. P. 35-43.
15. Влох Н.П. Управление горным давлением на подземных рудниках / Н.П. Влох. – М.: Недра, 1994. – 208 с.

Рукопис подано до редакції 20.03.2020

УДК 691.328

О.І. ВАЛОВОЙ, канд. техн. наук, проф., Д.В. ПОПРУГА,
В.В. АФАНАСЬЄВ, кандидати техн. наук, доценти,
К.В. ЧОРНА, аспірант, О.М. ГРИЦАСЕНКО, асистент
Криворізький національний університет

МІЦНІСТЬ БАЛОК З МЕТАЛЕВИМ І СКЛОПЛАСТИКОВО-МЕТАЛЕВИМ АРМУВАННЯМ РОЗТЯГНУТОЇ ЗОНИ

Мета – визначити та порівняти міцність дослідних зразків балок армованих металевим і гібридним склопластиково-металевим армуванням у розтягнутій зоні. Визначити передумови використання склопластикової арматури в якості робочої в згинальних бетонних елементах.

Методи. Експериментальне випробування натурних дослідних зразків у лабораторних умовах. Аналітичне дослідження і порівняння отриманих результатів.

Наукова новизна. Визначені необхідні умови для використання склопластикової арматури в поєднанні з металевим в згинальних бетонних елементах. Встановлено необхідний переріз площі склопластикової і металеві арматури для ефективного підвищення міцності дослідних зразків.

Практична значимість. Отримані результати дозволять розширити спектр використання склопластикової композитної арматури у будівельних конструкціях, що працюють на згин. Незначна вага, висока міцність, протико-

© Валовой О.І., Попруга Д.В., Афанасьев В.В., Чорна К.В., Грицасенко О.М., 2020

розійні та діелектричні властивості композитної склопластикової арматури дозволять підвищити міцність і покращити фізико-механічні властивості згинальних бетонних конструкцій армованих подібними матеріалами.

Результати. Аналізуючи міцність згинальних бетонних елементів з металевим і склопластиково-металевим армуванням розтягнутої зони встановлено:

при гібридному армуванні розтягнутої зони згинальних бетонних елементів робочою склопластиковою арматурою 2Æ12 АКС 800 і металевою Æ12 А400С, з загальною площею, що менше площі металевої робочої арматури 3Æ12 А400С контрольної серії на 2,78%, можна досягти підвищення межі міцності балок на 3,51%;

при гібридному армуванні розтягнутої зони згинальних бетонних елементів робочою склопластиковою арматурою 2Æ14 АКС 800 і металевою Æ12 А400С, з загальною площею, що перевищує площу металевої робочої арматури 3Æ12 А400С контрольної серії на 10,85%, можна досягти підвищення межі міцності балок на 11,23%.

Збільшення площі робочої арматури за рахунок склопластику на 26,96% призводить до підвищення міцності балок на 16,79%. Збільшення площі на 44,76% призводить до підвищення міцності балок на 25,49%.

Ключові слова: склопластикова арматура, міцність, руйнування, розтягнута зона, робоча арматура, діаметр, композитний матеріал, дослідна балка.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-64-68

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Склопластикова композитна арматура набула останнім часом широкого застосування в дорожньому будівництві та при зведенні фундаментів будівель і споруд. Саме пружна основа дозволяє максимально використати її корисні фізико-механічні властивості та нівелювати недоліки.

Характерною особливістю композитів є низький модуль пружності, який приблизно в чотири рази менший відповідного показника металевої арматури. Цей фактор обмежує використання склопластику у якості робочої арматури бетонних згинальних конструкцій [5-7].

Одним зі шляхів вирішення проблеми використання композитів у балках і плитах є гібридне, комбіноване, армування розтягнутої зони композитною і металевою арматурою.

Наукове дослідження проводилось у межах науково-дослідної роботи НР/П-81-17 (РК№ 0118U000118) "Дослідження роботи склопластикової арматури в згинальних елементах виготовлених з бетонів на відходах гірничо-збагачувальних комбінатів".

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженню особливостей застосування і роботи композитних матеріалів у складі будівельних конструкцій присвятили свої роботи: Ю.А. Клімов, О.С. Солдатченко, Д.О. Оршкін, Л.А. Мурашко, П.М. Коваль, О.І. Валовой, О.Ю. Єрмоєнко, О.Я. Гримак, І.П. Гамеляк, В.С. Дорофєєв, М.В. Заволока, Д.Р. Маїлян, В.В. Малиха та інші.

Постановка задачі. Основним завданням наведеної наукової роботи є визначення експериментальним шляхом реальних характеристик міцності дослідних балок з металевим та склопластиково-металевим армуванням розтягнутої зони.

Встановлення закономірності впливу зміни площі склопластикової арматури на міцність дослідних зразків.

Викладення матеріалу та результати. В науковій роботі [1] наведено програму наукового дослідження, геометричні характеристики, схему армування та процес виготовлення дослідних зразків.

На рис. 1 наведено стенд згідно якого відбувалося випробування дослідних зразків балок на гідравлічному пресі.

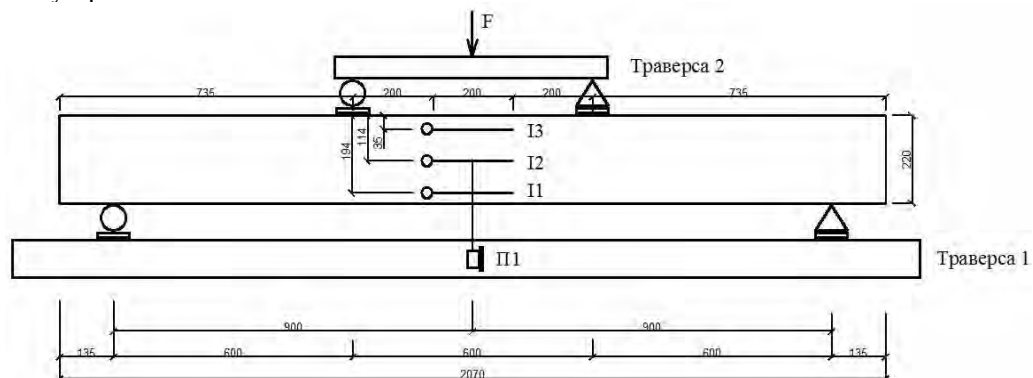


Рис. 1. Схема прикладання навантаження та розміщення приладів: F – прикладене навантаження; I_1, I_2, I_3 – індикатори годинникового типу з ціною поділки 0,01 мм розміщені на базі 200 мм; $П_1$ – прогиномір Максимова з ціною поділки 0,1 мм

Для визначення фактичної площі склопластикової арматури АКС 800 $\text{AE}8$, 10, 12 і 14 мм (рис. 2), що була надана виробником ТОВ «ТОРГПРОМКОНТРАКТ» (м. Дніпро), був вимірний за допомогою електронного штангенциркуля зовнішній діаметр кожного зі зразків в трьох місцях по довжині. В табл. 1 наведені діаметри і площі зразків композитної арматури АКС 800 $\text{AE}10$, 12 і 14 мм, що були використанні при виготовленні дослідних балок [1].



Рис. 2. Дослідні зразки склопластикової арматури АКС 800 $\text{AE}8$, 10, 12 і 14 мм

Фактична площа одного стержня металевої арматури $\text{AE}12$ А400С становить $A_s=113,1 \text{ мм}^2$.

Площа робочої арматури дослідних серій балок:

серія БМ-1 з робочою металевою арматурою $3\text{AE}12$ А400С – $A_s=113,1 \times 3=339,3 \text{ мм}^2$;

серія БМС-3 з гібридною робочою арматурою $2\text{AE}10$ АКС800 і $\text{AE}12$ А400С – $A_s=73,36 \times 2 + 113,1=259,82 \text{ мм}^2$;

серія БМС-5 з гібридною робочою арматурою $2\text{AE}12$ АКС800 і $\text{AE}12$ А400С – $A_s=108,38 \times 2 + 113,1=329,86 \text{ мм}^2$;

серія БМС-7 з гібридною робочою арматурою $2\text{AE}14$ АКС800 і $\text{AE}12$ А400С – $A_s=131,504 \times 2 + 113,1=376,11 \text{ мм}^2$.

Міцність зразків склопластикової арматури АКС 800 встановлено згідно протоколу випробувань [9].

Таблиця 1

Площа стержнів композитної склопластикової арматури АКС 800

Класи склопластикової арматури	AE_1 , мм	AE_2 , мм	AE_3 , мм	A_s , мм ²
$\text{AE}10$ АКС 800	9,77	9,25	9,43	73,36
	9,44	9,75	9,38	
	9,99	9,93	10,06	
$\text{AE}12$ АКС 800	11,48	11,43	11,51	108,38
	12,01	11,54	11,95	
	11,68	11,87	12,28	
$\text{AE}14$ АКС 800	13,05	13,27	13,22	131,504
	12,70	12,62	13,06	
	13,38	12,83	12,36	

Майже всі зразки дослідних серій балок зруйнувалися за нормальним перерізом, що свідчить про задовільну міцність зразків за похилої тріщиною [10].

Один зразок серії БМС-7 з гібридним армуванням розтягнутої зони $2\text{AE}14$ АКС800 і $\text{AE}12$ А400С, зруйнувався за похилою тріщиною внаслідок змінання стиснутої зони у крайній третині, що є виключенням і не відповідає характеру руйнування інших зразків серії БМС-7.

В табл. 2 наведені показники фактичної міцності і відсоткові залежності міцності та площі робочої арматури дослідних серій балок в порівнянні з контрольною серією.

Таблиця 2

Міцність дослідних серій балок

Серія балок	Площа робочої арматури балок відносно контрольної серії, %	Руйнівний момент M_u , кН·м	Міцність балок відносно контрольної серії, %	Різниця значень міцності балок з контрольною серією, %
БМ-1 (контрольна серія)	100	42,75	100	-
БМС-3	76,58	37,89	88,63	-11,37
БМС-5	97,22	44,25	103,51	+3,51
БМС-7	110,85	47,55	111,23	+11,23

Визначення міцності балок проводилося згідно діючої методики [11] на повіреній гідравлічній станції при монотонному навантаженні з кроком 0,1 від руйнівного навантаження двома зосередженими силами у третинах прольоту.

В результаті проведених експериментальних досліджень отримані наступні результати:

серія БМС-3 (рис. 3) з армуванням розтягнутої зони склопластиковою $2\text{Æ}10$ АКС800 і металевою арматурою $\text{Æ}12$ А400С, в порівнянні з контрольною серією БМ-1 (рис. 4), показала зменшення міцності на 11,37%;

серія БМС-5 (рис. 5) з армуванням розтягнутої зони склопластиковою $2\text{Æ}12$ АКС800 і металевою арматурою $\text{Æ}12$ А400С, в порівнянні з контрольною серією БМ-1, показала збільшення міцності на 3,51%;

серія БМС-7 (рис. 6) з армуванням робочої зони склопластиковою $2\text{Æ}14$ АКС800 і металевою арматурою $\text{Æ}12$ А400С, в порівнянні з контрольною серією БМ-1, показала збільшення міцності на 11,23%.



Рис. 3. Характер руйнування дослідних балок серії БМС-3 з гібридним армуванням $2\text{Æ}10$ АКС800 і $\text{Æ}12$ А400С розтягнутої зони



Рис. 4. Характер руйнування дослідних балок контрольної серії БМ-1 з металевим армуванням $3\text{Æ}12$ А400С розтягнутої зони



Рис. 5. Характер руйнування дослідних балок серії БМС-5 з гібридним армуванням $2\text{Æ}12$ АКС800 і $\text{Æ}12$ А400С розтягнутої зони



Рис. 6. Характер руйнування дослідних балок серії БМС-7 з гібридним армуванням $2\text{Æ}14$ АКС800 і $\text{Æ}12$ А400С розтягнутої зони

Збільшення площі робочої арматури за рахунок склопластику на 26,96% (серія БМС-5), відносно серії БМС-3, призводить до підвищення міцності балок на 16,79%. Збільшення площі на 44,76% (серія БМС-7), відносно серії БМС-3, призводить до підвищення міцності дослідних зразків на 25,49%.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналізуючи міцність згинальних бетонних елементів з металевим і склопластиково-металевим армуванням розтягнутої зони встановлено:

незважаючи на те, що межа міцності на розтяг склопластикової арматури АКС 800 майже в три рази більша за аналогічне значення металевої арматури А400С, використовувати менший діаметр склопластику для рівномірної заміни металевої арматури в згинальних елементах не є можливим без втрати міцності зразків. Балки серії БМС-3 з армуванням розтягнутої зони $2\text{Æ}10$ АКС800 і $\text{Æ}12$ А400С, в порівнянні з контрольною серією БМ-1, яка армована у розтягнутій зоні металевою арматурою $3\text{Æ}12$ А400С, показали зменшення міцності на 11,37%;

при використанні склопластикової арматури $\text{Æ}12$ АКС800 у розтягнутій зоні, відбувається рівномірна заміна металевої арматури $\text{Æ}12$ А400С з невеликим підвищенням міцності дослідних зразків. Балки серії БМС-5 з гібридним армуванням розтягнутої зони склопластиковою арматурою $2\text{Æ}12$ АКС 800 і металевою $\text{Æ}12$ А400С, з загальною площею, що менше площі ме-

талевої робочої арматури 3Æ12 А400С контрольної серії БМ-1 на 2,78%, показали підвищення межі міцності балок на 3,51%;

при гібридному армуванні розтягнутої зони згинальних бетонних елементів робочою склопластиковою арматурою 2Æ14 АКС 800 і металевую 1Æ12 А400С (серія БМС-7), з загальною площею, що перевищує площу металеві робочої арматури 3Æ12 А400С контрольної серії БМ-1 на 10,85%, можна досягти підвищення межі міцності балок на 11,23%.

В подальшому планується порівняти отримані експериментальні результати показників міцності дослідних балок з розрахунковими значеннями визначеними за діючою нормативною методикою.

Список літератури

1. **Валовой О.І.** Виготовлення будівельних конструкцій армованих металевую і склопластиковою арматурою з бетонів на відходах гірничо-збагачувальних комбінатів / О. І. Валовой, Д.В. Попруга, Є.В. Люльченко, К.В. Чорна // Гірничий Вісник. Збірник наукових праць. - Кривий Ріг: КНУ, 2018. - Випуск 104. - С. 130-135.
2. **Валовой О.І.** Визначення прогинів згинальних елементів армованих склопластиковою і металевую арматурою / О. І. Валовой, Д.В. Попруга, Є.В. Люльченко, К.В. Чорна // Гірничий Вісник. Збірник наукових праць. - Кривий Ріг: КНУ, 2018. - Випуск 103. - С. 7-11.
3. **Валовой О.І.** Математичне моделювання згинальних елементів армованих склопластиковою і металевую арматурою з визначенням деформацій прогинів / **О.І. Валовой, Д.В. Попруга, Є.В. Люльченко, К.В. Чорна** // International Multidisciplinary Conference "Science and technology of the present time: priority development directions of Ukraine and Poland". - Wolomin: Z. Gloger Wolomin International and Regional Cooperation University, 2018. - С. 91-94.
4. **Валовой О.І.** Особливості анкерування композитної арматури в бетоні / **О.І. Валовой, Д.В. Попруга, К.В. Чорна** // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції "Розвиток промисловості та суспільства". - Кривий Ріг: КНУ, 2018. - Том 1. - С. 213.
5. **Попруга Д. В.** Використання склопластикової композитної арматури в згинальних елементах виготовлених з бетонів на відходах гірничо-збагачувальних комбінатів / **Д.В. Попруга, О.І. Валовой** // Вісник Криворізького національного університету. – Кривий Ріг: КНУ, 2017. – Випуск 44. – С. 147-150.
6. **Валовой О. І.** Особливості використання композитної арматури в згинальних бетонних елементах / **О.І. Валовой, Д.В. Попруга, К.В. Чорна** // Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. - Луцьк: ЛНТУ, 2017. - Випуск 8. - С. 58-64.
7. **Valovoi O.** Application of the non-metallic composite armature / **O. Valovoi, D. Popruga, K. Chorna** // International scientific – practical conference of young scientists «Build-Master-Class-2017». - Kyiv: Kyiv National University of Construction and Architecture, 2017. – P. 196.
8. **Попруга Д. В.** Технологія виготовлення та підсилення залізобетонних згинальних елементів на відходах гірничо-збагачувальних комбінатів / **Д.В. Попруга, О.І. Валовой** // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. - Рівне: НУВГП, 2011. - Випуск 22. - С. 833-840.
9. Протокол № 221-323/153/14 випробування зразків композитної арматури. - Київ: ДП НДІБК, 2015. - 7 с.
10. Настанова з проєктування та виготовлення бетонних конструкцій з неметалевою композитною арматурою на основі базальто- і склорівінгу : ДСТУ-Н В.2.6-185:2012. - [Чинний від 2013-04-01]. - Київ: Мінрегіон України, 2012. - 28 с. - (Нац. стандарт України).
11. Конструкции и изделия бетонные и железобетонные, сборные. Методы испытания нагружением и оценки прочности, жесткости и трещиностойкости: ГОСТ 8829-94 (ДСТУ БВ.2.6-7-95). – [Действует от 1986-01-01].

Рукопис подано до редакції 20.03.2020

УДК 691.3

С.І. САХНО, Є.В. ЛЮЛЬЧЕНКО, кандидати техн. наук, доценти,
К.С. БЛАШЕНКО, А.О. ДОМНІЧЕВ, студенти
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСОВНОСТІ НЕЛІНІЙНИХ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ МІЦНОСТІ БЕТОНУ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ РУЙНУВАННЯ БЕТОННИХ ПРИЗМ

Мета. Виявлення математичної моделі нелінійної поведінки бетону, що в найбільшій мірі відтворює поведінку лабораторних зразків призм при руйнуванні.

Методи досліджень. Дослідження є порівнянням результатів експериментальної частини, що проводилась в лабораторії Криворізького національного університету та результатів математичного моделювання руйнування бетону. Математичне моделювання деформацій та руйнування бетонних призм виконувалось в програмній системі Discovery AIM for student.

© Сахно С.І., Люльченко Є.В., Білашенко К.С., Домнічев А.О., 2020

Наукова новизна. В результаті досліджень отримав подальший розвиток метод математичного моделювання нелінійного руйнування бетону. Виявлені закономірності розподілення еластичних та пластичних деформацій в бетонних призмах. Отримано дослідницький матеріал для корегування особливих параметрів моделей Друккера-Прагера та Менетрея-Вілема

Практичне значення. Визначення класів бетону згідно державних будівельних норм виконується шляхом випробувань бетонних призм. Той факт, що математичні моделі Друккера-Прагера та Менетрея-Вілема досить точно відтворюють поведінку реального бетону лабораторних зразків призм, дозволяє застосовувати дані моделі для розрахунків та досліджень складних бетонних та залізобетонних конструкцій. Лінійні математичні моделі бетону можуть бути застосовані лише для розрахунку конструкцій, напруження в яких не перевищує межі пружності.

Результати. Виявлено та проаналізовано залежності розподілення напружень та деформацій від навантажень для лінійної та нелінійної моделей руйнування бетону Друккера-Прагера та Менетрея-Вілема. Проведено порівняння отриманих результатів з результатами лабораторних випробувань. Показано, що обидві нелінійні моделі досить точно описують процес деформацій та руйнування бетонної призми, але модель Друккера-Прагера має більший рівень відповідності. Модель Менетрея-Вілема моделює більш жорстку та крихку поведінку бетону. Деформації моделі Менетрея-Вілема нижчі ніж в моделі Друккера-Прагера. В моделі Друккера-Прагера розташування ізоліній пластичних деформацій перед руйнуванням бетону більше відповідають характеру руйнування лабораторних моделей.

Ключові слова: бетон, метод скінчених елементів, деформації, міцність, руйнування бетону, модель Менетрея-Вілема, модель Друккера-Прагера.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-68-73

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Комп'ютерне моделювання міцності і динаміки будівельних конструкцій засновано на методі скінчених елементів (МСЕ), реалізованому в програмних комплексах. У промисловому, цивільному і транспортному будівництві розрахунки, як правило, проводяться спеціалізованими пакетами «Ліра» і SCAD, що розробляються в Україні. Перевагами цих пакетів є широка практика застосування, наявність сертифікатів, що підтверджують врахування методик ДБН і СНіП і помірна ціна. Можливостей даних пакетів досить для вирішення типових практичних завдань, їх алгоритми пройшли випробування часом.

У той же час широке поширення нетипового будівництва і точкової забудови, підвищення висотності будівель і будівництво ряду великопрольотних споруд унікальної архітектури привело до ускладнення вирішуваних завдань. З'явилася необхідність врахування ряду параметрів, які не отримали належного вирішення в спеціалізованих пакетах.

Для задач, що не вирішуються спеціалізованими пакетами найбільш ефективним є застосування програмної системи ANSYS. ANSYS дозволяє виконувати розрахунки конструкцій практично будь-якої складності в умовах, наближених до реальних умов експлуатації, що не враховуються при розрахунках за існуючими методиками, які впливають на напружено-деформований стан конструкційних елементів і надійність конструкції в цілому.

Компанія ANSYS пропонує в освітніх цілях студентську академічну версію з обмеженням по кількості скінчених елементів. Завантажити студентську версію можна за наведеним нижче адресом в інтернеті: <http://www.ansys.com/products/academic/ansys-student>.

Аналіз досліджень і публікацій. Моделювання поведінки бетону присвячено значну кількість робіт, як в нашій країні [1-3], так і за кордоном [4-12]. Автори наголошують на важливості застосування нелінійного аналізу конструкцій, що працюють в складних, нестандартних умовах. В статтях розглядаються різні варіанти застосування методу скінчених елементів, як для проектування нових складних конструкцій, так і розрахунку відновлення конструкцій, що мають пошкодження. У статті [1], наприклад, показано досвід застосування методу скінчених елементів і програмного комплексу ANSYS для вибору оптимальної схеми відновлення пошкодженої конструкції пролітної будови моста. Але ми не знайшли досліджень, в яких порівнюються результати математичного моделювання з результатами лабораторних випробувань стандартних бетонних призм. В зв'язку з цим було прийнято рішення провести випробування стандартних бетонних призм і потім порівняти отримані дані з результатами математичного моделювання.

Постановка задачі. Враховуючи результати аналізу досліджень і публікацій була поставлена задача виявлення математичної моделі нелінійної поведінки бетону, що в найбільшій мірі відтворює поведінку лабораторних зразків при руйнуванні. Рішення задач нелінійного поводження бетонних і залізобетонних конструкцій може проводитися із застосуванням різних методик. Для розрахунку нелінійного поводження бетону в ANSYS можуть бути використані мо-

делі Друккера — Прагера і Менетрея — Вілема. Метою даної статті є перевірка збіжності результатів реальних випробувань бетонних зразків та їх математичних моделей в програмній системі ANSYS.

Викладення матеріалу та результати. Для перевірки різних моделей руйнування бетону нами була проведена серія лабораторних випробувань бетонних призм $150 \times 150 \times 600$ мм (рис. 1). Зразки випробовувалися після досягнення марочної міцності, відповідно до методик ГОСТ 24452-80. Нелінійний аналіз методом скінчених елементів проводився в ANSYS Discovery AIM for student. Для виявлення найбільш близької до реальних результатів моделі руйнування бетону, параметри поведінки бетонних призм і залізобетонних балок розраховувалися із застосуванням трьох математичних моделей руйнування бетону:

- модель лінійної поведінки бетону з лінійними параметрами модуля Юнга (ЛМ)
- модель Друккера — Прагера (МДП)
- модель Менетрея – Вілема (ММВ).

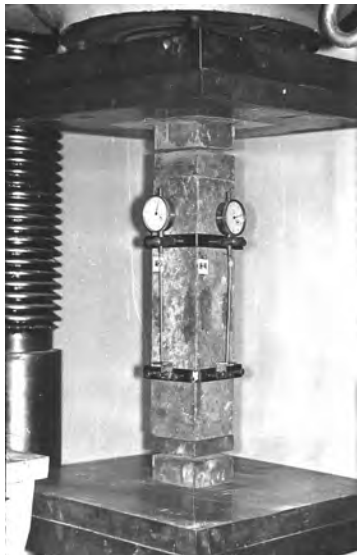


Рис. 1. Підготовлена до випробувань призма

Геометрична 3D модель для випробувань бетонних призм включає безпосередньо бетонну призму, якій на різних стадіях аналізу задавалися різні моделі поведінки бетону і два силових елемента. Силові елементи задаються як сталеві плоскі пластини розміром $200 \times 200 \times 50$ мм.

Нижній елемент має тип кріплення Fixed Support з нульовими ступенями свободи. Верхній силовий елемент має кріплення Displacement з вільним переміщенням уздовж осі Y глобальної системи координат. Навантаження прикладається через верхній силовий елемент. Для підвищення збігу результатів навантаження прикладається в два кроки. Перший крок - до величини 40 кН, другий - до 51 кН.

Кількість підкроків ітерацій для кожного кроку програма вибирала автоматично. Параметри напружень і відносних деформацій досліджувалися в системі Static Structural, параметри абсолютних деформацій в системі Transient Structural.

Механічні характеристики матеріалів, використовуваних в розрахунках бетонних призм і залізобетонних балок наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Механічні характеристики використовуваних в розрахунках матеріалів

Параметр	Значення
Загальні параметри лінійної та нелінійної моделі бетону	
Модуль Юнга	3E+10, Pa
Коефіцієнт Пуасона	0,18000
Модуль об'ємного стиску	1,5625E+10, Pa
Модуль зсуву	1,2712E+10, Pa
Гранична міцність на стиск	2,5E+07, Pa
Гранична міцність на розтяг	2,1E+06, Pa
Загальні параметри для нелінійних моделей бетону	
Одноосьова гранична міцність на стиск	2,5E+07, Pa
Одноосьова гранична міцність на розтяг	2,1E+06, Pa
Двоосьова міцність на стиск	3,0E+07, Pa
Пластична відносна деформація при одноосьовому стиску	0,0015000
Максимальна ефективна пластична відносна деформація при стиску	0,0035000
Відносне напруження на початку нелінійного зміцнення	0,90000
Залишкове відносне стискуєче напруження	0,20000
Гранична відносна пластична деформація при розтягу	0,00015000
Граничне відносне напруження при розтягу	0,100000
Особливі параметри моделі Друккера-Прагера	
Розтягнута і стисло-розтягнута ділатансія	0,25000
Ділатансія стиску	1,0000
Особливі параметри моделі Менетрея-Вілема	
Кут ділатансії	10 Градусів
Енергія утворення тріщин	100,00, Дж/м ²

Лабораторні випробування бетонних призм проводилися відповідно до ГОСТ 24452-80. Результати випробувань наведені на рис. 2. Деформації бетону носять лінійний характер до навантаження 50 кН після чого приймають нелінійний характер. Руйнування призми відбулося при навантаженні 57 кН.

В результаті моделювання завантаження математичних моделей бетонних призм і залізобетонних балок отримані дані по напруженням і деформаціям. Розподіл еквівалентних еластичних (пружних) напружень в моделях наведено на рис. 5. З рисунку видно, що в нелінійних моделях бетону максимальні еквівалентні напруження безпосередньо перед руйнуванням не перевищують двохосової міцності на стиск і для МДП складають $2,62 \times 10^7$ Па, для ММВ – $2,89 \times 10^7$ Па. Для лінійної моделі відповідні напруження складають $3,49 \times 10^7$ Па, що значно перевищує межу міцності бетону. В усіх трьох моделях максимальні пружні напруження знаходяться на ребрах, що стикуються з силовими елементами. В порівнянні з ММВ, МДП в перетині має більш виражені області формування стиснутого бетонного ядра в місцях примикання до силових елементів.

На рис. 3. наведено ізоповерхні розподілу пластичних деформацій в нелінійних моделях бетону. В МДП ізоповерхні мають хрестоподібну форму з каплеподібними відгалуженнями. В ММВ ізоповерхні мають кубовидну структуру. Форма ізоповерхні МДП більшою мірою відповідає характеру руйнування бетонних призм.

На рис. 4 наведено графік залежності максимальних еквівалентних напружень від навантаження для різних типів моделей бетону. Добре помітно різний характер зміни напружень в нелінійній зоні роботи бетону.

Порізно проявляються і відносні деформації моделей призм, рис. 5-7. В МДП чітко видно момент утворення тріщин, при якому спостерігається падіння напружень. У ММВ цей ефект більш змазаний і відбувається при більших навантаженнях. Також в ММВ значно нижчі пластичні деформації. Ці дані говорять про те, що ММВ моделює більш жорсткий і крихкий характер поведінки бетону.

На рис. 8 показаний графік абсолютних поздовжніх деформа-

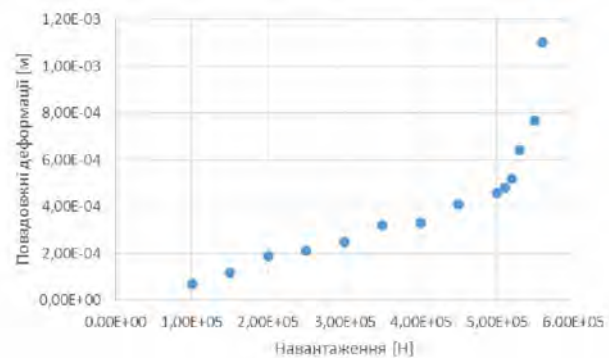


Рис. 2. Результати лабораторних випробувань бетонних призм

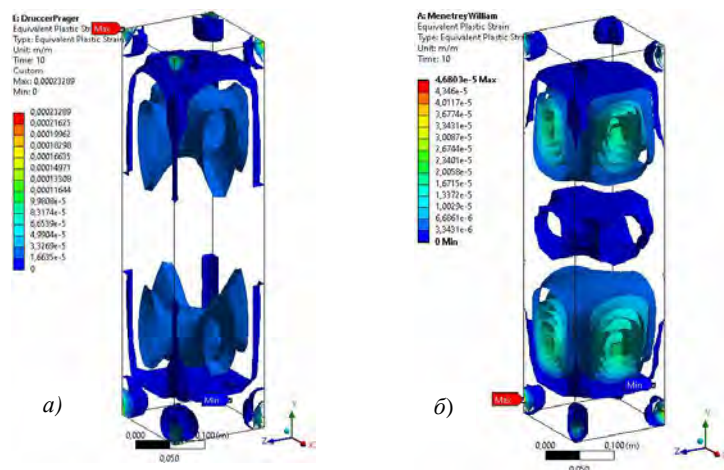


Рис. 3. Ізоповерхні пластичних деформацій математичних моделей призм: а – модель Друккера-Прагера; б – модель Менетрея-Вілема

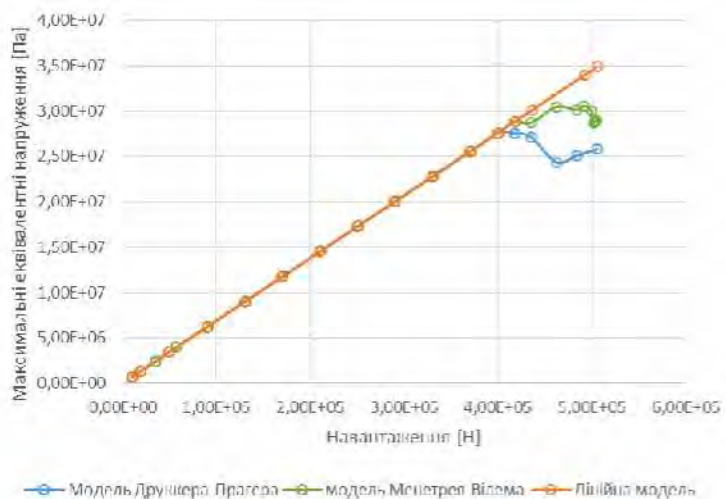


Рис. 4. Залежність максимальних еквівалентних напружень від навантаження в різних моделях бетону

цій призми збільшений в зоні переходу від лінійних деформацій до пластичних. При однаковому навантаженні, найбільші деформації має модель Друккера-Прагера. Ця модель також має найбільшу відповідність результатам лабораторних випробувань призми.

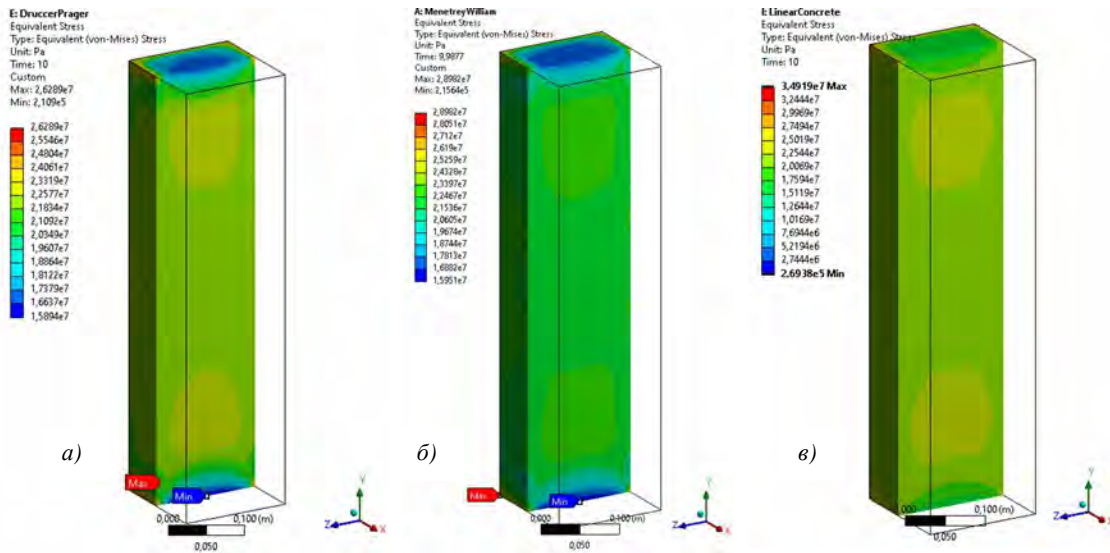


Рис. 5. Розподіл напружень в середньому перетині призми з різними моделями руйнування: а – модель Друккера-Прагера; б – модель Менетрея-Вілема; в – лінійна модель

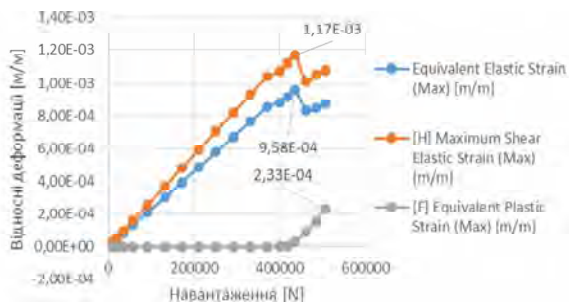


Рис. 6. Еквівалентні еластичні, пластичні і поперечні відносні деформації — модель Друккера-Прагера

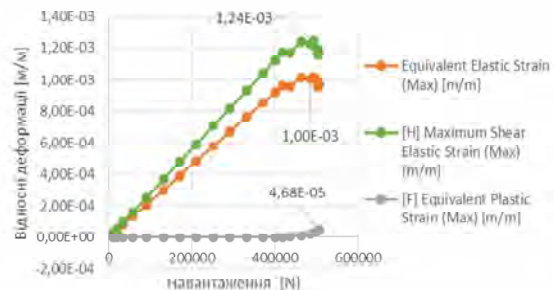


Рис. 7. Еквівалентні еластичні, пластичні і поперечні відносні деформації — модель Менетрея-Вілема

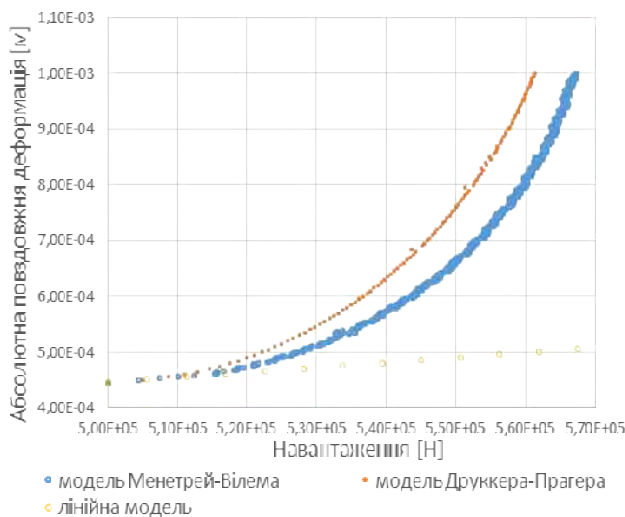


Рис. 8. Різниця в характері поздовжніх деформацій призми з трьома моделями поведінки бетону

Лінійна модель бетону, як і очікувалось дає достовірні результати лише в зоні лінійної поведінки бетону. Після того, як напруження перевищують граничні, лінійна модель починає давати хибні результати.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Результати досліджень показують, що при вірно вибраних вихідних параметрах може бути досягнута висока ступінь відповідності між результатами лабораторних випробувань і результатами отриманими з математичних моделей. При випробуваннях бетонних призми найбільшу відповідність проявила модель Друккера – Прагера. В цій моделі при однакових напруженнях досягаються більш високі деформації, а процес тріщиноутворення відбувається при менших

напруженнях. Лінійна модель бетону може бути застосована тільки для випадків пружної роботи бетону, але розрахунки для таких випадків простіше і скоріше виконувати в спеціалізованих пакетах «Ліра» і SCAD.

Подальші роботи необхідно проводити в напрямі досліджень спільної роботи бетону і арматури і перевірити відповідність роботи розглянутих моделей для бетону, що працює на розтяг.

Список літератури

1. Sakhno S., Liulchenko Y., Chyrva T., 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. Multi-authored monograph. — Sofia: Publishing House “St.Ivan Rilski”, 2020. , p. 326 — 340.
2. Дьячкова, А. А. Расчет усиления железобетонных плит углеродными композиционными материалами / А. А. Дьячкова, В. Д. Кузнецов // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 3. – С. 25 – 28.
3. Мурин, А. Я. Моделивання роботи залізобетонних балок, підсилених зовнішньою фібропластиковою арматурою, у програмному комплексі «Ліра» /А. Я. Мурин, М. М. Іванів // Вісник Львівського національного аграрного університету. –2012. – №13. – С. 94 – 98.
4. Antonio F. Barbosa and Gabriel O. Ribeiro Analysis of reinforced concrete structures using ansys nonlinear concrete model. https://www.researchgate.net/publication/2584814_Analysis_Of_Reinforced_Concrete_Structures_Using_Ansys_Nonlinear_Concrete_Model
5. Diyyala N., Reshma V., P. Polu Raju Modelling and analysis of reinforced concrete beam under flexure using ANSYS, International Journal of Civil Engineering and Technology, Volume 8, Issue 3, March 2017, pp. 1103–1111 Article ID: IJCIET_08_03_113
6. T. Subramani, R. Manivannan, M. Kavitha Crack Identification in Reinforced Concrete Beams Using ANSYS, T. Subramani et al Int. Journal of Engineering Research and Applications, Vol. 4, Issue 6(Version 6), June 2014, pp.133-141
7. Babu R.R., Benipal G.S. & Singh A.K.: “Constitutive modelling of concrete an overview”. *Asian Journal of Civil Engineering (Building and Housing)*. 6(4): 211-246, 2005.], [Camanho P.P, Davila C.G & Ambur D.R.: “Numerical simulation of delamination growth in composite material”. NASA-TP-211041, 2001.
8. Cruz J.S., Barros J. & Azevedo A.: “Elasto-plastic multi-fixed smeared crack model for concrete”. Report 2004.
9. Hsu T.T.C. & Zhu R.R.H.: “Softened membrane model for reinforced concrete elements in shear”. *ACI Structural Journal*. 99(4): 460-469, 2002.
10. Yang Z.J., Chen J.F. & Proverbs D.: “Finite Element Modelling of Concrete Cover Separation Failure in FRP Plated RC Beams”. *Construction and Building Materials*. 17(1): 3-13, 2003.
11. Chaudhari, S.V.; Chakrabarti, M.A. Modeling of concrete for nonlinear analysis using finite element code ABAQUS. *Int. J. Comput. Appl.* 2012, 44, 14–18.
12. Jirásek, M. Damage and Smeared Crack Models. In *Numerical Modeling of Concrete Cracking*; Hofstetter, G., Meschke, G., Eds.; CISM International Centre for Mechanical Sciences, Springer: Vienna, Austria, 2011; Volume 532.

Рукопис подано до редакції 16.03.2020

УДК [624.046.5:622.012]:536.75

Д.В. БРОВКО, д-р техн. наук, доц.,

В.В. ХВОРОСТ, В.В. КОНОНЕНКО, кандидати техн. наук, доценти

Криворожский национальный университет

ПОСТРОЕНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕМЕНТОВ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО КОМПЛЕКСА ШАХТ НА БАЗЕ ОЦЕНКИ ЭНТРОПИИ

Цель. Построение научно обоснованной методологии диагностики технического состояния, оценки надежности и степени физического износа для зданий и сооружений шахтного комплекса с использованием математического аппарата и вероятностно-статистических методов технической диагностики и методов теории информации.

Методы. Использование общенаучных методов исследования: статистических, теории вероятностей, теории информации, моделирования, формализации, анализа (в том числе ретроспективного) – при построении решения на уровне отдельных конструктивных элементов; основных принципов организации систем и системного анализа – при построении модели диагностирования.

Научная новизна. Научная новизна предложенного в работе метода – адекватное описание оценки и анализа надежности выполнения работ при обследовании и реконструкции промышленных объектов шахт с учетом представления результатов выполнения работ в виде статистических данных с учетом математического моделирования возможных дефектов.

Практическая значимость. Состоит в реализации метода анализа в практической обследовательской деятельности, что придаст уверенность эксперту при определении технического состояния объекта, позволит обоснованно определить комплекс мероприятий, и эффективно планировать эксплуатационные расходы и затраты на приведение объекта в исправное состояние. Предложенная методика диагностирования может быть использована при создании современных нормативных документов по оценке состояний, надежности и физического износа рассматриваемых зданий на основе единого вероятностного подхода.

Результаты. Предложенная методика определения надежности эксплуатируемых зданий и сооружений поверхности может быть использована на практике для оценки вида технического состояния и безопасного остаточного ресурса.

Получены расчётные значения как энтропии (H) так и дивергенции Кульбака-Лейблера для оценки "живучести" элементов конструкции показали, что с ростом воздействия коррозии значение первой (H) растёт, а второй величины (D_{KL}) уменьшаются, что свидетельствует об износе элементов конструкции так и системы в целом.

Ключевые слова: объекты поверхности шахт, надёжность, дивергенция Кульбака-Лейблера, живучесть, распределение, напряжения, предел прочности.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-73-83

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Качество выполнения работ реконструкции промышленных объектов шахт - это максимально возможное устранение выявленных дефектов. Обследование сооружений поверхности – процедура определения их технического состояния. На основе результатов (фактических значений контролируемых параметров) технического обследования здания или иного сооружения можно оценить пригодность объекта для дальнейшей эксплуатации, реконструкции или определить необходимость в восстановлении, усилении, ремонте элементов конструкций. Эта задача огромной важности, так как не выявленные дефекты проявляются в виде аварийных ситуаций в процессе эксплуатации промышленных объектов шахт [21].

Современные научные и производственные представления, на которых базируется большинство методик определения фактического состояния конструктивных элементов объектов поверхности шахт, опираются на стандартные представления. При этом разработка и внедрение новых методик, основанных на комплексном определении фактического состояния объекта, позволяет продлевать их безопасную эксплуатацию.

Анализ исследований и публикаций. Как отмечено выше, для решения задач по определению достоверной картины технического состояния, надежности и износа конструктивных элементов и здания в целом, а также для приведения в современный и согласованный вид нормативной литературы, существующей в обследовательской деятельности, впервые предлагается использовать математический аппарат технической диагностики, основанный на вероятностно-статистических методах с включением в процедуру диагностирования элементов теории информации [21].

В работе для диагностики конструктивных элементов использовались статистические методы такие как метод Байеса, процедура применения которого для сложных технических систем отображена в трудах И. А. Биргера, А. Зельнера.

В своих работах И. А. Биргер совершенно справедливо отмечает, что конечной целью технической диагностики является повышение надежности и ресурса систем, а техническую диагностику вообще следует рассматривать как один из основных разделов общей теории надежности. Таким образом, техническое состояние и его главный признак – надежность, следует рассматривать как процесс, обеспечивающий создание и поддержание нормальных условий функционирования зданий и сооружений на современном уровне [21].

Проблемы надежности строительных конструкций на основе вероятностных подходов рассмотрены в работах многих ученых, среди которых можно отметить труды В.В. Болотина, С.Л. Буторина, Б.А. Гарагаша, А.П. Кудзиса, О.В. Лужина, В.Д. Райзера, А.Р. Ржаницына, А.Г. Ройтмана, Н.Н. Складнева, Б.И. Снарскиса, С.А. Тимашева, В.С. Уткина, С.Г. Шульмана, Г.С.Шульмана и других авторов. Значительная роль в развитии теории надежности принадлежит также и зарубежным ученым: Г. Аугусти, А. Баратта, Ф. Кашиати, А.М. Фрейденталь, Г. Шпете и др. [21].

В данной работе представлена методика использования вероятностно-статистического подхода при оценке технического состояния строительных конструкций и систем в целом.

Постановка задачи. Оценка технического состояния элементов конструкций зданий и сооружений проводится путем сопоставления предельно допустимых (расчетных или нормативных) и фактических значений величин, характеризующих прочность, устойчивость, деформативность и другие эксплуатационные характеристики конструкций. При проектировании объектов поверхности их эксплуатационные характеристики являются заданными, это обеспечивается путем введения различных коэффициентов надежности. Поэтому физический износ конструктивных элементов и объекта в целом не моделируется. Практически довольно сложно на стадии проектирования определить будущие затраты по обеспечению надежной эксплуатации здания.

Выполнить ретроспективный анализ результатов обследований прошлых лет, сбор, обработку и обобщение информации по состояниям (диагнозам) и характерным повреждениям (диагностическим признакам), и разработать методики на основе процедур вероятностно-статистического аппарата технической диагностики и элементов теории информации, позволяющую оценивать не только состояние, но и надежность, а также физический износ всех структур всех уровней.

Изложение материала и результаты. За время эксплуатации поверхностного комплекса шахт Криворожского железорудного бассейна произошёл ряд аварий и катастроф, которые были вызваны разрушениями конструкций горнотехнических сооружений. Характерный архитектурно-строительный облик современных горных предприятий определяется прежде всего наличием таких сооружений на поверхности как башенные копры значительной высоты, эстакадные мосты, соединяющие здания различного назначения, стальные укосные копры, аккумулирующие или погрузочные бункера, обогатительные фабрики, административно-бытовые комбинаты современной архитектуры.

Здания и сооружения, образующие поверхность горного предприятия как единую промышленную площадку, классифицируются по следующим основным признакам: функциональным; архитектурным; конструктивным; по капитальности и огнестойкости.

По функциональному назначению здания и сооружения подразделяются на следующие основные группы: производственные, служащие для размещения основных видов производства (укосные и башенные копры, предназначенные для выдачи полезных ископаемых и породы на поверхность; бункера, служащие для хранения и погрузки полезных ископаемых; обогатительные фабрики, предназначенные для обработки полезных ископаемых и т. д.); вспомогательные (механические и ремонтные мастерские; склады различного назначения; административно-бытовые комбинаты, в которых размещаются бытовые помещения, помещения управлений, общественного питания, здравоохранения, культурного обслуживания и т.д.); энергетические, обеспечивающие снабжение горного предприятия электроэнергией, паром, сжатым воздухом (ТЭЦ, котельные, здания и сооружения электроподстанций, распределительных устройств, компрессорные и т. д.); транспортные (галереи, разгрузочные эстакады, гаражи и т. д.); санитарно-технические, предназначенные для обслуживания систем водопровода и канализации на горном предприятии (водозаборные и очистные сооружения, насосные, отстойники шахтных вод и т.д.).

По признакам формирования и совершенствования проектных решений, организации и технологии строительства горнотехнические здания и сооружения делятся на две группы:

А-здания и сооружения, связанные с основным производственным процессом (добычей, переработкой и погрузкой полезного ископаемого);

Б-здания и сооружения производств вспомогательного назначения, обслуживающих основные процессы, а также санитарно-бытовых служб, предприятий общественного питания, здравоохранения, культурного обслуживания, управления, конструкторских бюро, сооружений водопроводов, канализации, тепло- и электроснабжения, здания заводов машиностроения и баз стройиндустрии.

Принципы компоновки и основные параметры зданий и сооружений группы А и Б различны.

Для зданий и сооружений группы А доминирующим фактором при определении их параметров и габаритов является технологическая схема. Основные производственные здания на поверхности горных предприятий отличаются ярко выраженной индивидуальностью, отражающей специфику предприятий горной промышленности: наличие крупногабаритного оборудования, большие статические и динамические нагрузки, высотное расположение оборудования, воздействие депрессии или компрессии, повышенная взрыво- и пожароопасность и т. д. Это,

как правило, многоэтажные здания и сооружения с нестандартным шагом вертикальных несущих конструкций.

Объемно-планировочные и конструктивные решения зданий и сооружений группы Б в меньшей степени зависят от специфики горных предприятий. Главным фактором при определении их параметров и габаритов является унификация строительных конструкций. Это, как правило, одноэтажные здания, за исключением административно-бытовых комбинатов и блочно-комплектных, выделенных в отдельные подгруппы. Характерной особенностью зданий группы Б является то, что при их проектировании и строительстве широко используются типовые конструкции и типовые проекты межотраслевого назначения.

Группа А включает в себя четыре подгруппы, классифицированные по технологическим признакам. При этом объемно-планировочные и конструктивные решения зданий и сооружений подгрупп существенно отличаются друг от друга. Группа Б включает в себя также четыре подгруппы, здания и сооружения в которых классифицированы по архитектурно-конструктивным признакам.

А-1 Надшахтные здания и сооружения - копры и приствольные здания

А-2 Здания и сооружения по переработке полезных ископаемых горных предприятий и обогатительных фабрик – дробильно-сортировочные отделения, главные, сушильные, фильтр-прессовые корпуса, радиальные сгустители

А-3 Сооружения погрузочно-складских комплексов горных предприятий и обогатительных фабрик - приемные устройства, вагоно-опрокидыватели, погрузочные, дозировочные, аккумулирующие бункеры, погрузочные пункты, аварийные, усреднительные склады, прочие складские помещения сыпучих материалов и др.

А-4 Сооружения конвейерного, железнодорожного, автомобильного, трубопроводного транспорта

Б-1 Одноэтажные каркасные здания из типовых конструкций (сборных железобетонных и металлических) - вентиляторные, насосные, депо, гаражи, цеха, машзаводы, базы стройиндустрии и др.

Б-2 Многоэтажные, каркасные и каркасно-панельные здания из типовых сборных железобетонных конструкций-АБК, столовые и др.

Б-3 Типовые межотраслевые здания и сооружения из сборных железобетонных и металлических конструкций- объекты теплоснабжения, электроснабжения, водоснабжения, канализации и др.

Б-4 Блочно-комплектные здания и встроенные помещения производственного и служебно-бытового назначения.

А-здания и сооружения, связанные с основным производственным процессом (добычей, переработкой и погрузкой полезного ископаемого).

А-1 – копры.

А-2 Надшахтные здания и сооружения.

А-3 здания подъёмных машин и дробильно-сортировочные.

А-4 галереи и эстакады.

Б-здания и сооружения производств вспомогательного назначения, обслуживающих основные процессы.

Большинство сооружений шахтной поверхности имеет срок эксплуатации более 30-40 лет и подверглись значительному физическому износу. Переход конструкций в предельное состояние создаёт угрозу для жизни и здоровья технического персонала шахты. Существующие в настоящее время нормативные методики определения технического состояния конструкций имеют характер общих методических указаний и в достаточной мере не учитывают характер действительной работы этих сооружений. В связи с этим оперативное выявление аварийных состояний службами технической эксплуатации и инженерным составом специализированных организаций весьма затруднительно, а в ряде случаев невозможно, поскольку очаги физического износа конструкций, как правило, находятся в недоступных и труднодоступных местах.

В Криворожском национальном университете систематически выполняются работы по технической диагностике, усилению и реконструкции строительных конструкций горнотехнических сооружений шахтной поверхности [3]. Всего к настоящему времени накоплены диагности-

ческие данные по семи основным предприятиям «ВостГОК», «СевГОК», «КЖРК», «СУХА БАЛКА», «ЦГОК», «ЮГОК», «ИнГОК».

Для наглядного рассмотрения сложившейся ситуации на исследуемых объектах, дальше приведем картину в виде графиков развития интенсивности дефектов во времени.

На рис. 1 представлено описание эмпирических значений развития дефектов для элементов копров и надшахтных зданий во времени. В первые 35-38 лет наблюдаем равномерное развитие дефектов по всем элементам, без возникновения прогрессирования прыжков. Далее до 57 года эксплуатации наблюдается скачкообразное развитие дефектности конструкций уже по основным группам элементов. После 60 лет наблюдаем резкое увеличение.

Выделяются три группы элементов - подкопровая рама, станок, укосина. Особенно вызывают удивление элементы укосины. Но это может быть связано с неправильным отношением к значимости этой группы при эксплуатации

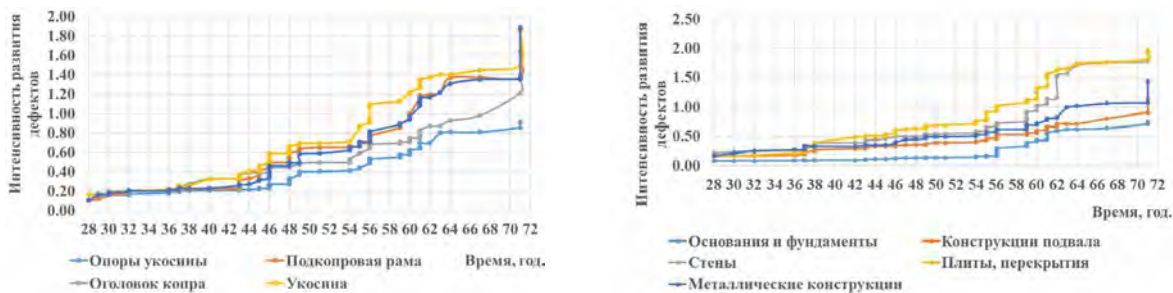


Рис. 1. Распределение коррозионных процессов элементов копров и надшахтных зданий во времени

На рис. 2 представлено описание эмпирических значений развития дефектов для элементов машинных зданий (сортировки) галерей и эстакад во времени. Здесь, как и в предыдущем случае, в первые 35-38 лет наблюдаем равномерное развитие дефектов по всем элементам, без возникновения прогрессирования прыжков. Далее до 57 года эксплуатации наблюдается равномерное развитие дефектности конструкций уже по основным группам элементов. После 57 лет наблюдаем резкое увеличение. Выделяются две группы элементов - перекрытия и стены. Также в зоне риска находятся металлические конструкции.

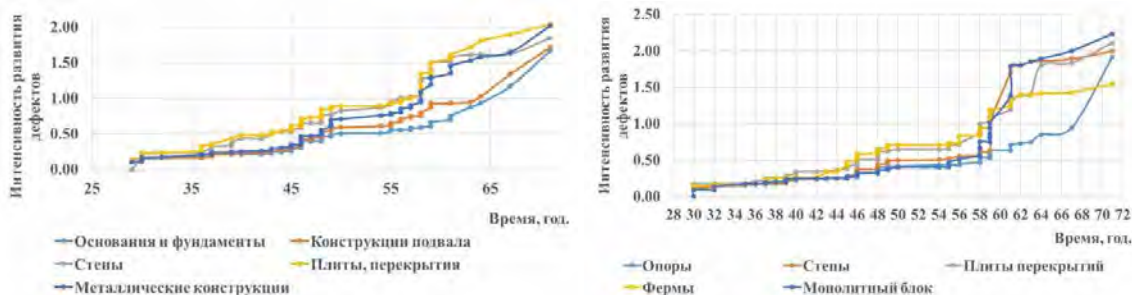


Рис. 2. Распределение коррозионных процессов элементов машинных зданий (сортировки) галерей и эстакад во времени

На рис. 3. представлено описание эмпирических значений развития дефектов для элементов вспомогательных зданий во времени. Здесь, как и в предыдущих случаях, в первые 35-38 лет наблюдаем равномерное развитие дефектов по всем элементам, без возникновения прогрессированная прыжков. Далее до 57 года эксплуатации наблюдается равномерное развитие дефектности конструкций уже по основным группам элементов. После 57 лет наблюдаем резкое увеличение. Уже выделяются три группы элементов - перекрытия, стены и металлические конструкции.

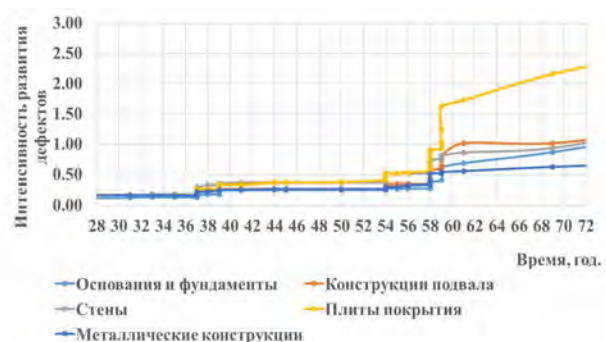


Рис. 3. Распределение коррозионных процессов элементов вспомогательных зданий во времени

Для установления основных закономерностей физического износа использовались следующие методы: для выявления характерных эксплуатационных повреждений и зонирования конструкций применялся факторный анализ в виде последовательных двухсторонних классификаций [4]; для определения условных скоростей коррозионного и абразивного износа элементов металлических конструкций применялись статистические методы обработки диагностических данных [4]; для определения скоростей коррозии в характерных точках применялись ускоренные лабораторные испытания [5, 6]; для оценки влияния эксплуатационных повреждений применялся метод анализа разрушения упругопластических систем [7].

В сложных системах, отказ даже одного элемента может привести к исключительно серьезным последствиям. Поэтому основной задачей является выбор наилучших конструктивных и механических параметров системы с учетом таких факторов, как стоимость, надежность, вес и объем. Для достижения этой цели необходимо проведение оценки надежности элементов на этапе проектирования [22].

В основу расчетов надежности заложено то, что каждый элемент обладает определенной прочностью по отношению к нагрузкам.

Обычный способ проектирования, основанный на применении таких весьма произвольных коэффициентов, как коэффициент безопасности и запас прочности, не позволяет судить о вероятности отказа элемента. Кроме того, даже при одном и том же коэффициенте безопасности вероятность отказа может колебаться в весьма широких пределах.

Использование коэффициента безопасности оправдано только в том случае, когда его значение задано на основе большого опыта применения элементов, аналогичных рассматриваемому. Кроме того, конструктивные параметры часто являются случайными величинами, что полностью игнорируется при обычных методах проектирования [22].

Ясно, что обычный детерминистский подход к проектированию не является удовлетворительным с точки зрения анализа надежности.

Поэтому необходима другая методика проектирования, которая учитывала бы вероятностный характер конструктивных параметров, с тем, чтобы надежность элементов можно было оценивать на этапе проектирования [22].

В этом случае в явном виде задаются все конструктивные параметры, которые в свою очередь определяют распределения напряжения и прочности. Если оба эти распределения определены, то можно вычислить вероятность безотказной работы элемента (рис. 4).

При этом под мерой надежности понимается вероятность того, что максимальное напряжение, возникающее под действием нагрузки, не превысит несущей способности (прочности) элемента [1], т.е.

$$H = P(R > S). \quad (1)$$

где H – надежность; P – вероятность события; R – несущая способность; S – действующее максимальное напряжение.

В общем случае

$$P(R > S) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(S) \cdot f(R) dR dS. \quad (2)$$

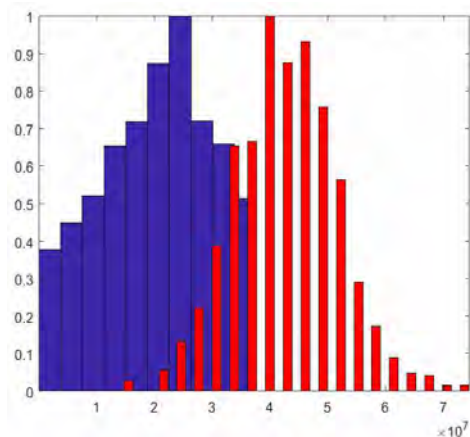


Рис. 4. Статистические распределения плотности вероятности предела прочности стали (синяя гистограмма), и действующие распределение напряжений в стержнях (красная гистограмма)

С использованием этого выражения можно вычислить вероятность безотказной работы элемента при различных сочетаниях законов распределения несущей способности и нагрузки. Например, в случае нормального распределения нагрузки и несущей способности вероятность безотказной работы определяется выражением

$$P(R > S) = \frac{1}{2} + F \left(\frac{m_R - m_S}{\sqrt{s_R^2 + s_S^2}} \right) \quad (3)$$

где $\Phi()$ – нормированная функция Лапласа; m_R и m_S – математическое ожидание величин R и S , соответственно; σ_R и σ_S – среднее квадратическое отклонение величин R и S , соответственно.

В реальных ситуациях несущая способность элемента и его долговечность зависит от геометрических размеров, характеристик материала и влияющих факторов (на рис. 5, в качестве примера, представлено распределение действующих напряжений в конструктивных узлах на отметке 54 башенного копра шахты Юбилейная). Если геометрические параметры являются детерминированными величинами, то характеристики материала элемента носят случайные величины с заданными законами распределения, проявление и интенсивность внешних факторов в большинстве случаев носит стохастический характер, что не дает возможность описать их как теоретически, так и эмпирически.

В связи с этим протекающие случайные процессы резонно заменить срезами одномерных случайных величин.

Из выше рассмотренного следует, что основу системы надежности положены статистические методы, оперирующие параметрами функции распределения, которые описывают как нагруженное состояние конструктивных элементов, так и изменение во времени (рис. 6).

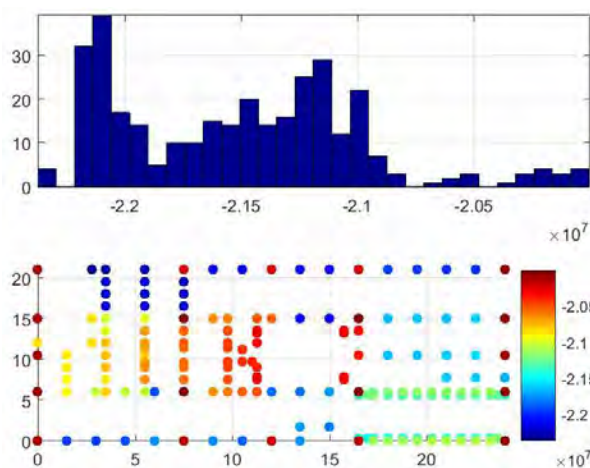


Рис. 5. Распределение действующих напряжений в конструктивных узлах на 54 отм башенного копра шахты «Юбилейная»

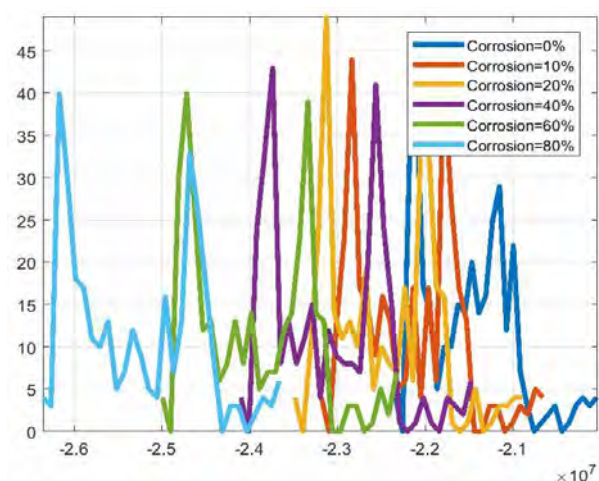


Рис. 6. Графическое представление распределения напряжений узлах элементов на 54 отм., башенного копра шахты «Юбилейная» и изменения напряжений в зависимости от действия коррозии

Надежность объекта зависит от технического состояния групп однотипных элементов, образующих всю систему здания.

Скелет здания со временем приобретает иерархическую систему дефектов с многоступенчатыми, последовательными повреждениями.

С точки зрения теории связи и информации, принятый вид информационной энтропии должен удовлетворять требованиям независимости сообщений при их многоступенчатом поступлении. Если количество разрушенных связей между структурными элементами принять как количество сигналов от этих связей, то открывается принципиальная возможность использования формулы информационной энтропии H , по К.Э. Шеннону.

В этом случае процесс постепенного изменения состояния элементов конструкций можно описать по формуле, показывающей величину (степень) неопределенности при многоступенчатом независимом сообщении со многих источников.

Для установления основных закономерностей физического износа использовались следующие методы:

- факторный анализ в виде последовательных двусторонних классификаций;
- корреляционно-регрессионный анализ.

Установлено, что зависимость интенсивности развития дефектов (рис. 7) описывается степенной функцией

$$y = 2 \times 10^{-5} x^{2.64},$$

коэффициент детерминации ($R^2=0.9665$) указывает на высокий уровень адекватности данной зависимости.

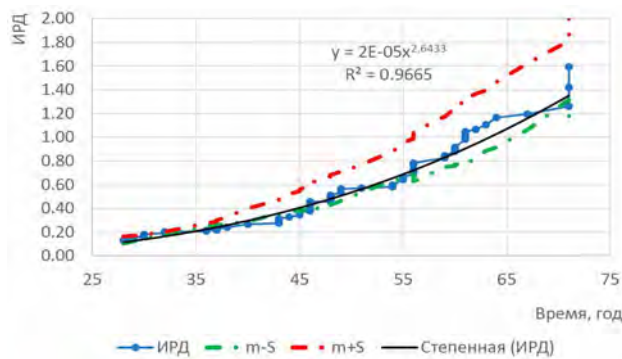


Рис. 7. Интенсивность развития дефектов конструктивных элементов группы А-1 со временем эксплуатации

Приняв математическое ожидание возникновения дефекта равное нулю, определим среднее квадратическое отклонение значений S_X , что позволит вычислить дифференциальную и полную энтропию для значений непрерывной величины, учитывая, следующие

$$P(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} S_X} e^{-\frac{X^2}{2S_X^2}}; h_X = \log \sqrt{2\pi} S_X$$

где S_X – среднее квадратическое отклонение значений измеряемой величины X .

Полная энтропия при нормальном законе распределения, с учетом погрешности, равна

$$H_X = h_X - \log \Delta X = \log \frac{\sqrt{2\pi} S_X}{\Delta X} = \log \frac{4,12 S_X}{\Delta X}$$

На основании полученной информации построены графические зависимости, показывают динамику изменения информационной энтропии (рис. 8).

График на рис. 8 характеризует рост степени неопределенности технического состояния здания в зависимости от величины среднего квадратического отклонения. Последняя величина находится в обратной зависимости к оценке надежности объекта, и по сути является законом деградации строительного объекта.

Для практического применения теоретическая кривая, показанная на рис. 9 для всех групп объектов поверхности, будет разделена на четыре линейные участки, на стыке которых скорость энтропии скачкообразно меняется. Известно, что всякое изменение скорости энтропии информирует об изменении технического состояния объекта.

Вторым показателем оценки "живучести элемента", который основывается на фактической и заданной плотности вероятностного распределения предела прочности, в качестве меры принимаем расстояние [Кульбака-Лейблера](#).

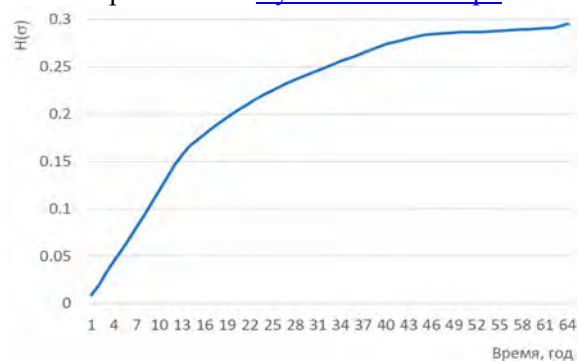


Рис. 8. Интенсивность развития дефектов конструктивных элементов группы А-1 со временем эксплуатации

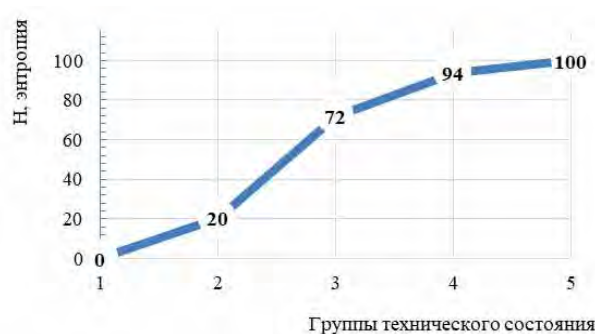


Рис. 9. Скорость энтропии в элементах копра при изменении технического состояния объекта

Расстояние (расхождение) Кульбака-Лейблера (РКЛ) или относительная энтропия $H(P||Q)$ - это неотрицательный функционал, являющийся несимметричной мерой удалённости друг от друга двух вероятностных распределений, определённых на общем пространстве элементарных событий.

Для дискретных вероятностных распределений P и Q с числом элементарных событий n расхождение Кульбака-Лейблера распределения Q относительно распределения P определяется как

$$D_{KL}(P||Q) = \sum_{i=1}^n p_i \log \frac{p_i}{q_i} \quad (4)$$

Основание логарифма в этой формуле существенной роли не играет. Его выбор позволяет зафиксировать конкретный вид функционала из семейства эквивалентных функционалов и равносителен выбору единицы измерения расхождения Кульбака–Лейблера (подобно ситуации с вычислением энтропии), поэтому возможно применение логарифма с любым основанием, большим единицы. Расхождение Кульбака–Лейблера является безразмерной величиной независимо от размерности исходных случайных величин.

В связи с тем, что формы идентифицированных законов изменяются как по высоте, так и от конструктивных особенностей высотной отметки. Так же установлено, что деградация формы закона происходит во времени и связана с такими процессами как коррозия, механический износ и накопление других повреждений. Поэтому для оценки остаточного ресурса как системы в целом так и составных ее элементов предпочтительно использовать не чувствительные к закону распределения методы оценки, то есть использовать непараметрические показатели такие как дивергенция Кульбака–Лейблера (D_{KL}), что более предпочтительней чем метод Байеса.

В ходе проведенного анализа получены расчётные значения дивергенции Кульбака–Лейблера для оценки "живучести" элементов конструкции (табл. 1).

Установлено, что с ростом воздействия коррозии значение D_{KL} уменьшаются. Таким образом, можно видеть, что параметрическая оценка расстояния Кульбака–Лейблера в случае максимального значения $D=14.03$, соответствует расчетному (проектному) значению, тогда как минимальное ($D=0.468$) соответствует максимальному воздействию коррозии $K=80\%$, что соответствует минимальному уровню надежности конструктивного элемента. Графическое представление изменения дистанции Кульбака–Лейблера под действием процессов коррозии в элементах представлено на рис. 10.

Таблица 1

Зависимость D_{KL} от влияния коррозии

Коррозия, %	Дивергенция Кульбака–Лейблера (D_{KL})
0	14.03
20	8.659
40	4.616
60	1.885
80	0.468

Связано это с тем, что происходит смещение закона распределения напряжений в элементах в сторону закона распределения предела прочности (рисунок. на рисунке представлены графики теоретических плотностей распределения вероятностей, соответствующие выбранным модельным выборкам (красная линия - предел прочности, соответствует плотности нормального распределения; синяя - распределение напряжений в элементах конструкции, плотность распределения "сложного" закона устанавливается на первом этапе алгоритма), а это приводит к уменьшению расстояния между законами распределений и снижению остаточного предела прочности как элемента так и системы в целом.

Совместим графическое представление изменения дистанции Кульбака–Лейблера под действием процессов коррозии с графическим представлением скорости энтропии в элементах объекта в целом при изменении технического состояния объекта (рис. 11). Пересечение данных энтропийных зависимостей является – критической точкой прохождения объектом предельных состояний деградации. После ее прохождения начинаются необратимые дефектные процессы в элементах конструкций. При не устранении дефектов, объект переходит в опасное аварийное состояние и вследствие чего происходят необратимые, а часто и непредсказуемые, процессы деградации.

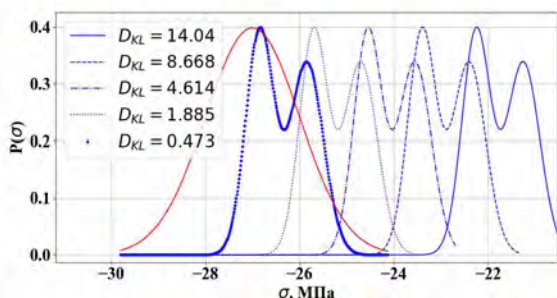


Рис. 10. Графическое представление изменения дивергенции Кульбака–Лейблера под действием процессов коррозии



Рис. 11. Графическое представление определения предельных состояний в элементах копра для принятия решения

Следует отметить, что если по истечению ресурса ремонтно-восстановительные мероприятия на объекте не будут проведены, то наступает период повышенной аварийности, а следовательно, к повышению убытков, которые будут несравненно превышать номинальную стоимость предупредительных мероприятий.

Предложенная методика на основе энтропии для оценки конструктивной безопасности эксплуатируемых зданий может быть использована на практике для оценки надежности и технического состояния остаточного ресурса.

Выводы и направление дальнейших исследований. Для решения задач по определению достоверной картины технического состояния, надежности и износа конструктивных элементов и сооружения в целом, впервые разработаны методы использования аппарата технической диагностики, основанного на вероятностно-статистических методах (методе Байеса, методах статистических решений) с включением в процедуру диагностирования необходимых понятий теории информации.

Результаты численного решения при выполнении вероятностного анализа технического состояния всех элементов показали эффективность предложенной методологии диагностирования. Характерной особенностью предложенного алгоритма анализа является то, что он не базируется на привязке к конкретному закону распределения.

Получены расчётные значения как энтропии (H) так и дивергенции Кульбака-Лейблера для оценки "живучести" элементов конструкции показали, что с ростом воздействия коррозии значение первой (H) растут, а второй величины (D_{KL}) уменьшаются, что свидетельствует об износе элементов конструкции так и системы в целом.

Список литературы

1. **Бровко Д. В.** Вероятностный подход при независимом многоступенчатом поступлении сигналов о дефектах элементов промышленных объектов на поверхности шахт / **Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Гірничий вісник ДВНЗ «Криворізький національний університет». – 2015. – №100. – С. 62–67.
2. **Brovko, D. V.** System analysis of the accident risk of surface mining objects as a basis for their safe operation. / **D. V. Brovko, V. V. Khvorost** // Computer Science, Information Technology, Automation, 2016. –No4, p.p. 20-24.
3. **Andreev, B. M.** Prediction and ensuring the reliability of buildings elements and structures of surface complex at reconstruction. / **B. M. Andreev, D. V. Brovko, V. V. Khvorost** // Metallurgical and Mining Industry, 2016. –No9. pp. 54-57.
4. **Brovko, D. V.** Dynamics of structures of mining enterprises as one of the components in determining their technical condition. / **D. V. Brovko, V. V. Khvorost** // International Scientific Journal Acta Universitatis Pontica Euxinus Special number, 2016.
5. **Андрєєв Б. М.** Забезпечення надійності поверхневого комплексу методом прогнозування технічного стану елементів будівель і споруд / **Б. М. Андрєєв, Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Вісник Криворізького національного університету. – 2016. – №41. – С. 87–92.
6. Globalna aspekty Ekonomii Światowej i Stosunków Międzynarodowych w warunkach niestabilności gospodarczej: monografia Międzynarodowej Konferencji Naukowo-Praktycznej, Częstochowa, Akademia polonijna, 2016. – 897 s.
7. **Бровко Д. В.** Дослідження конструкцій металевого арочного кріплення в умовах криворізького залізорудного басейну. / **Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. - Днепропетровск: ИГТМ НАНУ. – 2015. – №123. – С. 99–106.
8. **Бровко Д. В.** Визначення надійності шахтних будівель та споруд в умовах обмеженої інформації / **Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Щомісячний науковий журнал «Smart and Young». – 2016. – №3. – С. 152-157
9. **Бровко Д. В.** Оценка риска надежности конструкций эксплуатируемых объектов горнопромышленного предприятия / **Б. Н. Андреев, Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Сборник научных трудов: БНТУ. – Минск, 2013. – т.1. – С. 180–190.
10. **Андрєєв Б. М.** Визначення надійності та обґрунтування параметрів об'єктів на поверхні шахт з урахуванням переходу на полегшені огорожувальні конструкції / **Б. М. Андрєєв, Д. В. Бровко, В. В. Хворост.** // Metallurgical and Mining Industry. – Днепропетровск, 2015. – №12. – С. 378–382.
11. **Brovko D. V.** Qualimetric assessment in calculation of the survivability level of the mine surface objects. / **D. V. Brovko, V. V. Khvorost, V. Yu. Tyshchenko** //Scientific Bulletin of the National Mining University. - Dnipro, 2018 - No. 4, p.p. 66-71. doi: 10.29202/nvngu/2018-4/14
12. **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
13. **Капырин Р.** The procedural approach to reliability of objects of the raised level of responsibility. / **Р. Капырин, N. Sevryugina**// IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 21st International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering: Construction - The Formation of Living Environment, FORM 2018, Volume 365, Issue 4. - pp. 1-10. DOI: 10.1088/1757-899X/365/4/042018
14. **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. Volume 73. - pp. 184-198. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.11.004

15. Fenton G.A. Reliability-based geotechnical design in 2016 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
16. 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
17. Stupnik N. Features of underlying levels opening at "ArsellorMittal Kryvyi Rih" underground mine. / N. Stupnik, V. Kalinichenko, S. Pismennij, E. Kalinichenko // New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining, 39–44.
18. Fedko M.B. Determination of drilling and blasting parameters considering the stress-strain state of rock ores. / M.B. Fedko, I.O. Muzyka, S.V. Pysmennyi, O.V. Kalinichenko // Naukovi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu, 2019. Volume 1, 37–41. DOI: [10.29202/nvngu/2019-1/20](https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/20)
19. Stupnik N. The research of strain-stress state of magnetite quartzite deposit massif in the condition of mine "Gigant-Gliboka" of central iron ore enrichment works (CGOK). / N. Stupnik, V.O. Kalinichenko, O.V. Kalinichenko, I.O. Muzyka, S. Pismennij, M.B. Fed'ko // Metallurgical and mining industry, 2015. Volume 7, 377-383.
20. Kalinichenko V. Selective underground mining of complex structured ore bodies of Kryvyi Rih Iron Ore Basin. / V.O. Kalinichenko, S. Pismennij, N. Shvaher, O. Kalinichenko // E3S Web of Conferences, 60, art. no. 00041 DOI: [10.1051/e3sconf/20186000041](https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000041).
21. Соколов В. А. Вероятностный анализ технического состояния и надежности строительных конструкций зданий старой городской застройки: дис. докт. техн. наук : 05.23.01 / Соколов Владимир Алексеевич – Санкт-Петербург, 2016. – 497 с.
22. Смирнов А.А. Методические указания по лабораторной работе по курсу "Надежность" для студентов каф. "Колесные машины" / А.А. Смирнов. – Москва: МГТУ им. Н.Э. Баумана. , 2017. – 15 с

Рукопись поступила в редакцию 17.03.2020

УДК 622.73:622.7.016

Д. В. ШВЕЦЬ, ст. викладач
Криворізький національний університет

СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ ПОДРІБНЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ З УРАХУВАННЯМ ЇЇ ХІМІКО-МІНЕРАЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НА РУДОЗБАГАЧУВАЛЬНИХ ФАБРИКАХ

Мета. Розробка математичної моделі технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках з метою подальшого синтезу системи управління технологічного процесу подрібнення.

Метод. Проведено системний аналіз технологічного процесу подрібнення на рудозбагачувальних фабриках, визначено вектори керованих та некерованих вхідних змінних, вектор вихідних змінних та вектор збурень. Здійснено декомпозицію технологічного процесу подрібнення. Проведено структурний синтез моделі технологічного процесу подрібнення.

Наукова новизна. Запропоновано математичну модель технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням наявності інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках.

Практичне значення. Розроблена структура технологічного процесу подрібнення представляє собою «м'яку» математичну модель, що є структурно стійкою при випадкових збуреннях змінних. Отримана математична модель має можливість додавання нових змінних і усунення, при виникненні потреби, старих змінних, що забезпечує можливість в процесі використання моделі підключення нових приладів та пристроїв, які будуть надавати додаткову інформацію про стан технологічного процесу подрібнення.

Результати. Проведений системний аналіз технологічного процесу подрібнення на рудозбагачувальних фабриках дозволив визначити склад векторів некерованих вхідних змінних (вміст загального та магнітного заліза в залізорудній сировині, її міцність, вологість, середня крупність після дроблення за вмістом класу -20мм), керованих вхідних змінних (витрати залізорудної сировини в млин, витрати води в млин), вихідних змінних (гранулометричний склад на зливні класифікатора, щільність пульпи на зливні класифікатора, вміст заліза в промпродукті, втрати заліза в хвості збагачення, вихід заліза, видобуток заліза) та некерованих збурень (зношення футерування млина, зношення шарів в млині, витрати електроенергії). Розроблено математичну модель технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням наявності інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках. Напрямок подальших досліджень полягає в синтезі системи управління технологічним процесом подрібнення залізорудної сировини.

Ключові слова: залізорудна сировина, математична модель, технологічний процес подрібнення, хіміко-мінералогічні характеристики, ядернофізичні методи, магнітометричні методи.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-83-90

© Швець Д. В., 2020

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Важливим напрямком розвитку гірничодобувної промисловості є підвищення ефективності переробки залізородної сировини (ЗРС). Одним з найбільш енергоємних процесів в технології переробки ЗРС є технологічний процес подрібнення (ТПП). Якість подрібнення ЗРС в значній мірі визначає продуктивність наступних стадій переробки ЗРС [1].

Існують різні способи підвищення ефективності подрібнення ЗРС: зміна технології подрібнення, застосування сучасних систем автоматизованого управління, підвищення точності контролю технологічних параметрів. Одним із способів збільшення ефективності ТПП є підвищення його інформативності за рахунок контролю хіміко-мінералогічних характеристик вхідної ЗРС.

Аналіз досліджень та публікацій. Питанням підвищення ефективності ТПП ЗРС приділялась увага з середини минулого сторіччя [2-5]. Разом з тим, сучасний етап розвитку нових інформаційних технологій характеризується широким впровадженням в інформаційно-вимірні системи ТПП приладів і пристроїв, що дозволяють за допомогою комп'ютерних технологій реалізувати різноманітні алгоритми управління ТПП. Особливе місце при реалізації алгоритмів управління ТПП займають пристрої, що використовують ядернофізичні [6-10] та магнітометричні [11-15] методи взаємодії з ЗРС для визначення її хіміко-мінералогічних характеристик, оскільки це дозволяє суттєво підвищити інформативність ТПП.

Аналіз ТПП як об'єкта управління дозволяє віднести його до категорії складних об'єктів. Дійсно, ТПП притаманні риси, характерні складній системі [16]. Серед них можна виділити стохастичність ТПП, що ускладнює аналіз процесів в ньому і управління; нестационарність ТПП, що проявляється в дрейфі його характеристик, в зміні його стану, тобто в еволюції у часі; невідтворюваність експериментів, що впливає з нестационарності ТПП [17]. Вищезазначені особливості ТПП як складного об'єкта призводять до того, що мета управління в повній мірі ніколи не досягається. Ефективним способом боротьби з перерахованими властивостями ТПП є екстраполяція його поведінки, тобто з'ясування напрямку еволюції. У цьому випадку керуючий вплив наноситься з випередженням з урахуванням поміченої зміни стану. Для цього доцільно використовувати математичну модель.

Постановка завдання. Метою досліджень є розробка математичної моделі ТПП ЗРС з урахуванням інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках (РЗФ) з метою подальшого синтезу системи управління ТПП.

Викладення матеріалу та результатів. Під моделлю ТПП природно розуміти залежність, яка пов'язує вихідну змінну з його входами - некерованими і керованими

$$\bar{Y} = F(\bar{X}, \bar{U}, \bar{E}), \quad (1)$$

де \bar{Y} - вектор вихідних змінних, \bar{X} - вектор некерованих вхідних змінних, \bar{U} - вектор керованих вхідних змінних, \bar{E} - вектор збурень.

У загальному випадку модель (1) визначається деяким алгоритмом, який вказує, як, володіючи інформацією про вхідні змінні \bar{X} та \bar{U} , визначити вихідну змінну \bar{Y} , не звертаючись до реального об'єкту.

На підставі проведеного системного аналізу ТПП було встановлено, що для оптимального управління ТПП на секції РЗФ необхідно враховувати ряд змінних, які можна представити у вигляді вектору стану системи [18,19]

$$\bar{Z} = (a, f, w, d, Q_p, B_m, Z_1, Z_2, Z_3, g, r_k, b_{nn}, b_{xg}, g_{nn}, e_{nn}) \quad (2)$$

де a - вміст заліза в залізородній сировині (залізо загальне та магнітне), f - міцність залізородної сировини, w - вологість залізородної сировини, d - середня крупність залізородної сировини після дроблення за вмістом класу -20мм, Q_p - витрати залізородної сировини в млин, B_m - витрати води в млин, Z_1 - зношення футерування, Z_2 - зношення шарів в млині, Z_3 - витрати електроенергії, g - гранулометричний склад на зливні класифікатора, r_k - щільність пульпи на зливні класифікатора, b_{nn} - вміст загального заліза в промпродукті, b_{xg} - втрати загального заліза в хвості збагачення, g_{nn} - вихід загального заліза, e_{nn} - видобуток заліза.

Виділивши в (2) вектор некерованих вхідних змінних

$$\bar{X} = (a, f, w, d), \quad (3)$$

вектор керованих вхідних змінних

$$\bar{U} = (Q_p, B_m), \quad (4)$$

вектор неконтрольованих збурень

$$\bar{E} = (Z_1, Z_2, Z_3), \quad (5)$$

і вектор вихідних змінних

$$\bar{Y} = (g, r_k, b_{nn}, b_{xb}, g_{nn}, e_{nn}), \quad (6)$$

отримуємо модель технологічного процесу подрібнення як об'єкта управління у вигляді (1).

Процес синтезу моделі ТПП можна розділити на два етапи.

Перший етап – це структурний синтез моделі. На цьому етапі визначається вид залежності (1) без урахування значень її параметрів. Для конкретизації розглянутого підходу потрібно «розщепити» модель (1) на її структуру St і параметри \bar{C} , тобто представимо модель у вигляді пари

$$F = \langle St, \bar{C} \rangle, \quad (7)$$

де $\bar{C} = (c_1, c_2, \dots, c_l)$, – вектор параметрів моделі.

На етапі структурного аналізу визначається структура St моделі, конкретними величинами параметрів \bar{C} не цікавляться. При виборі структури ТПП необхідно враховувати особливості протікання даного технологічного процесу. Перш за все, структуру ТПП необхідно вибрати такою, щоб вона була структурно стійка при випадкових збуреннях змінних, що визначається як «м'яка» математична модель [20]. Крім того, ця структура повинна мати можливість додавання нових змінних і усунення старих змінних. Це пов'язано з тим, що у міру використання моделі можуть з'являтися нові прилади та пристрої, які будуть надавати додаткову корисну інформацію про стан ТПП. Разом з тим, досвід використання моделі дозволить виключити застарілі прилади, інформація від яких не відповідає необхідним вимогам при управлінні. Треба також врахувати, що змінні ТПП є додатними величинами. І, нарешті, необхідно врахувати, що ТПП є квазістатичним об'єктом управління, тобто при управлінні перехідними режимами можна знехтувати, представляючи динаміку у вигляді запізнювань. З огляду на зазначені вище особливості ТПП, структуру математичної моделі ТПП в скалярному вигляді доцільно задати у вигляді

$$y(t) = y_0(t) \times e^{\sum_{i=1}^N x_i(t - t_i)^{a_i}}, \quad (8)$$

де $y(t)$ - вихідна змінна в момент часу t , $x_i(t - t_i)$ - вхідні змінні в момент часу $t - t_i$, $i = 1, \dots, N$, t_i - запізнювання змінної x_i відносно вихідної змінної, $y_0(t), a_i, (i = 1, 2, \dots, N)$ – параметри, e - неконтрольоване збурення.

Необхідно відзначити, що до складу вхідних змінних у формулі (8) входять як керовані, так і некеровані змінні, які визначаються формулами (3) і (4). Відповідно до формули (6), вихідні змінні утворюють вектор, тому в якості скалярної вихідної змінної (8) можна взяти будь-яку з координат цього вектору. Щодо параметрів, необхідно зробити наступне зауваження. Параметр $y_0(t)$ визначає оцінку стану ТПП в момент часу t , особливістю якого є врахування неконтрольованих збурень. У свою чергу, параметри $a_i, (i = 1, 2, \dots, N)$ виступають як коефіцієнти чутливості вхідних змінних x_1, x_2, \dots, x_N щодо вихідної змінної y . Важливо підкреслити, що структура моделі (8) дозволяє додавати, якщо це необхідно, нові вхідні змінні, або прибирати старі вхідні змінні, якщо вони виявилися непотрібними. Таким чином, на етапі структурного аналізу визначається лише вигляд і характер моделі, а її параметри $y_0(t), a_i, (i = 1, 2, \dots, N)$, а також величини запізнь $t_i, (i = 1, 2, \dots, N)$, знаходяться на наступному етапі ідентифікації параметрів моделі об'єкта. Цей етап пов'язаний з визначенням чисельних величин параметрів, включаючи величини запізнь в режимі нормального функціонування ТПП, тобто без організації спеціальних управляючих впливів на об'єкт, що часто визначається як пасивний експеримент [7]. Вихідною інформацією для ідентифікації є структура (8) і спостереження за поведінкою входу $X(t)$ та виходу $Y(t)$. Таким чином, пара

$$\langle X(t), Y(t) \rangle \quad (9)$$

є джерелом інформації при ідентифікації.

Важливо підкреслити, що ідентифікація полягає в умінні пасивно спостерігати, не втручаючись в хід процесу, бо будь-яке втручання спотворює природний хід спостережуваного явища. Більш того, результати експерименту деяким чином зумовлюються його цілями. Необхідність пасивного спостереження пов'язана ще з тим, що часто складні об'єкти не дозволяють експериментів з ними. У той же час для з'ясування залежності виходу об'єкта від керованих входів необхідно спеціально їх змінювати. Однак, з огляду на те, що складний об'єкт «нетерпимий» до експериментів, які порушують режим його нормального функціонування, їх слід проводити, мінімально збурюючи об'єкт, але так, щоб отримати при цьому максимальну інформацію про вплив варійованих параметрів на вихід об'єкта. Для цього реалізується планування експериментів, зміст яких полягає в синтезі плану експерименту, що дозволяє з максимальною ефективністю визначити необхідні параметри моделі об'єкта управління. З огляду на те, що ТПП є квазістатичним об'єктом, план експерименту являє собою набір величин керованої входної змінної

$$\langle U_1, U_2, \dots, U_M \rangle, \quad (10)$$

за допомогою якого визначається реакція об'єкта, яка утворює ряд значень вихідної змінної

$$Y_1, Y_2, \dots, Y_M. \quad (11)$$

В результаті з (10) і (11) будуть утворені M пар значень

$$\langle U_i, Y_i \rangle,$$

які дозволять знайти величини параметрів моделі (1), тобто вирішити завдання ідентифікації. В загальному випадку для отримання моделі (1) необхідно розглядати вже трійки спостережень

$$\langle X_i, U_i, Y_i \rangle, i = 1, 2, \dots, M, \quad (12)$$

так як в процесі планування експериментів необхідно враховувати і величини некерованих входних змінних.

Важливо відзначити, що в результаті планування експериментів може змінитися уявлення про структуру моделі. Ця обставина змушує вводити корекцію структури моделі. Таким чином, при плануванні експериментів визначаються параметри моделі, які неможливо визначити на етапі ідентифікації.

Структура моделі ТПП (8) дає змогу користуватися неадаптивним алгоритмом ідентифікації [21]. Для визначення величин параметрів, що входять у (8), необхідно розв'язати систему з M рівнянь з $N+1$ невідомими, яка утворюється шляхом підстановки даних (12) в формулу (8). Таким чином, завдання неадаптивної ідентифікації зводиться до вирішення системи рівнянь

$$y_0 \times \tilde{\mathbf{O}}_{i=1}^N x_{im}^{a_i} = y_m, m = 1, 2, \dots, M. \quad (13)$$

Система рівнянь (13) має дві властивості, які визначають труднощі, що виникають при її розв'язанні: несумісність і трансцендентність. Несумісність пов'язана з випадком, коли число рівнянь більше числа невідомих $M > N+1$. Трансцендентність пов'язана з нелінійністю системи рівнянь. Для вирішення несумісної системи рівнянь застосовується метод найменших квадратів (МНК), сутність якого полягає в мінімізації сумарної нев'язки правих і лівих частин рівнянь цієї системи. Однак вибір спеціальної структури моделі (7) дозволяє спростити рішення, зводячи шляхом логарифмування (8) до лінійності функції відносно шуканих параметрів

$$z = a_0 + \mathring{\mathbf{a}}_{i=1}^N a_i \mathring{v}_i + \mathbf{d}, \quad (14)$$

де $z = \ln y(t)$, $a_0 = \ln y_0(t)$, $\mathbf{d} = \ln \mathbf{e}$, $v_i = \ln(x_i(t - t_i))$.

Згідно виду (14), функція сумарної нев'язки у вигляді суми квадратів нев'язок кожного з рівнянь записується у вигляді

$$\Phi(a_0, a_1, \dots, a_N) = \mathring{\mathbf{a}}_{m=1}^M (a_0 + \mathring{\mathbf{a}}_{i=1}^N a_i v_{im} - z_m)^2, \quad (15)$$

де $z_m = \ln y_m$, $v_{im} = \ln x_{im}$.

При цьому рішенням системи рівнянь (14) будуть такі значення параметрів, при яких функція нев'язки (15) мінімальна, тобто

$$\Phi(a_0^*, \dots, a_N^*) = \min_{a_0, \dots, a_N} \Phi(a_0, \dots, a_N). \quad (16)$$

Спеціальний вид функції (14) дозволяє вирішити задачу мінімізації, скориставшись необхідною умовою існування екстремуму функції, тобто прирівнявши частинні похідні функції (15) до нуля

$$\frac{\partial \Phi(a_0, \dots, a_N)}{\partial a_i} = 0, (i = 0, 1, \dots, N), \quad (17)$$

Оскільки (14) є лінійною функцією відносно параметрів, то (15) є квадратичною функцією, що обумовлює лінійність системи рівнянь (17). Дійсно, підставляючи (15) в (17) і обчислюючи частинні похідні, отримуємо систему лінійних алгебраїчних рівнянь (СЛАР) щодо невідомих параметрів

$$\begin{cases} a_0 M + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N a_i v_{im} = \sum_{m=1}^M z_m \\ a_0 \sum_{m=1}^M v_{Nm} + \sum_{m=1}^M \sum_{i=1}^N b_i v_{im} v_{Nm} = \sum_{m=1}^M z_m v_{Nm} \end{cases}. \quad (18)$$

СЛАР (18) є сумісною і може бути вирішена стандартними методами. Важливо підкреслити, що при формуванні статистичних масивів (12) необхідно враховувати запізнювання вхідних змінних щодо вихідної змінної. Більш того, для уточнення величин запізнювань доцільно застосування МНК, реалізуючи прямий пошук, послідовно порівнюючи величини функцій (15) з метою знаходження мінімального значення.

В результаті математична модель (8) буде представлена у вигляді

$$y(t) = y_0^* \times \tilde{O}_{i=1}^N x_i(t - t_i)^{a_i}, \quad (19)$$

де $y_0^* = e^{a_0^*}$, $a_0^* = a_i^*$ - величини параметрів, знайдені за допомогою МНК, $i = 1, \dots, N$, t_i^* - уточнені величини запізнь, $i = 1, \dots, N$,

Математична модель (19) є неперервною за часом. При цьому повинен неперервно підраховуватися параметр, який характеризує стан ТПП і тим самим враховує дію неконтрольованих збурень за формулою, яка витікає з (19)

$$y_0(t) = \frac{y(t)}{\tilde{O}_{i=1}^N x_i(t - t_i)^{a_i}}. \quad (20)$$

Графік функції (20) в залежності від часу описує деяку неперервну траєкторію, яка визначає дрейф стану ТПП. Аналіз графіка функції (20) дозволяє передбачити стан ТПП на момент приходу керуючого впливу з урахуванням величини запізнь, що дозволяє поліпшити якість управління. Разом з тим, якщо спостерігається незрозуміла зміна величини параметра (20), з подальшим погіршенням якості ідентифікації, то необхідно заново провести ідентифікацію параметрів моделі ТПП (16).

На практиці, як правило, реалізується дискретний режим управління технологічним процесом. У цьому випадку параметр (20) обчислюється через заданий проміжок часу по формулі

$$y_0(k \times Dt) = \frac{y(k \times Dt)}{\tilde{O}_{i=1}^N x_i((k - l_i)Dt)^{a_i}}, (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (21)$$

де Dt - дискретність зняття інформації, l_i - величина запізнювання змінної x_i щодо вихідної змінної в одиницях Dt .

Послідовні значення (21)

$$y_0(0), y_0(1), y_0(2), \dots \quad (22)$$

утворюють дискретний часовий ряд, значення якого характеризують стан протікання процесу в дискретні моменти часу. Часовий ряд (22) є стохастичним, тому його прогнозування повинно проводитися за допомогою методів математичної статистики. Передбачення стану процесу на момент приходу керуючого впливу надасть можливість підвищити якість управління процесом. Незрозуміла зміна стану процесу, оцінена за допомогою формули (21), з подальшим погіршенням якості ідентифікації є сигналом для повторення ідентифікації параметрів моделі ТПП (13).

Отримана математична модель ТПП (19) реалізована як «чорна скринька», при певних припущеннях про її внутрішню структуру. Разом з тим, доцільно більш повно використовувати

інформацію про її внутрішню структуру як про систему взаємодіючих елементів. Така інформація є вихідною для декомпозиції моделі ТПП, тобто для поділу її на взаємодіючі елементи. Зміст декомпозиції полягає в тому, щоб відповідно до апріорних відомостей про структуру ТПП, спростити задачу побудови моделі, в якій кожен елемент декомпонованого ТПП буде простіше початкового ТПП, полегшивши цим самим вирішення основного завдання, пов'язаного з управлінням ТПП. Аналізуючи внутрішню структуру ТПП, можна прийти до висновку, що він включає такі взаємодіючі елементи, як млин, класифікатор і магнітний сепаратор. На рис. 1 показана декомпозиція ТПП.

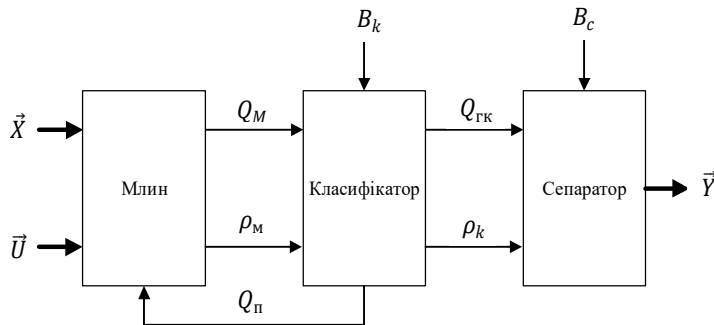


Рис. 1. Схема декомпозиції ТПП

елементів, що розглядається як багатополосник, тобто перетворювач з багатьма входами і виходами, може бути представлений у вигляді таких функціональних залежностей:

для млина

$$Q_M = Q_M(\vec{X}, \vec{U}, Q_{\text{п}}), \quad (23)$$

$$\rho_M = \rho_M(\vec{X}, \vec{U}, Q_{\text{п}}); \quad (24)$$

для класифікатора

$$Q_{\text{ГК}} = Q_{\text{ГК}}(Q_M, \rho_M, B_k), \quad (25)$$

$$\rho_k = \rho_k(Q_M, \rho_M, B_k), \quad (26)$$

$$Q_{\text{п}} = Q_{\text{п}}(Q_M, \rho_M, B_k); \quad (27)$$

для магнітного сепаратора

$$\vec{Y} = \vec{Y}(Q_{\text{ГК}}, \rho_k, B_c). \quad (28)$$

Беручи до уваги зауваження, зроблені при структурному синтезі ТПП, кожна з функцій (23), ..., (28) може бути записана у вигляді:

млин

$$Q_M(t) = Q_{M0}(t) \cdot \prod_{i=1}^7 x_i(t - \tau_{i1})^{a_i}, \quad (29)$$

$$\rho_M(t) = \rho_{M0}(t) \cdot \prod_{i=1}^7 x_i(t - \tau_{i1})^{b_i}, \quad (30)$$

де $x_1 = a$, $x_2 = f$, $x_3 = w$, $x_4 = d$, $x_5 = Q_{\text{п}}$, $x_6 = B_k$, $x_7 = Q_{\text{п}}$,

$Q_{M0}(t)$, $\rho_{M0}(t)$, a_i , b_i , ($i = 1, \dots, 7$) - параметри;

класифікатор

$$Q_{\text{ГК}}(t) = Q_{\text{ГК}0}(t) \cdot \prod_{i=1}^3 x_i(t - \tau_{i2})^{c_i}, \quad (31)$$

$$\rho_k(t) = \rho_{k0}(t) \cdot \prod_{i=1}^3 x_i(t - \tau_{i2})^{d_i}, \quad (32)$$

$$Q_{\text{п}}(t) = Q_{\text{п}0}(t) \cdot \prod_{i=1}^3 x_i(t - \tau_{i2})^{e_i}, \quad (33)$$

де $x_1 = Q_M$, $x_2 = \rho_M$, $x_3 = B_k$,

$Q_{\text{ГК}0}(t)$, $\rho_{k0}(t)$, $Q_{\text{п}0}(t)$, c_i , d_i , e_i , ($i = 1, 2, 3$) - параметри;

магнітний сепаратор

$$g(t) = g_0(t) \prod_{i=1}^3 x_i(t - \tau_{i3})^{f_i}, \quad (34)$$

$$\rho_c(t) = \rho_{c0}(t) \prod_{i=1}^3 x_i(t - \tau_{i3})^{g_i}, \quad (35)$$

$$\beta_{\text{пн}}(t) = \beta_{\text{пн}0}(t) \prod_{i=1}^3 x_i(t - \tau_{i3})^{m_i}, \quad (36)$$

$$\beta_{\text{хв}}(t) = \beta_{\text{хв}0}(t) \prod_{i=1}^3 x_i(t - \tau_{i3})^{n_i}, \quad (37)$$

$$\varepsilon_{\text{пн}}(t) = \varepsilon_{\text{пн}0}(t) \prod_{i=1}^3 x_i(t - \tau_{i3})^{p_i}, \quad (38)$$

На рис. 1, додатково до (3) - (6), прийняті наступні позначення: $Q_{\text{п}}$ - витрата пісків, Q_M - витрата подрібненої руди, $Q_{\text{ГК}}$ - витрата пульпи готового класу, B_k - витрата води у класифікатор, B_c - витрата води у сепаратор, ρ_M - щільність пульпи на виході млина, ρ_k - щільність пульпи на зливі класифікатора.

Згідно представленій на рис. 1

схеми декомпозиції ТПП, кожен з

де $x_1 = Q_{гк}$, $x_2 = \rho_k$, $x_3 = B_c$, $g_0(t)$, $\rho_{c0}(t)$, $\beta_{пп0}(t)$, $\beta_{хв0}(t)$, $\gamma_{пп0}(t)$, $\varepsilon_{пп0}(t)$, $f_{i,r}$, $l_{i,r}$, $m_{i,r}$, $n_{i,r}$, $p_{i,r}$ ($i = 1, 2, 3$) – параметри.

Для знаходження величин параметрів, що входять у формули (29), ..., (38), необхідно провести ідентифікацію параметрів для кожної з математичних моделей при наявності відповідної інформації. Оцінюючи стан кожного з елементів ТПП, визначених формулами (29), ..., (38), і утворюючи з величин цих станів стохастичні часові ряди, можна спрогнозувати майбутні їх стани з метою розрахунку випереджаючих величин керуючих впливів при реалізації відповідних алгоритмів управління.

Таким чином, формули (29), ..., (38) дозволяють для кожного з елементів ТПП як результату декомпозиції спростити рішення задачі управління, насамперед, шляхом зменшення величини запізнювання.

Висновки і напрямок подальших досліджень. Результатом досліджень є розробка математичної моделі ТПП ЗРС РЗФ. Напрямок подальших досліджень полягає в синтезі системи управління ТПП ЗРС.

Список літератури

1. Линч, А. Дж. Циклы дробления и измельчения / А. Дж. Линч. — Москва: Недра, 1981.-343 с.
2. Марюта А. Н. Автоматическое управление технологическими процессами обогатительных фабрик / А. Н. Марюта, Ю. Г. Качан, В. А. Бунько. — Москва: Недра, 1983 — 277с.
3. Процто В. С. Автоматизированные системы управления технологическими процессами обогатительных фабрик / В. С. Процто. — Москва: Недра, 1987. — 253с.
4. Остапенко П. Е. Теория и практика обогащения железных руд / П. Е. Остапенко.— М.: Недра, 1985. — 270 с.
5. Марюта А. Н. Автоматизация процессов обогащения руд / А. Н. Марюта, А. Н. Давидкович, Т. И. Гуленко, В. А. Кондрагев. — Киев: Техніка, 1972. — 140 с.
6. 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.
7. 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.
8. 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. — URL: <https://bit.ly/2Xf1Vpx>.
9. XRD, internal field-NMR and Mössbauer spectroscopy study of composition, structure and magnetic properties of iron oxide phases in iron ores / M. Manjunatha, R. Kumar, A. Anupama [et al.] // Journal of Materials Research and Technology. — 2019. — Vol. 8, issue 2. — P. 2192–2200. — DOI: 10.1016/j.jmrt.2019.01.022.
10. Experimental and simulated study of detector collimation for a portable 3"×3" NaI(Tl) detector system for in-situ measurements / K. U. Kiran, K. Ravindraswami, K. M. Eshwarappa, H. M. Somashekarappa // Journal of Radiation Research and Applied Sciences. — 2015. — Vol. 8, issue 4. — P. 597–605. — DOI: 10.1016/j.jrras.2015.07.006.
11. Азарян А. А. Контроль содержания магнитного железа в пульповых продуктах рудообогатительной фабрики / А. А. Азарян, В. Г. Кучер, Ю. Е. Цыбулевский, Д. В. Швець // International Academy Journal «Web of Scholar». — 2017. — № 1(10). — С.9–12.
12. Азарян А. А. Разработка измерительного канала для оперативного контроля содержания железа магнитного во взрывных скважинах / А. А. Азарян, А. А. Трачук, А. Н. Гриценко, Д. В. Швець // Центрально-український науковий вісник. Технічні науки. — 2019. — № 32. — С. 138–145.
13. Швець Д. В. Розробка системи стабілізації масової долі заліза магнітного у зливі класифікатора та дослідження можливості автоматизації процесу подрібнення залізної руди та підготовки її до збагачення / Д. В. Швець // Качество минерального сырья: сб. науч. тр. — Кривой Рог, 2014. — С. 252–264.
14. Азарян А. А. Перспективы построения систем автоматического регулирования процесса магнитной сепарации на базе погружных анализаторов содержания магнитного железа / А. А. Азарян, В. Г. Кучер, Д. В. Швець // Качество минерального сырья: сб. науч. тр. — Кривой Рог, 2017. — С. 214–228.
15. Цыбулевский Ю. Е. Исследование влияния физических характеристик материала железосодержащей пробы на размеры индуктивных датчиков. / Ю. Е. Цыбулевский, А. В. Швыдкий // Качество минерального сырья : сб. науч. тр. — Кривой Рог, 2011. — С. 208–212.
16. Симанков В. С. Адаптивное управление сложными системами на основе теории распознавания образов / В. С. Симанков, Е. В. Луценко. — Краснодар: Техн. ун-т Кубан. гос. технол. ун-та, 1999. — 318 с.
17. Швець Д. В., Азарян А. А. Анализ характеристик технологического процесса измельчения рудообогатительной фабрики // XIII Всеукраїнська науково-практична конференція «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (КІСМ). 24-26 березня 2020 р. Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2020. - С. 227-229.
18. 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.

19. Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч.1 / [Островский Г.М., Абиев Р.Ш., Барабаш В.М. и др.]; под ред. Г.М. Островского. – Санкт-Петербург: АНО НПО «Профессионал», 2004. – 846 с.

20. Бордовский Г.А. Физические основы математического моделирования. Учебное пособие / Г. А. Бордовский, А.С. Кондратьев, А.Д.Р. Чоудери. – Москва: Издательский центр «Академия», 2005. – 320с.

21. Игнатьев А.А. Основы теории идентификации объектов управления: учеб. пособие / А.А. Игнатьев, С.А. Игнатьев. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2008. – 44 с.

Рукопис подано до редакції 17.03.2020

УДК 658.38:621.1

В.Г. НАЛИВАЙКО, канд. техн. наук, доц., О.Г. МОВЧАН, канд. хим. наук, доц.,
К.В. ЛОСЬЕВ, ассист.

Криворожский национальный университет

ВЛИЯНИЕ УСТАНОВЛЕНИЯ ОЧЕРЕДНОСТИ ПРОФИЛАКТИЧЕСКИХ РЕМОНТОВ ПО ЗАМЕНЕ АВАРИЙНЫХ УЧАСТКОВ ТРУБОПРОВОДОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ТРАВМООПАСНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ПРЕДПРИЯТИЙ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Цель. Целью данной работы является разработка методов и способов повышения безопасности труда при эксплуатации и ремонтах теплотрасс. Также необходимо выявить наиболее травмоопасные специальности работников предприятий теплоснабжения, уменьшив аварийную производственную нагрузку на них. Уменьшение аварийных работ может быть достигнуто путем проведения профилактических работ на теплотрассах, сокращая при этом количество опасных работ.

Методы исследования. Исследования проводились с использованием математико-статистического метода экспертных оценок. Данный метод позволяет оперативно выявить наиболее проблемные и затратные работы предприятий теплоснабжения возникающие как в процессе эксплуатации оборудования и теплотрасс так и с внезапными аварийными ситуациями. Таким образом можно определить перечень профилактических работ которые должны быть выполнены в первую очередь.

Научная новизна. Исследования с использованием математико-статистического метода экспертных оценок позволяют оперативно определить проблемы при организации профилактических ремонтов на предприятиях теплоснабжения.

Практическая значимость. Полученные выводы по результатам исследований позволят разработать рекомендации по уменьшению количества аварийных работ на теплотрассах. Определив наиболее травмоопасные специальности предприятий теплоснабжения необходимо уменьшить производственную нагрузку связанную с аварийными работами через проведение профилактических работ на наиболее потенциально опасных аварийных участках.

Разработанные рекомендации на основе математико-статистического метода экспертных оценок позволяют улучшить производство организационных работ по ликвидации аварийных участков теплотрасс и снизить количество аварийных работ, что в свою очередь, уменьшит заболеваемость работников предприятий теплоснабжения и повысит безопасность труда особенно в осенне-зимний период года, а также сократит экономические потери от ликвидации аварийных ситуаций и лечения заболевших работников теплогенерирующих предприятий.

Результаты. Как показал анализ проведенных исследований наиболее значимыми в определении очередности проведения работ на предприятиях, являются прогнозирование аварийных участков теплотрасс и совершенствование организационных ремонтных работ на теплотрассах. На основании профилактических графиков ремонтных работ можно составить первоочередность замены труб аварийных участков, что намного облегчит планирование ремонтных работ по замене аварийных участков трубопроводов. Наиболее травмоопасными специальностями являются газосварщик и электросварщик. Условия их работы эксперты определяют как опасные и вредные.

Ключевые слова: экспертная оценка, математико-статистический метод экспертных оценок, баллы оценки.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-90-96

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Существенными факторами сокращения количества ремонтных работ являются профилактические работы при эксплуатации теплогенерирующего оборудования и заблаговременное выявление аварийных участков теплотрасс.

Эти работы определяют объемы и количество подлежащих замене аварийных теплопроводов. Существенно также влияет время и условия нахождения трубопроводов под землей и их параметры (диаметр, толщина стенок трубопроводов, протяженность аварийных участков).

© Наливайко В.Г., Мовчан О.Г., Лосьев К.В., 2020

Вышеперечисленные условия могут вызывать возрастание материальных и трудовых затрат, особенно это сказывается в осенне-зимний период (работа в холодную и сырую погоду с мерзлым грунтом).

Выполняемые организационные работы включают: составление графиков ремонтов, организация землеройной техники, ремонтных бригад, а также вывоз демонтированных труб с мест ремонта, доставка и монтаж новых, время демонтажа. Согласование и утверждение этих графиков с вышестоящими структурными подразделениями предприятия, выполнение гидравлических испытаний трубопроводов перед сдачей их в эксплуатацию [13].

Анализ исследований и публикаций. Одним из самых важных факторов в организации ремонтных работ являются разработка и согласование параметров теплоносителя при транспортировании его по замененным и незаменным трубам. Если параметры нагрузок будут не согласованы, то это может привести к серьезным последствиям. Анализ травматизма и заболеваемости на теплогенерирующих предприятиях в период с середины девяностых годов по настоящее время проводимые институтом НИИБТГ и опубликованные результаты в сборниках работ, позволяют говорить об актуальности проблемы уменьшения травмоопасности выполняемых работ [14].

Постановка задачи. В связи с вышеизложенным в феврале 2020 года было проведено анкетирование работников теплогенерирующих предприятий Кривого Рога, таких как КПТС «Криворожтеплосеть» и ПАТ «Криворожская ТЦ» по вопросу установления очередности профилактических работ по замене аварийных трубопроводов.

В анкетировании приняли участие работники теплогенерирующих предприятий всех структурных подразделений. Ниже приведены вопросы на которые отвечали работники предприятий КПТС «Криворожтеплосеть», и ПАТ «Криворожская теплоцентраль» следующие: (при этом каждому фактору по степени важности эксперты присваивали определенный балл оценки) [13]:

Факторы

1. Проведение ремонтных работ только в весенне-летний период.
2. Своевременное выявление возможных порывов на теплотрассах.
3. Составление профилактических графиков, связанных с возможными порывами труб на теплотрассах.
4. Разработка и внедрение методики по определению нахождения участков труб с минимальной толщиной стенки.
5. Разработка и внедрение автоматизированного определения аварийных участков труб.
6. Усовершенствование графика схемы, характеризующей время закладки труб теплотрассы.
7. Увязка параметра теплоносителя с физической характеристикой уложенных труб со временем нахождения их в эксплуатации.
8. Установление взаимосвязи между скоростью коррозии труб и временем нахождения их в эксплуатации.
9. Совершенствование организации ремонтных работ на теплотрассах:
соблюдение выполнения графика ремонтных работ;
своевременное контролирование параметров теплоносителя в районах производимых ремонтных работ;
сведение работ по ремонту до минимума в осенне-зимний период.
10. Прогнозирование аварийных участков теплотрасс: (время их эксплуатации, толщина стенок труб, время транспортирования теплоносителя, условия нахождения труб теплотрасс в лотках (сырость, наличие воды, тепловой изоляции и др. условия).

Примечание	Должность	Ф.И.О	Дата	Подпись
------------	-----------	-------	------	---------

Изложение материала и результаты. Результаты анкетирования были обработаны с помощью математико-статистического метода экспертных оценок [1]. Сущность его состоит в расположении факторов влияния в определенной возрастающей последовательности и определяемой методом ранжирования. При ранжировании факторы располагают в наиболее рациональном порядке и приписывают каждому из них в порядке возрастания числа натурального ряда - ранги. При этом ранг 1 (один) получает наиболее предпочтительный фактор, а ранг N - наименее предпочтительный. Если все n оценок различны, то соответствующие числа натурального ряда есть ранги оценок i -го эксперта.

Если среди оценок i -го эксперта одинаковые данные, то им назначается одинаковый ранг, равный среднему арифметическому соответствующих чисел натурального ряда. После ранжирования определяют сумму рангов, назначенных экспертами каждому фактору [1].

Наиболее важным считается фактор, получивший наименьшее значение суммы рангов оценок. Важность каждого фактора определяется по среднестатистической величине [13].

$$\bar{x}_n = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (1)$$

где X_i - вариант ответа; n - количество экспертов.

Стандартное отклонение рассчитывается согласно формуле

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_A)^2}{n - 1}. \quad (2)$$

Степень соответствия мнений экспертов определяется коэффициентом вариации [1]

$$W_A = S / \bar{x}_A, \quad (3)$$

где S - среднеквадратическое отклонение; \bar{x}_A - средняя статистическая величина.

Результаты экспертной обработки представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты экспертной оценки

Факторы	Среднестатистическая оценка \bar{x}_A	Сумма рангов оценок S	Коэффициент вариации W_A
1. Проведение ремонтных работ только в весенне-летний период	11,4	71	92
2. Своевременное выявление возможных порывов на теплотрассах	15,1	63	74,1
3. Составление профилактических графиков, связанных с возможными порывами труб на теплотрассах	7,9	86	89,7
4. Разработка и внедрение методики по определению нахождения участков труб с минимальной толщиной стенки	12	65	75,4
5. Разработка и внедрение автоматизированного определения аварийных участков труб	8,2	72	82,1
6. Усовершенствование графика схемы, характеризующий время закладки труб теплотрассы	6,8	79	73,4
7. Увязка параметров теплоносителя с физической характеристикой уложенных труб с временем нахождения их в эксплуатации	10,9	72	94
8. Установка взаимосвязи между скоростью коррозии труб с временем их нахождения в эксплуатации	6,4	70	71,1
9. Совершенствование организации ремонтных работ на теплотрассах: соблюдение выполнения графика ремонтных работ; своевременное контролирование параметров теплоносителя в районах производимых ремонтных работ; сведение работы по ремонту до минимума в осенне-зимний период	16,5	53	90
10. Прогнозирование аварийных участков теплотрасс: (время их эксплуатации, толщина стенок труб, время транспортировки теплоносителя, условия нахождения труб теплотрасс в лотках (сырость, наличие воды, тепловой изоляции и др. условия)	11,9	68	91,2

Полученные результаты по ликвидации порывов и замене пришедших в негодность труб на новые показывают, что частота их порывов зависит от диаметра труб - чем больше диаметр трубы, тем меньше количество замененных труб (рис. 1) [4].

На рис. 2 приведены кривые, характеризующие количество замененных труб при порывах в зависимости от диаметра и времени года их ремонта. Кроме того, из рисунка следует, что замена аварийных труб осуществлена в течение всего эксплуатационного периода, что подтверждается результатами исследований (рис. 2) [14].

Самый большой объем работ по ликвидации порывов и замене труб соответствует следующим периодам и месяцам года: осенне-зимний период (октябрь-февраль) и весенний период (март-апрель). Объясняется это тем, что в эти периоды года значительно увеличивается тепло-

вая нагрузка на теплопроводы. Работы, проводимые по восстановлению теплопроводов, в осенне-зимний период связаны с холодными метеорологическими условиями, а следовательно, и временем нахождения рабочих на ремонтных работах [14].

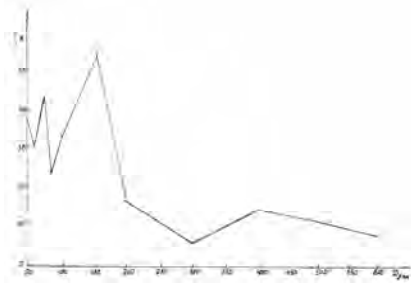


Рис. 1. Зависимость количества замененных участков теплопроводов от диаметра труб за период 2003-2005 гг.

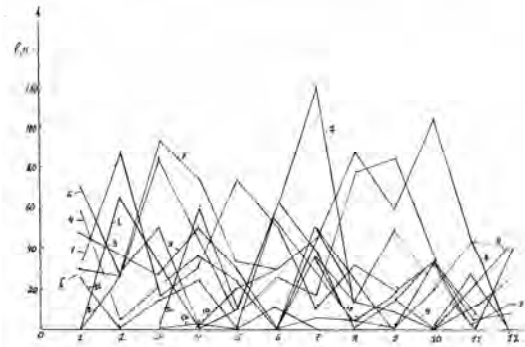


Рис. 2. Зависимость количества замененных труб на участках от диаметра труб и времени года за период 2003-2005 гг.: 1 - $d = 50$ мм; 2 - $d = 60$ мм; 3 - $d = 70$ мм; 4 - $d = 80$ мм; 5 - $d = 100$ мм; 6 - $d = 150$ мм; 7 - $d = 200$ мм; 8 - $d = 250$ мм; 9 - $d = 300$ мм; 10 - $d = 400$ мм; 11 - $d = 500$ мм; 12 - $d = 600$ мм

Рабочий персонал занятый ремонтными работами находится на открытом пространстве и подвергается воздействию метеоусловий. По данным Украинского центра радиологии и контроля загрязнения природной среды БРис Укр. ЦРКЗПС и СНиП [2] средняя температура в холодный период составляет $-8,5$ °С. В этот период преобладают ветры северного и северо-восточного направлений, скорость которых достигает 15-22 м/с [5]. Рабочие, находящиеся на открытых площадках по ликвидации порывов и замене труб, переохлаждаются и подвергаются различного рода заболеваниям. [13]. Количество заболевших трудящихся предприятий ПАТ «Криворожская теплоцентральный» и КПТС «Криворожтеплосеть» по месяцам года за период 2014-2016 гг. приведены в табл. 2.

Таблица 2

Количество заболевших по ПАТ «Криворожская теплоцентральный» и КПТС «Криворожтеплосеть»												
Год	Месяц											
	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
2014	94	65	53	83	51	44	40	33	57	53	78	102
2015	64	87	151	79	59	58	57	59	68	91	72	127
2016	81	93	65	54	43	51	43	54	71	89	97	115

Самое большое количество заболевших приходится на периоды года, которые совпадают со временем ликвидации порывов и заменой труб (см. рис. 2 и табл. 2).

Результаты обработки показывают, что такие факторы как своевременное выполнение профилактических работ и внедрение методик по определению интенсивности коррозии стенок трубопроводов, позволяют установить объемы аварийных работ и протяженность трубопроводов подлежащих замене [14].

Составление графика ремонтных работ дает возможность прогнозировать дальнейшее время эксплуатации труб. По данным Министерства ЖКХ Украины 15 % от общего количества проложенных теплотрасс в настоящее время находятся в аварийном состоянии и требуют замены. В связи с приведенным профилактический ремонт приобретает важное значение [13].

Состояние трубопроводов в аварийном состоянии часто приводит к нарушению технологии эксплуатации, а также под влиянием временного фактора к сбоям теплоснабжения потребителей. При устранении аварийных ситуаций, возникают непредвиденные обстоятельства приводящие к травмам или ухудшению состояния здоровья рабочих, так как аварийные работы могут осуществляться в различные временные периоды года т.е. в различных метеорологических условиях [14].

С целью выявления основных травмоопасных профессий при производстве ремонтных работ и эксплуатации технологического оборудования в феврале 2020 года на предприятиях ПАТ «Криворожская теплоцентральный» и КПТС «Криворожтеплосеть» было проведено анкетирование среди работников занятых на ликвидации аварий. В этом анкетировании приняли участие также ИТР, работники отдела ТБ, газосварщики, электросварщики, слесаря по ремонту теплотехнического оборудования др. Вопросы на которые отвечали анкетированные приведены в табл. 3.

Таблица 3

Пример анкеты

Специальность	Условия работы (сложные, опасные, вредные)	Количество баллов	
		Вид работ	
		ремонт	эксплуатация
Газосварщик			
Электросварщик			
Слесарь по ремонту теплового оборудования			
Слесарь-троссовик			
Работник КИП			
Электрик			
Инженер-наладчик			
Оператор котельной			

Примечание	Должность	Ф.И.О	Дата	Подпись

Обработка результатов анкетирования осуществлена методом экспертных оценок [1].
Результаты анализа полученных данных приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оценка наиболее травмоопасных специальностей предприятий теплоснабжения

Виды работ	Среднестатистическая оценка, \bar{x}_A	Сумма рангов оценок, S	Коэффициент вариации, W_A
Газосварщик	21,0	54	73,0
Электросварщик	18,0	68	72,0
Слесарь по ремонту теплового оборудования	15,2	96	93,0
Электрик	14,6	102	94
Слесарь по ремонту теплотрасс	13,1	107	85,3
Оператор котельной	9,1	141	81,9
Инженер-наладчик	7,1	147	92,4
Работник КИП	6,5	115	71,0

Данные таблицы показывают, что наиболее травмоопасными профессиями являются: газосварщики, электросварщики, слесаря по ремонту теплового оборудования, слесаря по ремонту теплотрасс, электрики [3]. Наиболее травмоопасные профессии (газосварщики, электросварщики) подтверждаются данными табл. 4: среднестатистической оценкой (\bar{x}_A) соответственно 21 и 18, суммой рангов оценок (S) 54 и 68 и коэффициентами вариации (W_A) – 73 и 72.

В связи с этим указанным профессиям при выполнении ремонтных и эксплуатационных работ необходимо уделять основное внимание. А такие профессии как: работники КИП, инженеры-наладчики, операторы котельных установок характеризуются низкими величинами среднестатистической оценки и высокой суммой рангов оценок можно отнести к менее травмоопасным профессиям [13].

Персонал (операторы котельных, инженеры КИП) подвергаются травмоопасным условиям при розжиге котлов, регулировке аппаратуры связанной с поддержанием необходимых парамет-

тров теплоносителя [9]. Эта травмоопасность особенно проявляется при работе данных работников в ночное время, поэтому плановыми работами для уменьшения травмоопасности необходимо исключить эти работы в ночное время [8]. Работа газосварщиков, электросварщиков часто выполняется в закрытых помещениях в ограниченном пространстве (тепловые камеры, топки котлов) где концентрация вредных выбросов (СО₂, угарный газ, сажа) превышают нормативные значения и также практически отсутствует хорошая вентиляция, поэтому ликвидация аварий осуществляется в сложных технологических условиях [7]. Газосварщики, электросварщики выполняют аварийные работы совмещая их с плановыми а это приводит к тому, что работники этих профессий выполняют работы с дополнительной физической нагрузкой, что приводит к возникновению травмоопасных условий [10]. Кроме того работники этой профессии по технологическим условиям выполняют работы на высоте, что дополнительно связано с метеороусловиями и в совокупности воздействие вышеуказанных факторов может привести к ухудшению состояния их здоровья. Таким образом, учитывая вышеприведенное, профессии газосварщика и электросварщика относят к наиболее травмоопасным а условия их работы считаются вредными [14].

Выводы и направление дальнейших исследований. Профилактические графики дают возможность составить первоочередность замены труб аварийных участков, что позволит облегчить планирование ремонтных работ по замене аварийных участков трубопроводов. Данные табл. 1 показывают, что все почти все способы по ремонту теплотрасс актуальны [15]. Первоочередными необходимыми работами эксперты считают пункты: П1, П2, П4, П7, П8, П10. Выполнение перечисленных пунктов позволит улучшить производство организационных работ по ликвидации аварийных участков теплотрасс, а также снизит количество аварийных работ, что в свою очередь уменьшит заболеваемость работников и повысит безопасность труда особенно в осенне-зимний период.

Список литературы

1. **Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г.** Математико-статистические методы экспертных оценок. - 2-е изд перераб и доп. - М.: Статистика, 1980.
2. **Вчерашний Р.П., Елтаренко Е.А., Давыденко А.А.** Использование экспертных методов в информационных исследованиях, М. Информ. 1983.
3. **Гольшев А.М., Лосьев К. В.** Определение степени травмоопасности основных видов ремонтных и эксплуатационных работ на предприятиях теплоснабжения, Вестник Криворожского технического университета, 2007
4. **Лосьев К. В.** Установление очередности профилактического ремонта по замене аварийных участков трубопроводов и теплотрасс и влияние их количества на безопасность труда, Вісник КТУ, збірник наукових праць- 2008. Вип № 21. с 183-186
5. СНиП 2.01.01.82 Строительная климатология и геофизика.
6. **Аскользин П.А.** Предупреждение коррозии оборудования технического водоснабжения и теплоснабжения, под. общей ред. Колотурин Я.М., Москва, Металлургия, 1988.
7. **Акопян К.М.** Охрана труда в коммунальной энергетике: справочное пособие, Москва, 1986.
8. **Степанський О.П.** Проведення аналізу травматизму, професіональних захворювань, аварійності умов та безпеки праці і розробка рекомендацій по усуненню причин їх виникнення, збірник НДБПГ, 1997.
9. **Панин В.И.** Обслуживание коммунальных котельных и тепловых сетей, Москва, Стройиздат, 1974.
10. **Онищенко Н.П.** Охрана труда при эксплуатации котельных установок, Москва, Стойиздат, 1991.
11. Правила технічної експлуатації теплових установок і мереж в Україні, Міністерство юстиції України, № 197/13464, 2007р.
12. **Зверева А.А.** Действие производственных факторов на организм и меры защиты, Новосибирск, справочник, 1991г.
13. **Мовчан О.Г., Лосьев К. В.** Установление очередности профилактического ремонта по замене аварийных участков трубопроводов и определение основных травмоопасных специальностей предприятий теплоснабжения, Вісник КНУ, збірник наукових праць- 2016. Вип № 43. с 89-95.
14. **Наливайко В.Г., Мовчан О.Г., Лосьев К. В.** Важность определения травмоопасности основных видов ремонтных работ на теплогенерирующих предприятиях, Гірничий вісник, збірник наукових праць- 2018 Вип № 103. С. 27-32.
15. **Наливайко В.Г., Мовчан О.Г., Лосьев К. В.** Влияние профилактических ремонтных работ на уменьшение заболеваемости работников предприятий теплоснабжения, Вісник КНУ, збірник наукових праць- 2019. Вип № 48. С. 121-126.

Рукопись поступила в редакцию 17.03.2020

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
В. В. ТРОНЬ, канд. техн. наук, доц., А. А. ГАПОНЕНКО,
І. А. ГАПОНЕНКО, наукові співробітники
Криворізький національний університет
Д. І. ПАРАНЮК, інженер
ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН

Метою є підвищення ефективності процесу керування бурінням свердловин в умовах змінення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи, що буриться. Основним завданням є обґрунтування критерію та розроблення методів оптимізації процесу буріння свердловин в умовах змінення характеристик різновидів гірських порід у процесі буріння.

Методи дослідження. У роботі використано такі методи: аналіз вітчизняної і світової літератури з теми дослідження; методи аналітичного синтезу математичних моделей, методи математичної статистики і теорії імовірності для оброблення результатів експериментів; методи комп'ютерного моделювання; методи чисельного моделювання.

Наукова новизна полягає у тому, що для оптимізації процесу буріння свердловин запропоновано метод, який відрізняється від відомих тим, що визначення різновидів гірських порід здійснюють із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої моделі, навчання якої здійснюють на основі результатів каротажу із застосуванням ультразвукових, ядерно-фізичних та магнітометричних тестових вимірювань та з урахуванням оперативних параметрів силової установки у процесі буріння.

Практичне значення полягає у розробленні рекомендацій до визначення переліку параметрів, які необхідно враховувати у процесі оптимізації процесу буріння свердловин в умовах різних типів геолого-мінералогічної структури гірської породи. Зокрема, при бінарній структурі швидкість буріння і крутний момент є достатніми вхідними параметрами для ефективної оцінки, точність ідентифікації при цьому становить до 95%. Водночас, використання зазначених показників для оптимізації процесів буріння породи у залізорудних родовищах є недостатнім, оскільки точність розпізнавання різновидів моделлю із 2 входами не перевищує 55%. Тому доцільнішим є застосування 8 входів, що дозволяє досягти точності 91%.

Результати. Для опису складних процесів руйнування гірських порід у переважаних локальних областях у процесі буріння доцільно застосувати безрозмірний енергетичний критерій маятникових хвиль і геомеханічного квазірезонансу, що дозволяє надати кількісну оцінку оптимального енергетичного діапазону, що спрямовується бурильною установкою до бурового інструменту. Водночас, при розрахунку енергетичного критерію об'ємного руйнування гірської у процесі буріння необхідна інформація як про характеристики гірських порід, що буряться, так і параметри функціонування бурової установки.

Ключові слова: оптимізація, буріння свердловин, каротаж, різновиди руди, нейро-нечітка модель.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-96-101

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. У процесі керування бурінням на гірничих підприємствах важливим технологічним аспектом є налаштування параметрів та режимів функціонування бурового інструменту у відповідності до умов буріння з урахуванням технічних та технологічних факторів.

Оптимізація процесу керування бурінням свердловин характеризується інформаційною невизначеністю та потребує урахування численних збурюючих факторів. Особливої ваги дана проблема набуває при бурінні свердловин для різних в умовах складної структури гірської породи, що утворена декількома мінералого-технологічними різновидами. Оперативний розрахунок робочих параметрів буріння, які відповідають оптимальним значенням дозволить підвищити ефективність даного процесу.

Аналіз досліджень та публікацій. У праці [1] представлено теоретичне обґрунтування і експериментальну перевірку ефективності енергетичного критерію об'ємного руйнування гірських порід у процесі буріння. Даний критерій адаптовано до експлуатаційних характеристик різних бурових установок шляхом запровадження емпіричних коефіцієнтів для перетворення величини споживаної енергії буріння у відповідні енергетичні характеристики руйнування напруженої породи в зоні забою. Представлено математичний опис критерію мінімального споживання енергії буріння в залежності від напруженого стану та фізичних властивостей гірських порід, а також від сили обертового механізму подачі.

Вибір і адаптацію параметрів буріння запропоновано проводити з урахуванням характеристик масиву гірських порід конкретного родовища [2]. Зроблено висновок про необхідність аналізу їх напруженого стану типу та інших енергетичних факторів процесу буріння, оскільки кожен з них має суттєві особливості, що впливають на енергоспоживання у процесі буріння.

У роботах [3, 4] запропоновано безрозмірний енергетичний критерій ефективності буріння. Оцінка ефективності руйнування гірських порід при цьому здійснюється на основі енергетичних принципів нелінійної геомеханіки – явищ типового відгуку гірських порід на динамічні удари і хвилі коливального типу [5–8].

Як цільову функцію оптимізації буріння свердловин у праці [9] запропоновано використовувати мінімізацію вартості даного процесу при використанні двох або більшої кількості незалежних параметрів. Водночас, оптимізація буріння здійснюється на основі припущення, яке полягає у тому, що обладнання бурильної установки відповідає гірничо-геологічним умовам.

В умовах залізрудних родовищ характеристики гірничих порід варіюються у значних межах [10–13]. У зв'язку з цим, для уточнення контурів родовищ, формування їх геологічної моделі із визначенням розподілу в масиві мінералого-технологічних різновидів корисних копалин та їх якісних характеристик виконують дослідження.

Постановка завдання. Метою підвищення ефективності процесу керування бурінням свердловин в умовах змінення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи, що буриться. Основним завданням є обґрунтування критерію та розроблення методів оптимізації процесу буріння свердловин в умовах змінення характеристик різновидів гірських порід у процесі буріння.

Викладення матеріалу та результати. У математичній моделі процесів руйнування породи для механічних навантажень використовують показники граничної міцності й об'ємної міцності при одноосьовому стисканні, розтягненні та зсуві. Показник об'ємної міцності характеризується [1] трьома основними компонентами тензора напружень $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$, який задано коефіцієнтом Лодє-Надаї:

$$m_s = \frac{2s_2 - s_1 - s_3}{s_1 - s_2}. \quad (1)$$

Значення даного коефіцієнту варіюється у діапазоні $[-1; +1]$. Найбільш поширеними в гірничодобувній промисловості є показники одноосьового стиснення σ_c і розтягування σ_t гірських порід, що задають основний діапазон характеристик міцності гірських порід при різних типах напруженого стану. Слід відзначити, що для більшості типів порід їх межа міцності при одноосьовому стисканні істотно відрізняється від межі міцності при одноосьовому розтягуванні і найчастіше визначається виразом [14]: $s_c \hat{=} (5, 30)s_t$.

Для опису складних процесів руйнування гірських порід у перевантажених локальних областях (механічні удари, вибухи, землетруси, гірські удари) у відповідності до [1–3, 15–16] використано безрозмірний енергетичний критерій маятникових хвиль і геомеханічного квазірезонансу

$$h = \frac{W}{Mv_p^2}; \quad (2)$$

$$W = a(V)[U_0 + W_k], \quad (3)$$

де $M = rV$; $[U_0 + W_k]$ – сума відповідно потенційних та кінетичних енергій елементів конструкції гірських порід у зоні локального руйнування; $a(V)$ – коефіцієнт вибухового ефекту, визначений у [17]; V – об'єм фокусної зони; ρ – густина породи; v_p – швидкість Р-хвилі залежно від модуля Юнга, коефіцієнта Пуассона і густини гірських порід. У процесі буріння масиву гірських порід параметр U_0 характеризує напружений стан в свердловині з енергетичних позицій, а W_k – кінетичну енергію, що передається буровим інструментом. Отже, рівняння (2) і (3) дозволяють надати кількісну оцінку оптимального енергетичного діапазону, що спрямовується бурильною установкою до бурового інструменту з точки зору теорії маятникових хвиль.

При розрахунку енергетичного критерію об'ємного руйнування гірської у процесі буріння необхідна інформація про питому вагу руди і гірських порід у поєднанні із значенням поздовжньої швидкості

$$k = \frac{E(t)a}{V_p(t)rv_p^2}, \quad (4)$$

де $E(t)$ – енергія, що витрачається буровим інструментом для руйнування породи у контрольній ділянці свердловини; a – розрахунковий коефіцієнт сейсмічного впливу підземних вибухових робіт; $V_p(t)$ – обсяг розбитої породи у контрольній ділянці свердловини.

Серед керованих параметрів процесу буріння виділяють відношення навантаження на долото до його діаметру та частоту обертання [9]. Залежність швидкості буріння від зазначених вище параметрів та з урахуванням зносу робочої поверхні долота має вид

$$\frac{dF}{dt} = f \frac{\alpha W}{c d_b}, N, h, \quad (5)$$

де F – швидкість проникнення, h – знос висоти долота, N – частота обертання. Водночас, доцільним є застосування більш повної математичної моделі швидкості буріння, запропонована у [18]

$$\frac{dF}{dt} = \exp \left(\hat{a}_1 + \sum_{j=2}^8 a_j x_j \right) \hat{u}, \quad (6)$$

де $x_2 - x_8$ – параметри буріння: x_2 – глибина, x_3 – ущільнення пласта, x_4 – перепад тиску, x_5 – вага долота, x_6 – частота обертання, x_7 – зношування долота, x_8 – гідравлічна характеристика долота; параметри моделі: a_1 – міцність породи, a_2 – глибина, a_3 – ущільнення пласта, a_4 – перепад тиску, a_5 – осьове навантаження на долото, a_6 – частота обертання, a_7 – зношування долота, a_8 – гідравлічний показник. Параметри a_1, \dots, a_8 виразу (6) визначають за допомогою методу нелінійної регресії.

Вплив кожного із наведених параметрів на результат розрахунку полягає у наступному [18]. Вплив міцності пласта вважається таким, що дорівнює: $x_1 = 1$. Вплив глибини описують залежністю

$$x_2 = 8000 - D, \quad (7)$$

де D – глибина свердловини, м.

Вплив показника ущільнення пласта представлено виразом

$$x_3 = D^{0.69} (g_p - 9), \quad (8)$$

де g_p – градієнт порового тиску породи.

Перепад тиску у забої свердловини описують рівнянням

$$x_4 = D^{0.69} (g_p - r_c), \quad (9)$$

де r_c – еквівалентна густина циркулюючого бурового розчину у свердловині.

Розрахунок впливу ваги долота та діаметра наведено у рівнянні

$$x_5 = \ln \frac{\hat{e} W/d_b - (W/d_b)_t}{\hat{e} 4 - (W/d_b)_t} \hat{u}, \quad (10)$$

де d_b – діаметр долота; W – вага долота; t – час обертання долота.

Вплив швидкості обертання представлено рівнянням

$$x_6 = \ln [N/60], \quad (11)$$

де N – швидкість обертання.

Ефект зношування долота описують рівнянням

$$x_7 = (-h), \quad (12)$$

де h – величина притуплення зубців долота.

Гідравлічний показник визначається рівнянням

$$x_8 = \frac{pq}{350 ml_n}, \quad (13)$$

де μ – видима в'язкість; d_n – еквівалентний діаметр розпилювача.

Для оптимізації процесу буріння свердловин пропонується метод, що складається з таких етапів. На початку виконують буріння свердловин із фіксацією тестових параметрів силової установки та відбором кернів з наступним встановленням відповідності між тестовими параметрами силової установки та характеристиками гірської породи з кернів. Після чого проводять каротаж пробурених свердловин із використанням ультразвукових, ядерно-фізичних та магнітометричних методів з подальшим встановленням відповідності між тестовими параметрами силової установки, результатами ультразвукових, ядерно-фізичних, магнітометричних вимірювань та характеристиками гірської породи з кернів. На основі одержаної інформації синтезують та навчають адаптивні нейро-нечіткі структури для визначення основних різновидів гірських порід. Із застосуванням одержаної нейро-нечіткої моделі виконують формування бази даних основних різновидів гірських порід, використовуючи тестові результати ультразвукових, ядерно-фізичних, магнітометричних вимірювань та параметрів силової установки. На наступному етапі виконують буріння свердловин з фіксацією оперативних параметрів силової установки та на основі даних параметрів та одержаної раніше бази даних визначають різновиди гірської породи, що буриться. Після чого здійснюють визначення та встановлення оптимальних параметрів силової установки відповідно до вибраного критерію. Виконують динамічну корекцію параметрів силової установки відповідно до алгоритму адаптації. Після завершення процесу буріння свердловини виконують її каротаж із застосуванням ультразвукових, ядерно-фізичних та магнітометричних тестових вимірювань впродовж всієї її глибини та здійснюють нейро-нечіткої моделі та поповнення бази даних основних різновидів гірських порід на основі отриманої інформації, у тому числі, при наявності кернів. На останньому етапі виконують передавання отриманої інформації до центрального банку даних для використання при бурінні інших свердловин.

Електромагнітне акустичне збудження ультразвуку засновано на використанні сил Лоренца. Котушка індуктивності, що розташована поблизу поверхні гірської породи, формує високочастотний електромагнітний сигнал. Реакція металу відбувається в класичній глибині шкіршару δ , де активується вихровий струм $j(z,t)$ і пов'язане з ним електричне поле $E(z,t)$. Застосування статичного магнітного поля порушує баланс породжуючи силу Лоренца, яка діє на електрони та визначається таким співвідношенням [20]

$$F(z) = \frac{j(z) \cdot B_0}{n_0}, \quad (14)$$

де n_0 - щільність електронів. Для вектору магнітної індукції B_0 , орієнтованого по вісі Ox , сила Лоренца є поздовжньою, що призводить до зміни щільності заряду електронів вздовж Oz . Внутрішнє електричне поле $E(z)$, орієнтоване по вісі Oz , має існувати для підтримки нейтральності заряду. Його іони призводять до компресійних коливань амплітуди ξ_z . Вектор магнітної індукції B_0 спрямований до Oz , струми $j(z,t)$ спрямовані до Oy , а сила Лоренца діє у напрямку Ox . Сили Лоренца діють, спричиняючи напруження зсуву вздовж Ox , внаслідок чого виникають зсувні коливання амплітудою ξ_x . Отже, для цих двох поляризацій рівняння акустичної хвилі має вигляд [20]

$$\frac{\nabla^2 x}{\nabla t^2} - s^2 \frac{\nabla^2 x}{\nabla z^2} = \frac{|j \cdot B_0|}{r}, \quad (15)$$

де s – швидкість ультразвукової хвилі.

У праці [21] показано, що у випадку коли $\delta \ll \lambda$ та на відстанях $z \gg \delta$ маємо наступне хвильове рішення

$$|x| = \frac{BB_0}{m_0 d s w} \frac{1}{(1 + b^2)^{1/2}}, \quad (16)$$

де $b = q^2 d^2 / 2$; q – хвильове число. Коефіцієнт перетворення η електромагнітного акустичного перетворювача є відношенням генерованої акустичної потужності P до електромагнітної потужності Q , що надходить на поверхню породи

$$h = \frac{2B_0^2}{m_0 (d s w d)}. \quad (17)$$

Слід відзначити, що у феромагнітному матеріалі створюються додаткові сили через магнітострикційні напруження, оскільки ультразвукова хвиля більше не є лінійною функцією прикладеного магнітного поля.

У процесі проведених експериментальних досліджень в якості вхідних змінних використовувалися послідовні комбінації від 2 до 8 входів з наступного переліку [22]: швидкість буріння, крутний момент, питома енергія руйнування, горизонтальна вібрація, вертикальна вібрація, відхилення швидкості буріння, відхилення осевого навантаження, результати ультразвукових, магнітометричних та ядерно-фізичних вимірювань. Одержані результати показали, що в умовах бінарної структури гірської породи швидкість буріння і крутний момент є достатніми вхідними параметрами для ефективної оцінки, точність ідентифікації при цьому становить до 95%. Водночас, використання зазначених показників для оптимізації процесів буріння породи у залізрудних родовищах є недостатнім, оскільки точність розпізнавання різновидів моделлю із 2 входами не перевищує 55%. Тому доцільнішим є застосування 8 входів, що дозволяє досягти точності 91%.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Для опису складних процесів руйнування гірських порід у переважаних локальних областях, зокрема у процесі буріння доцільно застосувати безрозмірний енергетичний критерій маятникових хвиль і геомеханічного квазірезонансу, що дозволяє надати кількісну оцінку оптимального енергетичного діапазону, що спрямовується бурильною установкою до бурового інструменту. Водночас, при розрахунку енергетичного критерію об'ємного руйнування гірської у процесі буріння необхідна інформація як про характеристики гірських порід, що буряться, так і параметри функціонування бурової установки.

Для оптимізації процесу буріння свердловин запропоновано метод, який відрізняється від відомих тим, що визначення різновидів гірських порід здійснюють із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої моделі, навчання якої здійснюють на основі результатів каротажу із застосуванням ультразвукових, ядерно-фізичних та магнітометричних тестових вимірювань та з урахуванням з оперативних параметрів силової установки у процесі буріння.

Список літератури

1. **Oparin V. N., Timonin V. V., Karpov V. N., Smolyanitsky B. N.** Energy-based volumetric rock destruction criterion in the rotary-percussion drilling technology improvement // *Journal of Mining Science*. 2017. Vol. 53. No. 6. P. 1043–1064
2. **Karpov V.N.** Estimation procedure of down-the-hole air hammers in drilling process // *Fundamental and Application Mining Science*. 2016. Vol. 2. No. 3. P. 74–80.
3. **Oparin V.N., Timonin V.V., Karpov V.N.** Quantitative estimate of rotary-percussion drilling efficiency in rocks // *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. No. 6. P. 1100–1111.
4. **Timonin V.V., Karpov V.N.** Estimate of rock failure process of rotary-percussion drilling // *Fundamental and Application Mining Science*. 2016. Vol. 2. No. 3. P. 60–74.
5. **Adushkin V.V., Oparin V.N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeia. Part I // *Journal of Mining Science*. 2012. Vol. 48. No. 2. P. 203–222.
6. **Adushkin V.V., Oparin V.N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeia. Part II // *Journal of Mining Science*. 2013. Vol. 49. No. 2. P. 175–209.
7. **Adushkin V.V., Oparin V.N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeia. Part III // *Journal of Mining Science*. 2014. Vol. 50. No. 4. P. 623–645.
8. **Adushkin V.V., Oparin V.N.** From the alternating-sign explosion response of rocks to the pendulum waves in stressed geomeia. Part IV // *Journal of Mining Science*. 2016. Vol. 52. No. 1. P. 1–35.
9. **Pervez A. S. N.** Real time rate of penetration, prediction and optimization during drilling operations. Masters thesis, Universiti Teknologi PETRONAS. 2012. 88 p.
10. **Stupnik M.I., Kalinichenko V.O., Pysmennyi S.V., Kalinichenko O.V.** Determining the qualitative composition of the equivalent material for simulation of Kryvyi Rih iron ore basin rocks // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2018. Vol. 4. P. 21–27.
11. **Stupnik N., Kalinichenko V., Pismennij S., Kalinichenko E.** Features of underlying levels opening at «ArcelorMittal Krivyi Rih» underground mine // *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 2015. P. 39–44.
12. **Kalinichenko V., Pysmennyi S., Shvaha N., Kalinichenko O.** Selective underground mining of complex structured ore bodies of Kryvyi Rih Iron Ore Basin // *E3S Web of Conferences*. 2018. Vol. 60. 00041.
13. **Fedko M.B., Muzyka I.O., Pysmennyi S.V., Kalinichenko O.V.** Determination of drilling and blasting parameters considering the stress-strain state of rock ores // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2019. № 1. P. 37–41.
14. ГОСТ 50544-93. Породы горные. Термины и определения. [Чинний від 2010-02-18]. 108 с.

15. **Oparin V.N.** Energy-based volumetric rock destruction criterion // Miner's Week-2009: Proceedings. Moscow: MGGU, 2009. P. 43–69.

16 **Oparin V.N., Simonov B.F.** Nonlinear Deformation-wave processes in the vibrational oil geotechnologies // Journal of Mining Science. 2010. Vol. 46. No. 2. P. 95–112.

17. **Садовский М. А., Кедров О. К., Пасечник И. П.** О сейсмической энергии и объеме очагов при коровых землетрясениях и подземных взрывах // Доклады. АН СССР. 1985. Том. 283. №5. С. 1153–1156.

18. **Bourgoyne A.T., Young F.S.** A multiple regression approach to optimal drilling and abnormal pressure detection // Society of Petroleum Engineers Journal. 1974. Vol. 14(4). P. 371-384.

19. **Petcher P., Potter M., Dixon S.** A new electromagnetic acoustic transducer (EMAT) design for operation on rail // NDT & E International. 2014. Vol. 65.

20. **Aliouane S., Hassam M., Badidi Bouda A., Benchaala A.** Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs) Design Evaluation of their Performances // Proceedings of 15th World Conference on Non-Destructive Testing, 15-21 October 2000. URL: <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn591/idn591.htm>

21. **Dobbs E. R.** Electromagnetic generation of ultrasound // Research Techniques in Nondestructive Testing. 1973. Vol. 2, P. 419-441.

22. **Tron V., Tsokurenko O., Paraniuk D., Haponenko I.** Formation of the adaptive fuzzy model of the rock geological structure for exploratory drilling // E3S Web of Conferences. 2019. Vol. 123. 01037.

Рукопис подано до редакції 16.04.2020

УДК 622.271.3

Є.О. НЕСМАШНИЙ, д-р техн. наук, проф.,

Г.І. ТКАЧЕНКО, К.В.ГЕРАСИМОВА, кандидати техн.наук, доценти

Криворізький національний університет

РОЗРОБЛЕННЯ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СКОЧУВАННЯ БУТІВ ГІРСЬКОЇ ПОРОДИ З ПОРОДНИХ ВІДКОСІВ

Мета. В статті моделюються кінетичні та енергетичні процеси падіння уламків гірничих порід з вище лежачих горизонтів на транспортні берми кар'єру № 4 ПАО «ЦГЗК». Обчислюється ймовірний радіус розльоту уламків гірської породи при їх падінні з породного укосу висотою понад 30 м з метою подальшого запобігання шкоди від цих процесів і підвищення безпеки відкритих гірничих робіт.

Методи дослідження. Поставлені завдання визначили комплексний метод досліджень, що включає: аналіз науково дослідних робіт по геомеханічному обґрунтуванню стійких параметрів уступів бортів та відвалів кар'єру № 4 ПАО «ЦГЗК»; інженерно-геологічні вишукування, використання фундаментальних законів фізики, механіки та комп'ютерні технології і обчислювальні програми, які розроблені авторами, для виконання аналітичних розрахунків, оброблення, аналізу результатів досліджень.

Наукова новизна. Вперше, результати, які отримано за допомогою розробленої фізико-математичної моделі, дозволяють науково обґрунтувати ймовірні негативні процеси від скочування або падіння уламків гірничої породи, які відриваючись від поверхні схилів, скочуються до нижніх горизонтів, набуваючи значної швидкості.

Практичне значення. Розроблена фізико-математична модель для визначення ймовірного радіусу розльоту уламків гірничої породи падаючих з верхніх горизонтів кар'єра №4 ПРАТ «ЦГЗК» дозволяє оцінити їх величину при таких очікуваних процесах: - скочуванні або ковзанні по поверхням простого або складного профілю з наступним вільним падінням; - скочуванні по поверхні породного схилу складного профілю з наступним вільним падінням і непружному, нецентральному ударі об поверхні нижчих транспортних бERM або груп уступів.

Результати. Проведені дослідження й виконані аналітичні розрахунки дозволили встановити, що при існуючих геометричних параметрах уступів, груп уступів кар'єру №4 ПАО «ЦГОК», швидкість падіння уламків породи на горизонти транспортних бERM очікується в межах 0-34 м/с, кінетична енергія падаючих уламків від нуля до 12000 кДж, а значення радіусу їх розльоту можливо очікувати в межах від 1,5 до 27,2 м, в залежності від висоти схилу, його профілю, кута нахилу і очікуваних значень коефіцієнтів тертя кочення та ковзання кусків породи по поверхні схилу.

Ключові слова: відкриті гірничі роботи, падіння породних уламків, коефіцієнти тертя кочення і ковзання; радіус розльоту.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-101-106

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Сучасний стан відкритих гірничих робіт в Криворізькому залізорудному басейні характеризується їх значною глибиною. Так на кар'єрі № 4 ПАТ «ЦГЗК» гірничі роботи ведуться на глибині 320 метрів. В по-

дальшому глибина розробки залізної руди буде збільшуватись до 500-750 м. При цьому кут нахилу бортів, груп уступів та уступів становить 45-75°.

У цих умовах значну небезпеку уявляють уламки гірничої породи, які відриваючись від поверхні схилів, скочуються до нижніх горизонтів, набуваючи значної швидкості, а значить і кінетичної енергії.

Для запобігання шкоди від цих процесів, розробки технічних заходів для захисту людей і гірничого обладнання, необхідна відповідна фізико-математична модель, що описує процеси кочення та ковзання уламків гірських порід по поверхні породних схилів. Саме для розв'язання цих задач і присвячено дану роботу.

Аналіз досліджень і публікацій. Віддаючи належне науково практичним напрацюванням в області геомеханіки та безпеки відкритих гірничих робіт, треба відзначити, що у гірничотехнічній літературі небагато даних про методи і засоби експериментального визначення величини коефіцієнтів тертя кочення і ковзання стосовно до скочування та падіння уламків гірничих порід з вище лежачих горизонтів на транспортні берми залізородних кар'єрів. У роботі [7] наведено результати визначення кутів тертя відбитої залізної руди по породному моноліту. При цьому було встановлено істотне зменшення кута тертя ковзання при збільшенні крупності відбитої залізної руди, що й відображено на графіку, який наведено на рис. 1.

Апроксимація даних роботи [7], дозволила отримати аналітичний вираз для опису цієї залежності кута тертя ковзання φ зруйнованої скельної породи від її крупності d (в мм) в наступному вигляді: $\varphi = 67,7 d^{-0,145}$, град. Якість апроксимації цієї залежності досить висока і становить: $R^2 = 0,986$.

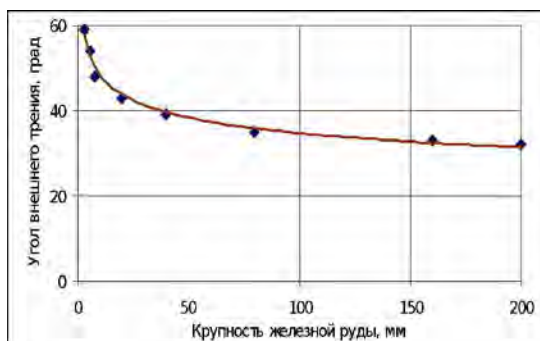


Рис. 1. Залежність кута тертя ковзання від крупності залізистих кварцитів [7]

На підґрунті досліджень [6,7], нами отримано аналітичний вираз для визначення часу ковзання кусків гірської породи по поверхні укосу в залежності від їх лінійних розмірів в наступному вигляді

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g \sin a [\sin a - \operatorname{tg}(67,7 d^{-0,145}) \cos a]}}$$

де h - висота породного укосу, м; d - лінійний розмір куска гірської породи, мм; a - кут нахилу породного укосу, град.

Цей вираз однозначно показує, що в процесі ковзання кусків породи по поверхні породного укосу буде відбуватися їх поділ по фракціях. Дрібні куски породи залишаться на поверхні укосу, великі наберуть значну швидкість і досягнуть запобіжної або транспортної берми.

Практикою гірничих робіт встановлено, що масивні шматки породи, що мають окатанну форму, котяться по поверхні укосу, а шматки породи меншого розміру ковзають по поверхні укосу вниз [6,7]. У зв'язку з цим доцільно розглядати кинематику і динаміку цих процесів окремо.

Викладення матеріалу. Основними параметрами при вивченні каменепадних процесів і проектуванні споруд інженерного захисту від них, є траєкторія падіння уламків породи та енергія їх впливу на захисну конструкцію.

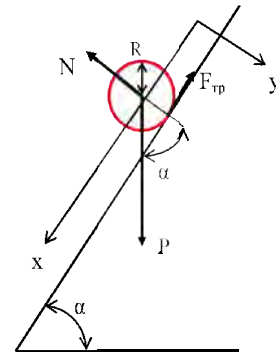
Розглянемо процес руху каменів по поверхні породного укосу. При цьому будемо вважати, що камені, які падають, відповідають моделі твердого тіла, що деформується і характеризуються наступними фізико-механічними параметрами: об'ємна вага γ ; лінійний розмір d ; коефіцієнт тертя кочення k і ковзання f породи по схилу. Схил (укос) характеризується кутом нахилу і відповідним поперечним профілем. Як відомо, рівновагу твердого тіла, що деформується визначається в загальному випадку системою рівнянь [5], які можуть бути перетворені в рівняння руху для твердого тіла.

Розглянемо рух уламка гірничої породи кулястої форми масою m і радіусом R під дією сили тяжіння P по похилій поверхні породного укосу. Позначимо координатні осі так, як це показано на рис. 2.

Рис.2. До розрахунку процесу скочування шматків породи по поверхні укосу

Тоді рівняння руху шматка породи кулястої форми можна представити у вигляді

$$\begin{cases} m \frac{d^2x}{dt^2} = mg \sin a - F_{\text{тр}} \\ m \frac{d^2h}{dt^2} = mg \cos a - N \\ J \frac{d\omega}{dt} = F_{\text{тр}} R, \end{cases}$$



де J - момент інерції кулі відносно осі, що проходить через центр ваги. Припустимо, що переміщення уздовж осі OY будуть мінімальні і можуть бути прийняті рівними нулю. Після виконання математичних перетворень і враховуючи закон Кулона для визначення величини сили тертя кочення, остаточно маємо

$$k = \frac{2}{7} Rtg a.$$

Наведене рівняння зумовлює граничну умову кочення кулі по поверхні укосу. З урахуванням того, що куски гірської породи характеризуються середнім розміром шматка d (даний параметр будемо вважати аналогічним діаметру кулі, то вищенаведений вираз можна перетворити до наступного виду $d=7 ktg$. На рис. 3 наведено графічні залежності між розміром кусків породи, що котяться і кутом нахилу поверхні укосу, які отримані при різних значеннях коефіцієнта тертя кочення k .

При геометричних параметрах, що знаходяться вище відповідних кривих, куски породи будуть котитися по поверхні укосу, а нижче - знаходитись в стані спокою. Практичне значення залежностей (рис. 3) полягає в тому, що при відомому куті нахилу борта кар'єру або групи уступів можна визначити розмір кусків породи, які будуть котитися по поверхні укосу. Очевидно, що куски породи меншого розміру будуть перебувати в стані спокою.

Рис. 3. До визначення розміру кусків породи, які будуть котитися або перебувати в стані спокою на поверхні укосу

Так при куті нахилу породного укосу в 50° , котитися по його поверхні будуть куски породи розміром понад 0,5 м, при коефіцієнті тертя кочення рівному $k=0,1$ м. Встановивши даний розмір, можна, використовуючи гістограму розподілу кусків породи на поверхні укосу, визначити їх.

Після розрахунку кінетичної енергії та швидкості кочення кусків породи по поверхні укосу побудовано залежності кінетичної енергії куска породи, що скотився з укосу від його: - лінійного розміру (висота укосу 100 м, коефіцієнт тертя кочення 0,1 м);- висоти (розмір шматка породи 40 см, коефіцієнт тертя кочення 0,1 м) - лінійного розміру (висота породного укосу 100 м, коефіцієнті тертя кочення 0,1 м), див. рис. 4, 5.

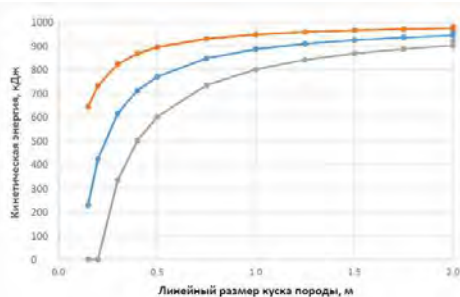
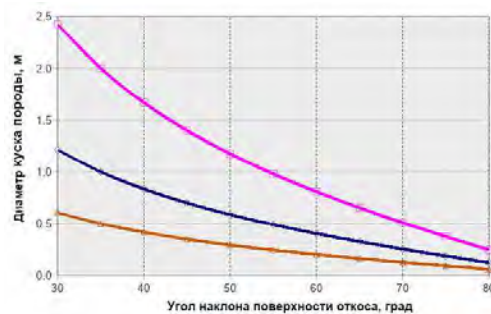


Рис.4. Залежність кінетичної енергії куска породи, що скотився, від його лінійного розміру

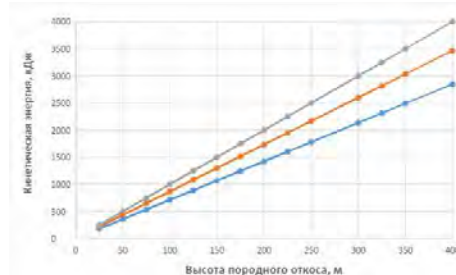


Рис.5. Залежність кінетичної енергії куска породи, що скотився, від висоти породного укосу

На рис. 6, 7 наведено залежності лінійної швидкості шматка породи, що скотився з породного укосу від його лінійного розміру (висота породного укосу 100 м, коефіцієнт тертя кочення 0,1 м); - від висоти породного укосу (розмір шматка породи 40 см, коефіцієнт тертя кочення 0,1 м).

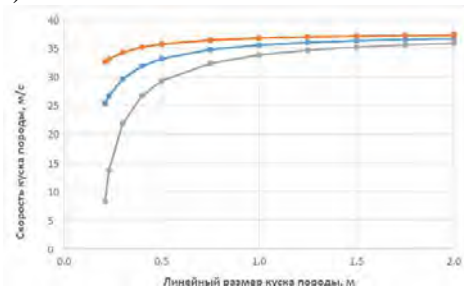


Рис. 6. Залежність кінцевої швидкості куска породи від його лінійного розміру

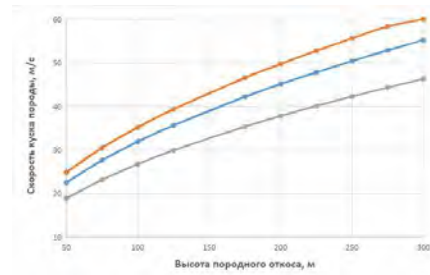


Рис. 7. Залежність кінцевої швидкості скотився шматка породи від висоти породного укосу

У рамках створеної фізико-математичної моделі була розглянута схема падіння каменів, яка полягала в тому, що камені скочуються з верхньої групи уступів, б'ються об поверхню нижньої групи уступів і після відбиття від цієї поверхні вільно падають на поверхню транспортної берми.

Очевидно, що удар каменю об поверхню укосу не буде абсолютно пружним, а тому, основним параметром, що його характеризує, буде коефіцієнт відновлення ρ , під яким розуміється відношення нормальної складової швидкості після удару V_n до нормальної складової швидкості до удару V_d , тобто: $\rho = V_n / V_d$.

З даного виразу, після відповідних математичних перетворень, можна отримати аналітичний вираз для визначення коефіцієнта відновлення [5] $\rho = \text{tg } \varphi_1 / \varphi_2$, де φ_1 - кут падіння каменя на поверхні укосу, град; φ_2 - кут відбиття каменю після удару по поверхні укосу (кут відскоку), град. У роботі [14] наведено результати визначення коефіцієнта відновлення при непружному ударі скельних і напівскельних порід. Для основної маси скельних порід в кар'єрах ПРАТ «ЦГЗК», його значення може бути прийнято в межах $\rho = 0,3 - 0,8$.

Знаючи значення проекції швидкості каменю після відскоку на координатні осі, можна визначити можливий радіус розльоту шматка породи при його падінні на горизонтальну транспортну берму.

Якщо розглянути поверхню укосу простого профілю, зображеного на рис. 8 і вважати, що куски гірничої породи певного розміру d будуть скочуватися, практично без початкової швидкості, вниз по поверхні борту кар'єру або групи уступів висотою h , нахиленого під кутом α до горизонту, то пройшовши деяку відстань по горизонтальній поверхні L вони зупиняться.

Використовуючи теорему про кінетичну енергію, сума робіт всіх діючих на кусок породи сил на шляху його руху, буде дорівнює нулю.

Сумарна робота на всьому шляху руху куска породи складається з роботи сил тяжіння і роботи сил тертя кочення. Тоді

$$mgS_1 \sin \alpha - \frac{2k}{d} mgS_1 \cos \alpha - \frac{2k}{d} mgS_2 = 0,$$

де k - коефіцієнт тертя кочення, м; d - розмір куска породи, м.

Отже, наприклад, визначивши в результаті візуального огляду величини S_2 і d і знаючи висоту h і кут нахилу відвалу α , з наведеного виразу може бути визначена величина коефіцієнта тертя кочення уламків гірничих або відвальних порід.

Аналітичне визначення коефіцієнта тертя кочення уламків гірничої породи на підставі аналізу фактичних даних про геометричні параметри кусків породи, що скотилися з поверхні зовнішніх відвалів ПАТ «ЦГЗК» дозволило встановити його значення в межах: $k = 0,44 \div 0,68$.

Профілі бортів сучасних глибоких залізородних кар'єрів мають, як правило, складну форму. При цьому верхні та нижні групи уступів мають на практиці різну висоту h і відбудовані під різними кутами нахилу α (рис. 9). Горизонтальна транспортна берма, яка вимагає захисту

від падаючих уламків скельних і напівскельних порід, має ширину, яка може відрізнятись від проектних параметрів.

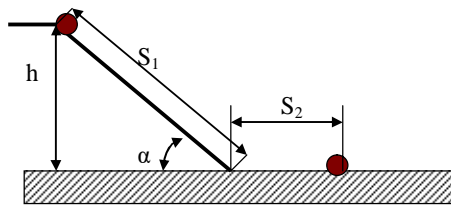


Рис. 8. До визначення коефіцієнта тертя ковчання

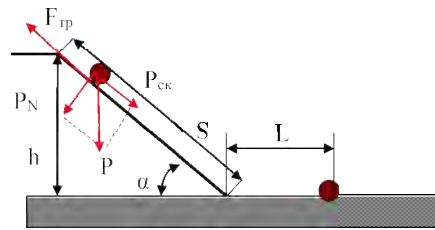


Рис. 9. До визначення радіуса розльоту при скочуванні кусків гірської породи по поверхні укосу

Найбільшу небезпеку становлять куски породи, які котяться з верхніх горизонтів, так як в цьому випадку їх кінетична енергія буде максимальна і її значення визначить максимальну дальність падіння (радіус розльоту) кусків породи на майданчику транспортної берми L (рис. 9). Визначення параметра L і є метою фізико-математичних розрахунків, так як його величина визначає необхідність і місце установки захисних споруд.

Розглядався процес скочування кусків породи з верхніх горизонтів борту кар'єру для визначення можливого радіуса їх розльоту на рівні горизонтальної транспортної берми. Процес ковзання шматка породи по поверхні верхніх горизонтів борту кар'єру можна не розглядати, тому що в цьому випадку його швидкість і кінетична енергія будуть, як показано в попередньому параграфі, істотно менше, а значить і значення параметра L також істотно менше.

На рис. 10а,б наведено теоретичні залежності для визначення радіуса розльоту кусків породи при їх скочуванні з поверхні укосу та при їх ковзанні по поверхні укосу відповідно.

На рис. 10а,б наведено теоретичні залежності для визначення радіуса розльоту кусків породи при їх скочуванні з поверхні укосу при різних розмірах кусків породи і коефіцієнтах тертя ковчання відповідно.

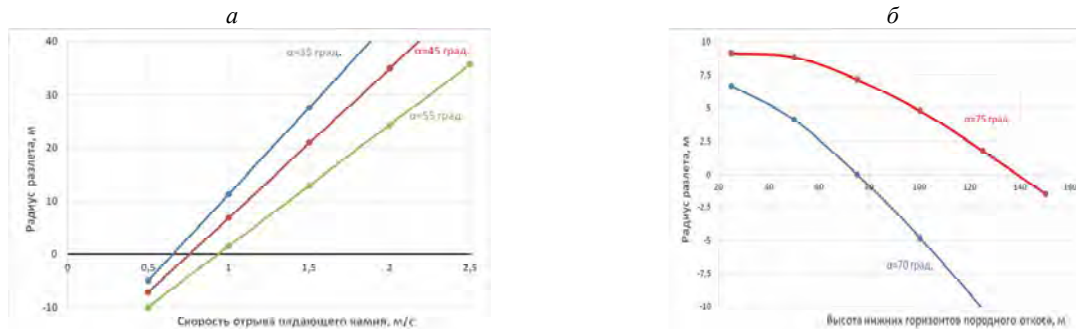


Рис. 10. Теоретичні залежності радіуса розльоту кусків породи від їх швидкості a і висоти нижніх горизонтів породного укосу b - (Негативні значення відстаней свідчать про те, що падаючий камінь не може досягти горизонтальної поверхні транспортної берми, не вдарившись о похилу поверхню нижньої групи уступів)

Висновки. Встановлено, що при існуючих геометричних параметрах бортів і груп уступів кар'єра №4 ПАТ «ЦГЗК», при ймовірному падінні кусків породи з верхніх горизонтів на горизонти транспортних бERM, значення радіуса їх розльоту можна очікувати в межах від 1,5 до 27,2 м, в залежності від висоти укосу і його профілю, кута нахилу і очікуваних значень коефіцієнтів тертя ковчання і ковзання кусків породи по поверхні укосів. Розроблена фізико-математична модель для визначення ймовірного радіуса розльоту кусків породи падаючих з верхніх горизонтів кар'єра №4 ПАТ «ЦГЗК» дозволяє оцінити їх величину при таких очікуваних процесах:

- скочування або ковзання кусків породи по плоскій поверхні породного схилу;
- скочування або ковзання кусків породи по поверхні породного схилу складного профілю;
- скочування або ковзання кусків породи по поверхні породного схилу складного профілю з наступним вільним падінням;

скочування кусків породи по поверхні породного схилу складного профілю з наступним вільним падінням і непружному, нецентральному ударі об поверхню схилу нижчих груп уступів.

Виконані дослідження направлено на подальше запобігання шкоди від цих процесів і підвищення безпеки відкритих гірничих робіт.

Список літератури

1. Розроблення фізико-математичної моделі скошування бутів гірської породи з породного відкосу висотою понад 30 м / Звіт по НДР. Док. № 8-59-19 **Наук. керівн., проф. Несмашний Є.О.** // КП «Академічний дім» АГН України. Кривий Ріг, 2019. – 67 с.
2. **Ткаченко Г.І.** Фізико-математична модель утворення поверхні зсуву в зовнішніх відвалах залізородних кар'єрів Вісник Криворізького технічного університету. - Кривий Ріг, 2011. - Вип. 28. - С. 65-70.
3. **Несмашний Е.А. и др.** Обоснование оптимальных параметров открытых горных выработок на Криворожских карьерах. - Кривой Рог, Изд-во «Дионис», - 2012, -398 с.: ил.
4. Геомеханическое обоснование параметров отвала «Западный» и его влияние на устойчивость западного борта карьера № 4 ПАО «ЦГОК» / отчет по НИР/ **рук. Несмашный Е.А.** // КП «Академический дом» АГН Украины. Кривой Рог. – 2011
5. **Несмашний Є.О.** Класична механіка. Молекулярна фізика і термодинаміка. Вид-во «Мінерал», Кривий Ріг, 2007. -213 с.
6. **Воронков И.М.** Курс теоретической механики. М.: Гостехиздат, 1954, -552 с.
7. **Барон Л.И.** Характеристики трения горных пород. М.: Наука, 1967, - 208 с.
8. Комп'ютерна програма для оцінки і розрахунку стійкості укосів бортів кар'єрів і ярусів відвалів «KUSTO»: Свідчення про реєстрацію авторського права на твір. Україна, МСП 03680 / **В.О.Півень, Д.М.Шпирок, О.В.Романенко, Є.Я.Бехлер, Є.О.Несмашний, О.В.Максимов, Г.І.Ткаченко.** – № 18720; Заявл. 03.10.06; Зареєстр. 22.11.06.
9. **Nesmashnyi Ye.A., Tkachenko G.I.** «Stability evaluation of jsc "Yugok" eastern pit wall taking into account seismic mass blasting effect». Вісник Криворізького національного університету, 2017. - Кривий Ріг: .- Вип. 44. - С. 27-32.
10. **Несмашний Е.А., Герасимова Е.В., Ткаченко Г.И.** Геомеханическое обоснование устойчивых параметров отвалов карьера № 4 ПАО «ЦГОК». Вісник Криворізького національного університету. - Кривий Ріг, 2016.- Вип. 43. - С.127-132.
11. Вскрытие и разработка глубоких горизонтов карьера №4 для поддержания производственной мощности комбината (II-я очередь углубки) / Проект // Инженерно -геологические изыскания. ГП «УкрНИПИИ промтехнология». -2013
12. **Szabo B.H., Lee G.C.** Derivation of Stiffness Mat-rices for Problems in Plane Elasticity by Galerkin's Method. Intern. J. of Numerical Methods in Engineering, 1, 301-310, 1969
13. **Zienkiewicz O.C.** Finite Elements in the Solution of Field Problems. The Engineer, 507-570, 1971.
14. EOTA. ETAG 027 Guideline for European technical approval of falling rock protection kits. – 2013.
15. **Gerber, W.** Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL). Guideline for the approval of rockfall protection kits / W. Gerber. – Berne: Swiss Federal Research Institute WSL Berne, 2001. – 39 с.

Рукопис подано до редакції 30.04.2020

УДК 691.32

Н. В. АСТАХОВА, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ АКТИВАЦІЇ НА ВЛАСТИВОСТІ НАПОВНЮВАЧА З ЗАЛІЗОВМІСНИХ МІНЕРАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ

Метою дослідження є отримання малоцементного бетону, що має високу швидкість формування фізико-механічних властивостей, шляхом модифікації його структури активованими залізистими цеолітами мінеральними комплексами, які представляють собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂» різного ступеня дисперсності і залізосилікатним лужним колоїдним розчином.

Використовувались **методи** математичного моделювання для дослідження процесів формування структури та фізико-механічних властивостей бетонів, а також стандартні і спеціальні методи дослідження для визначення властивостей наповнювача з залізовмісних мінеральних комплексів та статистичний аналіз для обробки результатів експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що теоретично доведена і експериментально підтверджена можливість модифікації структури бетону шляхом введення до його складу активованих залізистими цеолітами мінеральних комплексів, які представляють собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂» різного ступеня дисперсності, і залізосилікатного лужного колоїдного розчину, що призводить до збільшення ступеня і швидкості гідратації цементу, а також до підвищення його активності.

© Астахова Н. В., 2020

Практична значимість результатів полягає в отриманні наповнювача зі збільшеною гідравлічною активністю, який представляє собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂» різного ступеня дисперсності, активованого силікатами лужного металу, що дозволяє економити цемент та розширює сировинну базу будівельних матеріалів.

Результати. В статті проаналізовані результати дослідження наповнювача з залізовмісних мінеральних комплексів.

В якості критерію активуючого впливу наповнювача на властивості цементного каменю використовувалась його гідравлічна активність, яка є однією з найважливіших характеристик якості мінеральних добавок, а також склад новоутворень, які були отримані в процесі його активації.

Встановлено, що активація мінеральних комплексів, які представляють собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CO₂» силікатами лужного металу призводить до збільшення їх гідравлічної активності за рахунок утворення на їх поверхні мінералів групи цеолітів на основі заліза, що сприяє зв'язуванню гідроксиду кальція.

Ключові слова: наповнювач, активація, гідравлічна активність, залізовмісні гірські породи, відходи гірничозбагачувальних комбінатів, силікати натрію, залісті цеоліти, водоутримуюча здатність.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-106-112

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Територія України займає трохи більше 60 млн гектарів, 160 тисяч з яких вкриті промисловими відходами. Мова йде про 36 млрд тон твердих відходів. Очевидно, що це серйозний виклик екології. Окрім соціально-екологічних проблем, важливим є і економічний напрям. У сучасному світі давно навчилися заробляти на переробці промислових відходів, утилізація яких означає використання відходів як вторинної сировини, будівельних матеріалів тощо.

Аналіз досліджень і публікацій. В наш час, у зв'язку зі збільшенням цін на пісок, щебінь та інші інертні матеріали для будівництва, виникла потреба знайти економічні і раціональні методи використання місцевої сировини для виробництва будівельних матеріалів. Додатковим, посилюючим фактором в схильності до цих рішень є постійно зростаючі ціни на енергоносії і, як наслідок, зростаюча вартість транспортування матеріалів і сировини на будівельний майданчик [1].

Світовий та вітчизняний досвід показує, що оптимальним виходом з цієї ситуації може бути використання бетонів з направлено функціональними органічними та мінеральними добавками, які забезпечують отримання надійних будівельних конструкцій [1].

В теперішній час відходи гірничозбагачувальних комбінатів використовуються для додаткового видобутку корисних компонентів та в якості одного з компонентів складного в'язучого [2, 3] або дрібного заповнювача.

В роботі [4] відзначається, що для виробки 1 т сталі традиційним способом у виробництві застосовується більше 3 т первинних природних сировинних ресурсів (залізородні матеріали та кокс), які накопичуються навколо підприємств, забруднюючи оточуюче середовище. Крім того, в атмосферу викидаються токсичні речовини, які небезпечні для людини. Особливо це стосується людей, які проживають в містах, що безпосередньо утворились в місцях розташування промислових підприємств, гірничо-металургійних комбінатів [4].

При цьому очевидно, що чим повільніше будуть вводиться в експлуатацію нові мінеральні ресурси тим кращим буде навколишнє середовище. Це можливо за умови залучення до експлуатації вже накопичених техногенних ресурсів, зокрема залізовмісних відходів видобутку і збагачення залізних руд, відходів металургійних підприємств тощо [4].

Відсутність єдиного економічного підходу, здатного оцінити варіанти технологічного розвитку гірничорудних підприємств з врахуванням соціальних та екологічних наслідків, а також комплексного використання природної сировини як цілісного діючого механізму, обумовлює необхідність комплексного вирішення ряду завдань, які б дозволили отримати додаткове джерело ресурсів за рахунок використання відходів виробництва та, найголовніше, відвернути настання екологічної катастрофи, яка прирівнюється за масштабами до ситуації на ЧАЕС [5-7].

Недосконалість законодавчої бази щодо користування надрами та втрати земельних ресурсів за рахунок розширення території відвалів і хвостосховищ, а також низький рівень штрафів для власників гірничорудних підприємств не сприяли комплексному використанню мінеральної сировини [5].

З усією гостротою, яка відповідає сучасним вимогам до функціонування гірничорудних підприємств, ці питання потребують вирішень з урахуванням всіх факторів впливу та особливостей технології залучення відходів збагачення [8, 9]. Великий вклад було внесено дослідниками в проблему розробки заходів щодо зниження негативного впливу на оточуюче середовище вна-

слідок використання відходів збагачення [10]. Проблеми даного питання досліджувалися багатьма вченими як в Україні, так і за кордоном [11, 12].

Постановка задачі. Метою дослідження є отримання малоцементного бетону, що має високу швидкість формування фізико-механічних властивостей, шляхом модифікації його структури активованими залізистими цеолітами мінеральними комплексами і залізосилікатним лужним колоїдним розчином.

Рішення проблеми зниження витрати цементу в технології бетону можливо за рахунок вдосконалення структури і складу цементу включенням в його склад нових ефективних компонентів. Одним з таких компонентів являються відходи гірничозбагачувальних комбінатів, які присутні у великій кількості, займають чималі території та потребують утилізації.

Відходи гірничозбагачувальних комбінатів, як продукти технологічного процесу переробки і збагачення бідної залізної руди, представляють собою штучну кварцево-залізисту мінеральну суміш, яка складається в основному з кварцу, бідних залишків кварцу з гематитом, магнетитом, сидеритом з включенням вільних зерен магнетиту, гематиту та зростку рудних мінералів [13].

Відходи із пульпопроводів характеризуються відносно постійним вмістом кремнезему (58-65%) і заліза (11-18%). Вміст пиловидних, глинистих та мулистих часток не перевищує 5%, органічні домішки відсутні [13].

Викладення матеріалу та результати. В якості критерію активуючого впливу наповнювача на властивості цементного каменю, згідно [14], використовувалась його гідравлічна активність, яка являється однією з найважливіших характеристик якості мінеральних добавок, а також склад новоутворень, які отримують в процесі його активації.

Враховуючи, що згідно [3], цеолітоподібні мінерали на основі заліза утворюються при взаємодії системи « $\text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{Na}_2\text{O}$ » з лугами, в якості вихідних речовин для отримання наповнювачів використовувалися відходи гірничозбагачувальних комбінатів та залізовмісні гірські породи Криворізького залізрудного родовища, що представляють собою систему « $\text{FeO} - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2$ » та відрізняються вмістом основних оксидів та їх співвідношенням. В якості активуючого реагенту в кожному зі способів використовувались силікати натрію, у вигляді водного розчину – рідкого скла.

Отримання наповнювача здійснювали як простим помелом вихідних речовин, так і їх помелом при одночасній активації, яку здійснювали двома способами: мокрим та сухим.

При активації наповнювача в якості активуючої речовини використовували силікати натрію. При цьому було отримано три види сумішей з різною концентрацією компонентів (табл. 1).

Таблиця 1

Співвідношення компонентів при приготуванні добавки

Серія	Співвідношення між залізовмісним компонентом та силікатами натрію	Співвідношення між залізовмісним компонентом та рідким склом	Кількість залізовмісного компонента, г	Кількість рідкого скла, мл
05	0,1	1 : 0,5	100	40
10	0,2	1 : 1	100	80
20	0,4	1 : 2	100	160
30	0,6	1 : 3	100	240
00	0	0 : 1	-	100

Активация залізовмісних мінеральних речовин здійснювалася шляхом їх механічної обробки разом з силікатами натрію з метою розкриття нових поверхонь з некомпенсованими хімічними зв'язками.

В дослідженнях проведено обґрунтування необхідних властивостей активованого наповнювача. Дослідження активованих залізовмісних мінеральних речовин (як відходів гірничозбагачувальних комбінатів так і гірських порід) здійснювалось для виявлення таких показників їх властивостей, які дозволяють при прийнятній легкоукладальності бетонної суміші досягнути найбільшої швидкості набору міцності бетону та найменших деформацій його усадки.

В лабораторних умовах була проведена активація наповнювачів сухим та мокрим способами в кульовому млині. Параметри завантаження кульового млина відпрацьовувалися для досягнення найбільшого розмелюючого ефекту, що дозволило отримати питому поверхню в широкому діапазоні: від 500 до 800 м²/кг.

Тривалість помелу при сухому способі активації складала 84, 210, 350 хв, що дозволило досягнути збільшення питомої поверхні відповідно на 150, 250 і 305 м²/кг від вихідної.

Тривалість помелу при мокрому способі активації складала 52, 145, 230 хв для досягнення заданого приросту питомої поверхні.

Суть сухого способу активації, що проводили з рідким склом, полягала в наступному. В кульовому млині проводили помел залізовмісних гірських порід відповідно до методики, описаної вище, після чого наважки отриманого продукту (кожна по 100 г) поміщали в три скляні колби ємністю по 500 мл. В кожну з колб добавляли певну кількість натрієвого рідкого скла, яке характеризувалося модулем 2,8, щільністю 1250 кг/м³.

Кожна з приготовлених сумішей нагрівалась на електроплиті з терморегулятором до заданої температури та витримувалась при цій температурі протягом заданого часу. Після чого нагрів припиняли, і суміш повільно охолоджувалась до температури 20°C з наступною витримкою на протязі доби.

Після цього рідина з колби зливалась в іншу ємкість, а частинки залізовмісної речовини (відходів гірничозбагачувальних комбінатів або гірських порід) що залишилися, промивали водою та висушували до постійної маси.

В результаті були отримані водні колоїдні розчини продуктів взаємодії залізовмісного мінерального комплексу з силікатами натрію і активовані залізовмісні мінеральні комплекси в сухому вигляді. Отримані колоїдні розчини добавляли в воду затверення портландцементу в кількості, яка була задана планом експерименту.

При мокрому способі активації помел залізовмісних мінеральних комплексів в кульовому млині (за методикою, яка була вказана вище), проводився безпосередньо з рідким склом в співвідношеннях, аналогічних даним табл. 1, після чого отримані суміші нагрівалися за методикою сухого способу активації.

Дослідження проводили для звичайних та активованих залізовмісних речовин (відходів гірничозбагачувальних комбінатів та гірських порід) при різних величинах питомої поверхні їх часток (від 300 до 750 м²/кг).

Для сухого і мокрого способів активації питому поверхню визначали по гранулометричному складу, отриманому седиментаційним аналізом фракцій подрібнених залізовмісних речовин.

Зміну властивостей наповнювача контролювали за його гідравлічною активністю, яку визначали кількістю зв'язаного ним вапна, а також за водоутримуючою здатністю пасти, виготовленої шляхом змішування наповнювача з водою.

В умовах експерименту при отриманні наповнювача з одночасною його активацією силікатами натрію, як сухим, так і мокрим способом, як показано на рис. 1, спостерігається збільшення його гідравлічної активності. При цьому спостерігаються близькі значення гідравлічної активності між мокрим і сухим способами активації.

Встановлено, що при збільшенні питомої поверхні наповнювача до 500 м²/кг, ефективність сухого механохімічного способу активації вища в порівнянні з мокрим. При досягненні більш високих значень питомої поверхні (більше 500 м²/кг) активність наповнювача при мокрому способі активації збільшується, і становиться трохи більшою, ніж при сухому способі.

Порівняння гідравлічної активності наповнювачів,

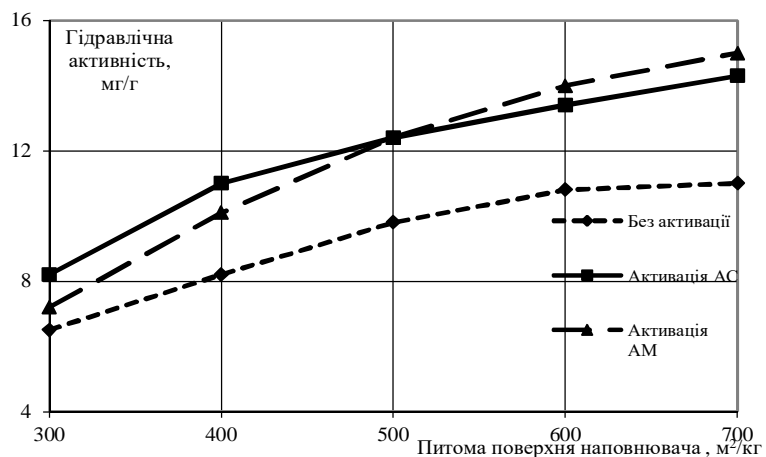


Рис. 1. Зміна гідравлічної активності наповнювача в залежності від його питомої поверхні і методу активації

отриманих з відходів гірничозбагачувальних комбінатів та залізовмісних гірських порід (табл. 2) показало, що використані гірські породи мають дещо більшу гідравлічну активність в порівнянні з відходами гірничозбагачувальних комбінатів. Це можна пояснити лише більшим вмістом оксидів заліза в гірських породах.

Таблиця 2

Гідравлічна активність наповнювача при сухому способі активації

Вид залізовмісного наповнювача	Гідравлічна активність, мг/г при питомій поверхні наповнювача, м ² /кг			
	300	400	500	600
Гірські породи	7,8	10,2	12,0	13,5
Відходи ГЗК	7,2	8,0	9,5	10,4

Таким чином, активація наповнювача силікатами натрію збільшує його гідравлічну активність. При цьому його гідравлічна активність збільшується на 50 – 100 % в порівнянні з неактивованим наповнювачем того ж мінералогічного складу.

В умовах експерименту активація сухим способом наповнювача призводить до збільшення його водоутримуючої здатності (рис. 2).

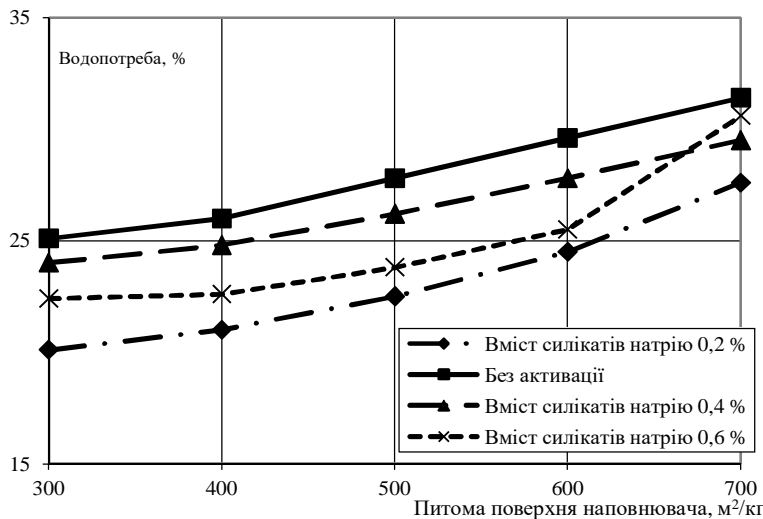


Рис. 2. Зміна водопотреби паст з наповнювача в залежності від його питомої поверхні і вмісту силікатів натрію при активації сухим способом

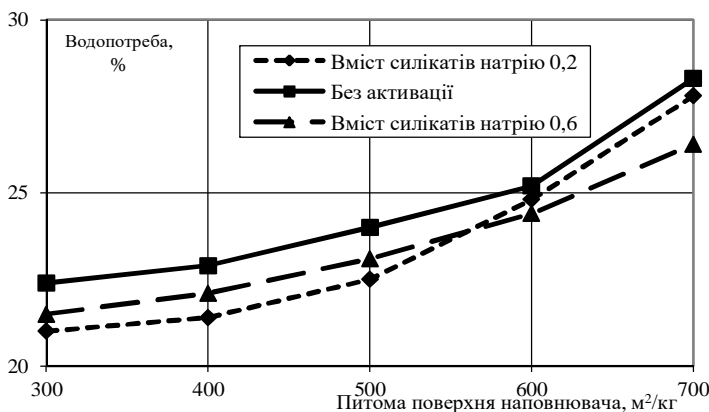


Рис. 3. Зміна водопотреби паст з наповнювача в залежності від його питомої поверхні і вмісту силікатів натрію при активації мокрим способом

Так для пасти, отриманої змішуванням активованого наповнювача з водою, при збільшенні його питомої поверхні від 300 до 600 м²/кг, водопотреба пасти у всьому застосованому діапазоні вмісту силікатів натрію при активації наповнювача (від 0,2 до 0,6 % від маси наповнювача) збільшується відповідно до 25-30 %. Однак водопотреба пасти залишається на 5-10 % нижче водопотреби пасти на неактивованому наповнювачі.

Тільки при високих значеннях питомої поверхні (більше 600 м²/кг), і витраті силікатів натрію в кількості 0,6 % від маси наповнювача (рис. 2) спостерігається зближення величини водопотреби пасти з активованого наповнювача порівняно з пастою з неактивованого наповнювача.

Активація мокрим способом (рис. 3) наповнювача не призводить до значних змін його водопотреби.

Зростання водопотреби пасти незначне при її питомій поверхні від 300 до 500 м²/кг – від 22 до 24 %. При більших значеннях питомої поверхні приріст водопотреби збільшується, однак залишається практично рівним або меншим аналогічного для пасти з еквівале-

нтною фракцією неактивованого наповнювача.

Багато в чому зниження значення водопотреби пов'язане з підвищеною в 2-3 рази витратою силікатів натрію, які були введені при активації. Крім того, очевидно, при мокрому помелі не вдається досягнути однакового ступеня шорсткості і руйнування часток, тут переважає обдирання поверхні при більшому ковзанні часток і мелючих тіл.

Зростання водоутримуючої здатності активованого наповнювача, особливо сухим способом, дозволяє зробити ще один важливий висновок. В дослідях не спостерігається зростання пластифікуючої здатності наповнювача навіть при підвищених витратах силікатів натрію, особливо при досягненні високої питомої поверхні.

Очевидно, при диспергації наповнювача без силікатів натрію більша частина енергії витрачається на руйнування зерен наповнювача або руйнування флокул, які постійно утворюються через наявність на поверхні часток скомпенсованого електричного заряду, який призводить до їх злипання.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином, активація залізовмісних мінеральних комплексів силікатами натрію при помелі підвищує їх гідравлічну активність.

Встановлено, що активація мінеральних комплексів силікатами лужного металу призводить до збільшення їх гідравлічної активності за рахунок утворення на їх поверхні мінералів групи цеолітів на основі заліза, що сприяє зв'язуванню гідроксиду кальція.

Список літератури

1. **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.
2. **Резниченко, П. Т.** Охрана окружающей среды и использование отходов промышленности [Текст] / П. Т. Резниченко, А. П. Чехов. – Днепропетровск: Промінь, 1973. – 94 с.
3. **Шишкин А.А.** Бетоны на основе шламов обогащения железных руд и щелочного компонента / **А.А. Шишкин** // Дис. канд. техн. наук. Кривой Рог, 1989. - 177 с.
4. **Губіна В. Г., Горлицький Б. О.** Проблема залізовмісних відходів гірничо-металургійного комплексу України — системний підхід / **В. Г. Губіна, Б. О. Горлицький** // Збірник наукових праць Інституту геохімії навколишнього середовища. — К.: ІГНС, 2009. — Вип. 17. — С. 79-92.
5. **Федорченко А. О., Попов С. О.** Розробка параметрів економічного оцінювання використання відходів збагачення гірничорудних підприємств / **А. О. Федорченко, С. О. Попов** // Технологический аудит и резервы производства. – Харьков: Технологический центр – 2016. - № 3/4(29). – С. 47 – 54.
6. **Федорченко А. О.** Економічні результати природоохоронної діяльності у гірничорудній промисловості від використання відходів [Електронний ресурс] / **А. О. Федорченко** // Ефективна економіка. — 2010. — № 2. — Режим доступу: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=132>
7. **Федорченко А. О.** Удосконалення методу еколого-економічної оцінки процесів технологічного розвитку гірничорудних підприємств [Текст] / **А. О. Федорченко** // Вісник Криворізького технічного університету. — 2011. — № 28. — С. 297–300.
8. **Федорченко А. О.** Економіко-математичне моделювання показників оцінки процесів технологічного розвитку гірничорудних підприємств [Текст] / **А. О. Федорченко** // Вісник Криворізького технічного університету. — 2012. — № 31. — С. 358–362.
9. **Fedorchenko A.** Methods of ecological-economic estimation of using concentration wastes of ore-mining enterprises [Text] / **A. Fedorchenko** // Economics of development. — 2013. — № 4. — P. 85–89.
10. **Benzaazoua M.** Environmental desulphurization of four Canadian mine tailings using froth flotation [Text] / **M. Benzaazoua, B. Bussiere, M. Kongolo, J. McLaughlin, P. Marion** // International Journal of Mineral Processing. — 2006. — Vol. 60, № 1. — P. 57–74. doi:10.1016/s0301-7516(00)00006-5
11. **Cisternas, L. A.** Effect of the objective function in the design of concentration plants [Text] / **L. A. Cisternas, F. Luca, E. D. G Ivez** // Minerals Engineering. — 2014. — № 63. — P. 16–24. doi:10.1016/j.mineng.2013.10.007
12. **Mirmohammadi, M.** Designing of an environmental assessment algorithm for surface mining projects [Text] / **M. Mirmohammadi, J. Gholamnejad, V. Fattahpour, P. Seyedsadri, Y. Ghorbani** // Journal of Environmental Management. — 2009. — Vol. 90, № 8. — P. 2422–2435. doi:10.1016/j.jenvman.2008.12.007
13. **Стороженко Л.И. и др.** Железобетонные конструкции из бетонов на отходах горнорудной и металлургической промышленности / **Стороженко Л.И., Шевченко Б. Н., Ильенко В.М. и др.** // Киев: Будівельник, 1982. – 72 с.
14. **Волженский А.В.** Минеральные вяжущие вещества / **А.В. Волженский** // М.: Стройиздат, 1986. – 464 с.

Рукопис подано до редакції 20.03.2020

В.В. ПЛОТНИКОВ, канд. техн. наук, доц., О.В. БАБАЄВСЬКА, асистент
Криворізький національний університет

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ВПЛИВУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ЛИТВА ТА В СУМІЖНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

Метою виконуваної роботи є вивчення та аналіз відомих на сьогодні способів застосування електрогідравлічного ефекту в технології ливарного виробництва і суміжних галузях промисловості, визначення глибини досліджуваної теоретичних аспектів процесу електрогідравлічного очищення литва й пошук резервів удосконалення відповідних технологій.

Для вирішення поставлених завдань у роботі використовувалися такі **методи** дослідження, як метод теоретичного аналізу даних наукових публікацій, патентної документації з досліджуваної проблеми; метод синтезу й інтеграції результатів аналізу; метод інтерпретації.

Наукова новизна полягає в доведенні доцільності й визначенні напрямку подальшого розвитку теорії й технології електрогідравлічного очищення виливків.

Практична значимість роботи полягає в тому, що результати дослідження можуть бути використані для досягнення економічного ефекту від електрогідравлічного очищення як чорного, так і кольорового литва, а також для підвищення екологічної безпеки ливарного виробництва. Окрім того результати дослідження можуть слугувати основою для розробки подібних технологій у суміжних галузях промисловості.

Результати роботи. На сьогоднішній день відома безліч способів використання електричного струму для очищення матеріалів від забруднень, у тому числі литих виробів від формувальних сумішей. Однак більшість із них так і не знайшли широкого застосування в промислових масштабах.

В той же час, ґрутуючись на аналізі існуючих процесів і установок для очищення, можна зробити висновок про доцільність і перспективність використання електрогідравлічного очищення різних матеріалів як у ливарному виробництві, так і в суміжних галузях промисловості, зокрема для очищення кузовів транспортних засобів, ущільненні ливарних, будівельних, скульптурних й інших форм, регенерації формувальних земель тощо.

Незважаючи на достатню вивченість теорії й технології електрогідравлічного ефекту, є низка маловивчених питань, поглиблене дослідження яких дозволить не лише ефективніше використовувати зазначене явище в ливарному виробництві, але й розробити принципово нові методи й пристрої для очищення виробів.

Ключові слова: виливок, очищення литва, електрогідравлічна установка, імпульсний струм, формувальна суміш.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-112-117

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Серед різноманітних областей застосування електровпливу в сучасній промисловості одним з найбільш перспективних є очищення й особливо очищення литва. Метод електрогідравлічного очищення як чорного, так і кольорового литва здатний вирішити безліч проблем, пов'язаних з цією трудомісткою, немеханізованою й шкідливою для здоров'я технологічною операцією сучасного виробництва. Трудомісткість традиційних способів очищення складає 25-30 % трудомісткості всього процесу ливарного виробництва. Застосування електрогідравлічного способу для очищення виливків від стрижнів і формувальних сумішей повністю усуває ручну працю й пилоутворення на ділянках очищення литва, поліпшує умови праці в ливарних цехах, дозволяє звільнити від важкої й шкідливої праці велику кількість робітників.

Аналіз досліджень і публікацій. Електрогідравлічний ефект являє собою високовольтний електричний розряд у рідкому середовищі. При формуванні електричного розряду в рідині виділення енергії відбувається впродовж достатньо короткого проміжку часу. Потужний високовольтний електричний імпульс із крутим переднім фронтом викликає різні фізичні явища, такі як поява надвисоких імпульсних гідравлічних тисків, електромагнітне випромінювання в широкому спектрі частот аж, за певних умов, до рентгенівського, кавітаційні явища. Зазначені фактори чинять на рідину й поміщені в неї тіла різні фізико-хімічні впливи. Це обумовлює значимість електрогідравлічного ефекту й все більше зростаючий інтерес до нього у різних галузях науки й техніки [1].

Електрогідравлічний ефект вже знайшов широке застосування при обробці металів (штампуванні, розвальцьовуванні, різанні), дробленні гірських порід, незалежно від їхньої твердості, одержанні різних колоїдів, у вібраційній техніці, в гірничій справі (бурінні свердловин, підриванні монолітів, прокладанні шахт, у гео- і гідролокації, сейсмозв'язці, в безшахтному видобутку корисних копалин), сільському господарстві й навіть медицині [1-3].

Постановка задачі. Метою виконуваної роботи є вивчення й аналіз відомих способів застосування електрогідрравлічного ефекту в технології ливарного виробництва й суміжних галузях промисловості, визначення глибини досліджуваності теоретичних аспектів процесу електрогідрравлічного очищення литва й пошук резервів удосконалення відповідних технологій.

Викладення матеріалу та результати. Всі діючі електрогідрравлічні установки для очищення литва принципово однотипні й відрізняються один від одного лише за способом завантаження, вивантаження й переміщення виливків: тупикові — при завантаженні й вивантаженні з однієї й тієї ж сторони; прохідні — при завантаженні й вивантаженні з різних сторін (використовуються здебільшого для очищення дрібних виробів, виготовлених за виплавлюваними моделями) і конвеєрні установки.

Принципово новий електрогідрравлічний пристрій для очищення литва [4] включає робочу заземлену ванну, що є негативним електродом, з розміщеними в ній рухливими або нерухливими позитивними електродами. При цьому іскровий розряд може здійснюватися як між позитивним електродом і дном ванни, так і між позитивним електродом і виробом, що очищується. Виникаючі в робочій камері електрогідрравлічні удари виконують роботу з очищення виливків від стрижнів і формувальних сумішей.

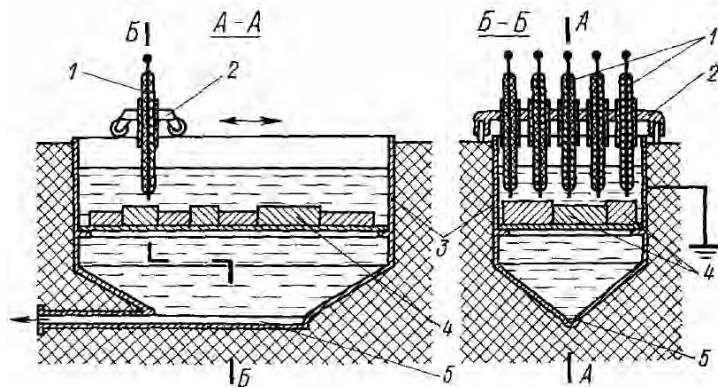
Слід відзначити, що при електроочищенні метал виробу, що очищується, практично не руйнується, не враховуючи слабких слідів «опіків» від розрядів, помітних тільки на гладкій або полірованій поверхні. Однак, якщо виріб має приховані в ньому й непомітні для ока тріщини, то ймовірність того, що він розколеться на частини по цих тріщинах, дуже велика. Таким чином, практично при електроочищенні додатково здійснюється своєрідний технологічний контроль якості виробів.

Електрогідрравлічна установка ванного типу [6] наведена на рис. 1.

Рис. 1. Установка ванного типу для електрогідрравлічного очищення литва: 1 – електроди; 2 – рухлива каретка; 3 – корпус ванни; 4 – виливки, що очищуються; 5 – лоток трубопроводу

У заглибленій до рівня підлоги ванні необхідного об'єму, недалеко від її дна, встановлена змінна решітка, що завантажується впритул в один шар виробами, що підлягають очищенню. Поки одна решітка з виробами чиститься у ванні, друга — вивантажується, а третя — завантажується виробами й готується до занурення у ванну. Всі процеси вивантаження, завантаження й переміщення решіток здійснюються засобами звичайної цехової механізації й ніяких додаткових пристроїв не потребують. Для завантаження кожної решітки вироби підбираються групами по висоті так, щоб коливання висоти не перевищували 50-100 мм. При розміщенні виробів на решітці необхідно передбачити, щоб найбільші отвори виробів опинилися б знизу (лежачими на решітці) і через них могли б безперешкодно висипатися на дно ванни відстаюча формувальна суміш й шматки стрижнів. Над ванною розміщується портал, що переміщається над нею, або кронштейн із кареткою, на якому закріплені електроди. Розряди з електродів, переходячи на виливки, що лежать на заземленій решітці, зануреній у ванну, створюють електрогідрравлічні удари, що очищують литво. Електродів на порталі або кронштейні може бути багато (коли ванна широка або формувальна суміш особливо міцна) або тільки один, але тоді цьому електроду, окрім прямого поступального руху разом з порталом вздовж ванни, надають періодичне (вправо-вліво) переміщення або погойдування поперек ванни.

Руйнування шару формувальної землі, що покриває виливок, здійснюється насамперед дією кавітаційних гідрравлічних ударів, що виникають при захопленні порожнин. Основні гідрравлічні удари, що виникають при розширенні порожнин, відіграють допоміжну роль, видаляючи з поверхні, що очищується, вже відбиту формувальну суміш або відшаровуючи знизу вже розтріскані її шари. Враховуючи, що «пляма очищення», тобто площа на поверхні виливка, що очищається одним електрогідрравлічним ударом, при звичайних формувальних сумішах, як пра-



вило, має діаметр близько 150-400 мм, електроди на порталі розташовують один від одного на відстань 300-400 мм. Якщо ж електрод тільки один, то швидкість його руху вздовж порталу підбирають таким чином, щоб відстань між двома його проходками поперек ванни становила ту ж саму величину. Режим роботи й швидкість поздовжнього переміщення порталу підбирають таким чином, щоб за час одного повного переміщення порталу (або одиночного електрода) від одного кінця ванни до іншого весь цикл очищення був повністю закінченим і литво могло б направлятися на вивантаження.

В електрогідравлічних установках конвеєрного типу [5] у ванні, розташованій під порталом з електродами, по конвеєру безперервно рухаються вилки, що очищуються, повне очищення яких відбувається за один прохід. Оптимальна довжина робочого іскрового проміжку при обраному режимі очищення має важливе значення для ефективної роботи установки, тому необхідно підбирати вилки за висотою або вводити в конструкцію пристрою регулятори довжини робочого проміжку. Оскільки підбір виробів за висотою в дрібносерійному виробництві ускладнений, то слід застосовувати всякого роду регулятори довжини робочого іскрового проміжку.

Установки конвеєрного типу мають велику ефективність у порівнянні з установками ванного типу. Очищення виливків за конвеєрною схемою без вибивання з їхніх опок (тобто разом з ними) здійснюється шляхом подовження й об'єднання ливарного конвеєра з конвеєром установки електрогідравлічного очищення литва. Формувальна суміш під дією електрогідравлічних ударів вивільняється з опок, відшаровується від литва й разом із стрижневими сумішами падає на дно конвеєрної ванни, звідки грязьовим насосом перекачується на регенерацію, промивання, розсів, просушку й потім без втрат повертається в ливарне виробництво.

Електрогідравлічні установки барабанного типу [1] періодичної дії (рис. 2) служать для очищення дрібного литва чорних і кольорових металів.

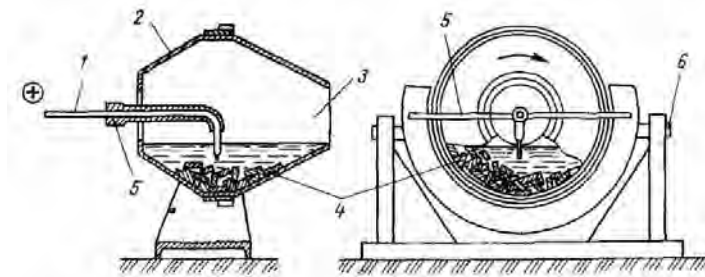


Рис. 2. Установка барабанного типу для електрогідравлічного очищення литва: 1 - позитивний електрод; 2 - барабан; 3 - завантажувально-розвантажувальний отвір; 4 - вироби, що очищуються; 5 - тримач електрода; 6 - вісь нахилу барабана

При обертанні барабану з насипаними в нього виробами, що підлягають очищенню, кожен з них періодично попадає під дію електричних ударів від розрядів, що виникають з одного або групи електродів, на масу виробів, розташованих під ними. Для очищення більших виливків внутрішні стінки барабана можуть бути виконані з ребрами. Вода, що безупинно надходить у барабан, несе зруйновані стрижні й формувальну суміш, залишаючи вироби чистими. Після завершення очищення вироби подаються в транспортний візок, а в барабан завантажуються для очищення наступна партія виробів. Для забезпечення нормальної роботи установки необхідно дотримуватися оптимального обсягу завантаження, при якому прийнята оптимальна для даного режиму середня довжина робочого іскрового проміжку зберігається стабільною. При надмірному збільшенні завантаження виливки можуть закортити робочий іскровий проміжок, і робота пристрою припиниться.

Електрогідравлічні установки можуть з успіхом замінити існуючі менш продуктивні установки для звичайного гідроочищення литва. При цьому заміні підлягає лише менша частина установки: гідромонітори звичайної установки гідроочищення литва замінюються на електрогідравлічні монітори. Імпульсний струмінь періодично викидається із сопла такого монітора й зустрічає на своєму шляху перешкоду, що складається зі старої формувальної землі й іншого абразивного матеріалу, який постійно й автоматично надходить з бункера, який розміщений над соплом монітора. Рухаючись по соплу, струмінь захоплює абразивний матеріал за собою і з силою викидає його на виливок. В результаті виливок інтенсивно звільняється від формувальної суміші, пригару й інших забруднень.

Електрогідравлічне очищення протяжних виробів [5], наприклад, прокату, дроту, рейок, може здійснюватися в пристроях, виконаних у вигляді ванни, заповненої водою з абразивними добавками. У ванні розташовані розрядники, оснащені відбивачами. Прокат або інші вироби,

безупинно проходячи через таку ванну, інтенсивно очищаються в ній від різного роду забруднень. Безперервне очищення довгомірних виробів може здійснюватися й в електрогідролічних установках невеликих розмірів. Для цього в протилежних стінках робочої камери виконані отвори зі знімними ушліненнями за формою виробів крізь які безупинно проходить виріб, що очищається. Між електродами, розміщеними в камері по периметру виробу, що очищається, і самим виробом безупинно виникають електрогідролічні удари, дія яких і очищає виріб.

Інтенсивність очищення виробів на електрогідролічних установках всіх типів можна підвищити, якщо вводити в робочу рідину абразив і подавати через патрубки й отвори в дні камери повітря або воду для створення навколо виробу «киплячого шару». Розроблений метод дозволяє здійснювати очищення литва не тільки від пригару, але й очищення найрізноманітніших поверхонь виробів від усіх видів покриваючих їхніх забруднень, налипань, обростань, фарби, окалини, іржі зі згладжуванням нерівностей на цих поверхнях. Метод заснований на використанні запропонованого способу одержання колоїдів металів [6] і може бути здійснений для очищення будь-яких стандартних виробів (всіх видів прокату, дроту, листів, рейок), а також дрібних (масою до 1 кг) виробів, у тому числі й виливків.

Сутність методу полягає в наступному. У ванну, заповнену рідиною, безупинно надходять вироби, що очищуються, і засипається дрібна металева стружка, а потім через перфороване дно ванни подається вода або продувається повітря. В результаті у ванні створюються умови «киплячого шару». Імпульси струму (а в деяких випадках і звичайний перемінний струм промислової частоти) подаються на стінки ванни й виріб. Між частками стружки і виробом, що контактує із ними, виникає безліч мікроскопічних розрядів, що перетворюють верхній шар виробу (і особливо різного роду виступи на ньому) в колоїдну речовину. Для того щоб металеві частки розподілялися в рідині рівномірно й не злипалися між собою, в рідину одночасно вводяться непровідні частки, наприклад, стружки дерева, поліетилену тощо. В результаті виріб, проходячи крізь ванну, інтенсивно очищується не тільки від усіх видів забруднень, але й від свого поверхневого шару. З цієї причини стінки ванни необхідно виконувати (або футерувати) з будь-якої тугоплавкої речовини (наприклад, твердого сплаву, графіту).

Електрогідролічна установка, що використовує цей метод, нагадує електрогідролічну установку для одержання колоїдів металів [6] і складається з ванни з перфорованим дном і патрубками для введення й виведення робочої рідини (або газу), в яку занурений конвеєр із закріпленими на ньому виробами, що очищуються. Процес очищення може бути інтенсифікований, наприклад, безперервним обертанням закріплених на конвеєрі виробів.

Для очищення дрібних виробів складної конфігурації масою до 10 кг значний інтерес представляє очищення методом «повітряної кавітації». Конвеєрні установки для електрогідролічного очищення виробів цим методом [7] виконують у вигляді ванни з електродами, розміщеними неглибоко під поверхнею води. Сітчастий конвеєр, що несе вироби, проходить як під електродами, де вироби очищуються загальною для всіх типів установок дією електрогідролічних ударів, так і над шаром води, де вироби очищуються методом «повітряної кавітації». При цьому маси рідини, що вилітають нагору, ударяючись об вироби, очищують їхню поверхню від різного роду покриттів або забруднень, а удари мас води інтенсивно перевертають дрібні вироби, підставляючи їх неочищеними сторонами під нові удари води, що викидається електрогідролічними ударами.

Для підвищення ефективності очищення цим методом раціонально використовувати спосіб обважнення рідини або ввести до складу рідини будь-який абразив [8]. У деяких випадках доцільно використовувати метод «бульбашкової кумуляції», який може бути рекомендований для підвищення ефективності очищення на електрогідролічних установках всіх типів, тому що для його застосування не потрібне внесення серйозних конструктивних змін. Наприклад, конвеєрна установка для електрогідролічного очищення виробів методом «бульбашкової кумуляції» може бути аналогічна іншим конвеєрним установкам, але при цьому додатково на дні робочої ванни розміщується труба із дрібними отворами для подачі повітря, газу або пари.

При здійсненні різних варіантів електрогідролічного очищення можуть бути використані й інші методи, що розширюють можливість використання ефекту: радіоактивне або лазерне підпалення розряду, а також метод теплового вибуху. Підвищити ефективність електрогідролічного очищення можна шляхом обважнення робочої рідини різними добавками (тонкими

суспензіями важких металів, сполук тощо). Зокрема, тонкоподрібнена плівка окислів заліза або міді, все більше насичуючи робочу рідину, поступово значно обважнює її [9].

Також з метою підвищення ефективності очищення виливків рекомендується перед електрогідравлічною обробкою стрижневі й формувальні суміші насичувати вологою (тому що пористі матеріали, до яких вони відносяться, в міру збільшення вмісту води втрачають свою міцність). Крім того, оскільки стрижневі й формувальні суміші мають численні пори, то розряд, проходячи через наповнені повітрям пори до тіла виливки, створює не електрогідравлічний, а тільки електропневматичний удар, механічний ККД якого у 800 разів нижче за ККД електрогідравлічного удару. Тому на початку очищення, поки формувальна суміш й стрижні виливки ще не просочилися водою, більшість розрядів мають низьке значення механічного ККД. Зниження механічної міцності стрижневих і формувальних сумішей в результаті насичення їх вологою перед електрогідравлічною обробкою підвищить механічний ККД розрядів на початковій стадії очищення виливків, чим значно поліпшить техніко-економічні показники процесу в цілому.

Електрогідравлічне очищення може бути рекомендоване не лише для звичайного або прецизійного литва, але й для очищення матеріалів від найрізноманітніших забруднень (наприклад, масложирових). Очищення тут слід вести у ванні, заповненій будь-яким «м'яким абразивом» (деревними або пластмасовими стружками, які, інтенсивно переміщуючись разом з рідиною при кожному електрогідравлічному ударі, ефективно очищують вироби або об'єкти).

Досить перспективним є електрогідравлічне очищення кузовів транспортних засобів (вагонеток, кузовів автомобілів і залізничних вагонів) від налиплого на них бетону, цементу й інших матеріалів, що важко піддаються очищенню. При транспортуванні сипучих вантажів, руди, вугілля, цементу на рудниках, шахтах, при залізничних і автомобільних перевезеннях пил і дрібняк осідають на дно транспортних ємностей і злежуються або змерзаються, утворюючи досить міцну масу. При розвантаженні ця маса не вивалюється, а поступово накопичується, зменшує іноді до 15-20 % корисний об'єм транспортної ємності.

Установка для електрогідравлічного очищення рудничних вагонеток може знаходитися за звичайним рудничним перекидачем вагонеток. Процес електрогідравлічного очищення здійснюється наступними чином. Потяг проходить перекидач і розвантажується, але у вагонетках ще залишаються налипли на підлогу й стінки злежалі сипучі матеріали (штиб). Просуваючись вперед, вагонетка відводить убік блок-контакт і гідрант наповнює її водою до заданого рівня. Далі, в міру розвантаження потяга, вагонетка, просуваючись, натискає на контакт, що служить для її заземлення й блокування високовольтної установки, таким чином, що установку включити при розімкнутому контакті неможливо. Одночасно із цим контакт управляє подачею електроду по вертикалі. Через те, що на кожному руднику застосовують зазвичай один тип вагонеток, то подача електроду на потрібну величину вниз і вивід його вгору через певні проміжки часу легко піддаються автоматизації й програмуванню. Як тільки електрод зайняв робоче положення, включається високовольтна установка і між торцем електроду й стінками вагонетки, що є другим негативним електродом, відбувається розряд і виникає електрогідравлічний удар. Енергією електрогідравлічного удару й виконується очищення вагонетки від налиплого штибу. Очищена вагонетка, наповнена пульпою штибу й води, підводиться до перекидача й спорожняється від пульпи. Далі вагонетка рухається очищеною. Шлак зі шлакозбирача самопливом або за допомогою насоса надходить у бункер. Така схема дозволяє робити безперервне очищення рухливого потяга без його розчеплення. Аналогічно може здійснюватися очищення кузовів автомашин і залізничних вагонів.

Електрогідравлічна обробка може використовуватися й при всякого роду допоміжних операціях, що мають пряме або непряме відношення до очищення литва, можна здійснити інтенсивне ущільнення ливарних форм без застосування складних машин, витрати великої кількості стисненого повітря, а головне — без струсу машин і будівель [10]. Цим методом можна ущільнювати не тільки опоки й інші ливарні форми, але й будь-які форми взагалі (будівельні, скульптурні й ін.). Широке застосування коркових або оболонкових форм викликає необхідність у їхньому ущільненні. Ущільнення може бути зроблене тепловим вибухом шляхом розміщення теплового елемента, що вибухає, всередині оболонки й обтиснення її за формою електропневматичною дією вибуху, посиленого при необхідності якими-небудь добавками.

Позитивні результати дає й електрогідравлічна регенерація формувальних земель. Формувальна земля будь-якого складу, пропущена через звичайну електрогідравлічну дробарку піщаного

типу з вихідними отворами, в 2-3 рази більшими, ніж максимальний діаметр часток, що входять у даний формувальний склад, виявляється повністю звільненою від обволікаючого її частки сполучного або клеює складу. Це дозволяє легко розділити їх. Як показав досвід, формувальний пісок при цьому практично не подрібнюється, втрати його незначні, і він шляхом звичайного промивання легко відділяється потім від усіх еднальних його речовин. Регенерація формувальних земель здійснюється, по-перше, за рахунок різко вираженої вибіркової дії електрогідролічного удару, що швидше подрібнює крихкі й повільніше в'язкі матеріали, і, по-друге, за рахунок резонансного електрогідролічного ефекту, тем, що легше відшаровує друг від друга компонента, що мають різну власну частоту коливань, чому більш велика різниця цих частот.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином, метод електрогідролічного очищення як чорного, так і кольорового литва дозволяє: підвищити продуктивність очищення литва; знизити собівартість виробів і енергоємність їх виробництва; забезпечити повне видалення стрижнів і формувальної суміші з виливків будь-якої складності; механізувати й автоматизувати важку ручну працю; докорінно поліпшити умови праці на обрубній дільниці й знизити запиленість в 10-20 разів, тим самим виключивши умови для виникнення професійних захворювань.

Незважаючи на безліч запропонованих методів використання, існують резерви для подальшого вдосконалення технології очищення литва за допомогою електрогідролічного впливу.

Список літератури

1. Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. – М.: «Машиностроение». – 1986. – 253 с.
2. Гульий Г.А. Оборудование и технологические процессы с использованием электрогидравлического эффекта / Г.А. Гульий, П.П. Малюшевский, Е.В. Кривицкий. – М.: «Машиностроение». – 1977. – 320 с.
3. Жбанова Е.Н. Электрофизический метод повышения износостойкости отливок из стали 110Г13Л при кристаллизации / Жбанова Е.Н., Саитгареев Л.Н., Скидин И.Э., Бялик Г.А. // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П.О. Сухого. - 2017. - №3. - С. 24-28.
4. Прогрессивные литейные технологии и материалы: сб. науч. трудов. – Киев: Ин-т проблем литья, 1990. – 108 с.
5. Вёрёш А. Очистка отливок / Пер. с венгерского; ред. Г. Ф. Баландин. — М.: Машиностроение, 1982. — 256 с.
6. Подураев В.Н. Технология физико-химических методов обработки, М.: Машиностроение, 1985. – 264 с.
7. Шмаков М.В. Очистка поверхности пластин и подложек / М.В. Шмаков, В.П. Паршин, А.Н. Смирнов // Технологии в электронной промышленности. - 2008. - № 5. - С. 77-78.
8. Приходько И.В. Электрогидроимпульсные технологии и оборудование для нужд литейного производства / И.В. Приходько, Р.Н. Исабеков // Металл и литье Украины. - № 2 (213). - 2011. – С. 25-30.
9. Лучкин, А.Г. Очистка поверхности подложек для нанесения покрытий вакуумно-плазменными методами / А.Г. Лучкин, Г.С. Лучкин // Вестник Казанского технологического университета. - 2002. -Т. 15. - С. 208-210.
10. <https://extxe.com/823/ochistka-otlivok-jelektricheskimi-sposobami-ot-prigara-i-melkih-zalivov/>

Рукопис подано до редакції 17.03.2020

УДК 622.013.364

М.А. ГРИЩЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ВІДПРАЦЮВАННЯ ПРИРОДНО БАГАТИХ ЗАЛІЗНИХ РУДНИХ ПОКЛАДІВ НА ГЛИБОКИХ ГОРИЗОНТАХ З НЕДОСТАТНІМИ КУТАМИ ЗАЛІГАННЯ В УМОВАХ ВИСОКОГО ГІРСЬКОГО ТИСКУ

Відпрацювання покладів природно багатих залізних руд в умовах високого гірського тиску на глибоких горизонтах є однією з основних проблем теперішнього часу та близького майбутнього. Втрати руди пов'язані з формуванням еліпсоїди випуску яка в свою чергу намагається отримати форму циліндру, тим самим до воронки випуску руди які знаходяться на лежачому боці не стягуються. Тим самим при недостатніх кутах втрати можуть сягати майже половини всього запасу.

Мета. Метою роботи є аналіз існуючих технологій, дослідження та розробка ефективної технології випуску відбитої рудної маси з лежачого боку в якій за умов слабо-похилих кутів втрати будуть мінімальними.

Методи дослідження. Питання випуску досліджувалося на лабораторних моделях було проведено ряд дослідів з урахуванням масштабу на еквівалентних матеріалах. Проведено техніко-економічний аналіз випуску відбитої рудної маси, розглянуті фактори які безпосередньо впливають на ефективність очисних робіт в трикутнику лежачого боку.

Наукова новизна. Проведеними лабораторними дослідженнями була встановлена залежність, що при веденні очисних робіт під перекриттям непорушеного рудного масиву випуск пошаровим похилим потоком не формує еліпсоїди випуску.

Практична значимість. В проведеній роботі пропонується створення технології підготовки блоку для формування відбійки та випуску корисної копалини пошаровим похилим потоком, який в свою чергу дасть максимальне вилучення корисної копалини без втрат в трикутнику лежачого боку.

Результати. В даній роботі на лабораторній моделі було проведено і порівняно ряд дослідів для визначення залежності кількості втрат руди залежно від кута падіння рудного покладу, та запропоновано нову технологію відпрацювання рудних покладів з просуванням очисного вибою з лежачого боку на висячий в якій кут залягання майже не має впливу на якість вилучення.

Ключові слова: «Похилий потік», «під перекриттям», «втрати», «засмічення», «підземна розробка», «мертва зона», «еліпсоїда випуску».

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-117-122

Проблема та її зв'язок з науковим та практичним завданням. Роботи по вилученню залізної руди з надр підземного Кривбасу ведуться вже понад 100 років. Глибина робіт очисного виймання на деяких шахтах Криворізького залізорудного басейну наблизилась до значущої глибини в 1500 м. Зі збільшення глибини проведення очисних робіт збільшуються ускладнення не тільки від проявів гірського тиску, а й від міцності та стійкості рудного масиву, та оточуючих порід.

Тому є сенс удосконалення існуючої технології яка б дозволила збільшити кількість вилученої сировини шляхом зменшення втрат корисної копалини в трикутнику лежачого боку покладу.

Аналіз досліджень і публікацій. Шляхи вирішення втрат корисної копалини на лежачому боці були розроблені науковцями, ще у минулому столітті. Основними способами вирішення даної проблеми було створення додаткових «уловлюючих» горизонтів, створення різних варіантів випуску, визначався вплив інтенсивності відпрацювання покладу [1, 4-6].

Спираючись ще на результати геологічної розвідки які проводилася за радянські часи, слід зазначити як змінюються фізико-механічні властивості сировини, що видобувається. На рис.1, видно як з поглибленням ведення очисних робіт змінюється міцність, стійкість та пористість рудного масиву [8].

Так як, використання поверхово-камерних систем розробки зовсім не є доцільним, залишається вибір тільки за під-поверховими системами розробки. Відомо, що при випуску відбитої рудної маси велика кількість руди залишається на лежачому боці покладу. Дуже багато науковців займалося даною проблемою по зменшенню втрат на лежачому боці покладу. Найпоширеніший варіант такої проблеми є втрати на лежачому боці. Виходячи з таких умов, ми бачимо, що зі збільшенням глибини, роботи по вилученню рудної сировини ускладнюються, тому ми пропонуємо впровадження сучасної технології відпрацювання рудних покладів системою розробки під-поверхового обвалення з похилим потоком випуску руди під перекриттям непорушеного масиву.

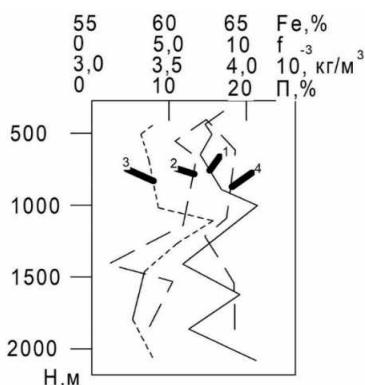


Рис. 1. Графіки змін фізико-механічних властивостей залізної руди залежно від глибини: 1 – склад Fe %; 2 – щільність, γ кг/м³; 3 – коефіцієнт міцності, f ; 4 – пористість, P %

У зв'язку з погіршенням гірничо-геологічних умов традиційні технології формування компенсаційного простору не можуть бути реалізовані оскільки стійкість і міцність руд не дають можливості для створення компенсаційного простору, а втрати на лежачому боці із-за недостатнього кута падіння покладу - пропорційно збільшуються [9].

Спираючись на загально прийняті дослідження [1], об'єм рудної маси, який залишається на лежачому боці покладу представляє собою різницю об'єму паралелепіпеда (площею ABCD)

і половину об'єму еліпсоїда випуску (рис. 2)

$$V_0 = \frac{\alpha H}{\epsilon \operatorname{tg} l} + d \frac{\ddot{\alpha} H}{\varnothing 2} s - Q'_{el},$$

де H – висота відбитого шару руди, м; α – кут падіння рудного покладу, град; s – відстань між осями випускних отворів за простяганням, м; d – діаметри випускної воронки, м; Q'_{el} –

об'єм усіченого еліпсоїда випуску (висотою H), m^3 .

Зрозуміло, що зі зміною потужності рудних покладів рівень втрат також змінюється, але необхідно обрати варіант за умов яких, втрати будуть максимальні.

Розглянувши рис. 3, можна побачити, що за умов кута падіння рудного покладу $50-55^\circ$ та потужністю до 40 м, втрати будуть займати левову частину. Тож необхідно запровадити розбурювання та випуск сирової руди похилим потоком. Це, в свою чергу, дасть змогу знизити кількість втрат.

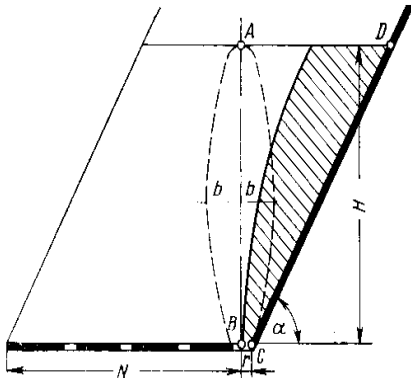


Рис. 2. Розрахункова схема до визначення рівня втрат руди на лежачому боці

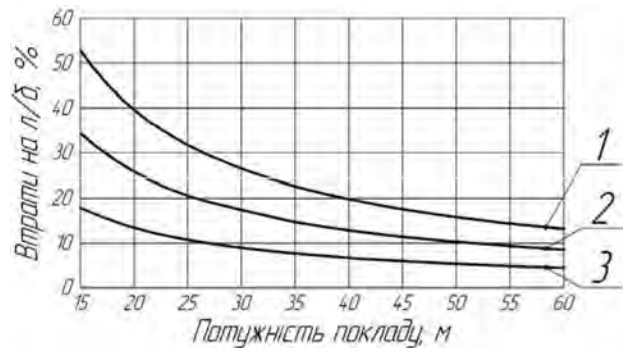


Рис. 3. Залежність втрат руди на лежачому боці при різних потужностях покладу: 1 – при куту падіння $\alpha=50^\circ$; 2 – при куту падіння $\alpha=55^\circ$; 3 – при куту падіння $\alpha=60^\circ$

Для ліквідації втрат відбитої рудної маси на лежачому боці та підвищення ефективності вилучення по системі в цілому необхідно сформувати випуск руди під прикриттям непорушеного рудного тіла, яке дає змогу утворення нормального еліпсоїда випуску (рис.4).

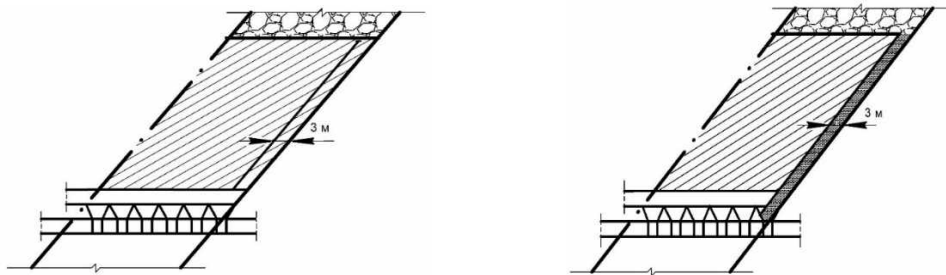


Рис. 4. Схема розбурювання та формування похилого потоку першого шару відбитої руди

Завдяки даній технології при випуску першого шару руди, відбита рудна маса виходить без засмічення оскільки з висячого боку знаходиться непорушений рудний маси. Підсмоктування пустих порід зі сторони лежачого боку відсутнє в результаті безперервного потоку відбитої рудної маси, а також від переущільнення пустої породи дією вибуху наступного. При просуванні ведення очисних робіт, висячий бік буде знаходитись під перекриттям непорушеного рудного масиву, а породи на лежачому боці, які прийшли вслід за відбитою рудою, будуть переущільненні за рахунок вибуху наступного віяла свердловин, тим самим дає нам змогу знизити засмічення та поліпшити стан вилучення чистої руди [2] (рис.5).

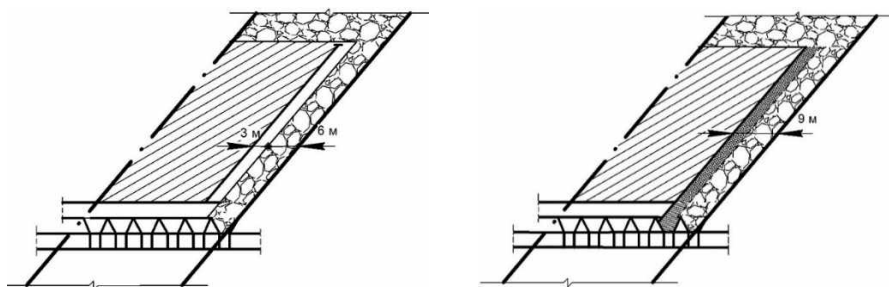


Рис.5. Схема розбурювання та випуску похилого потоку третього шару відбитої руди по ущільненим пустим породам

Дана технологія має значну перевагу в тому, що бурові роботи виконуються під перекриттям рудного масиву, і отримує можливість пошарового розбурювання віял свердловин. Оскільки роботи ведуться в м'яких та не стійких рудах при проведенні вибухових робіт трапляється затискання свердловин, що в подальшому суттєво вплине на якість заряджання ВР та збільшення виходу негабариту[7]. Як це видно на рис. 6а, б.

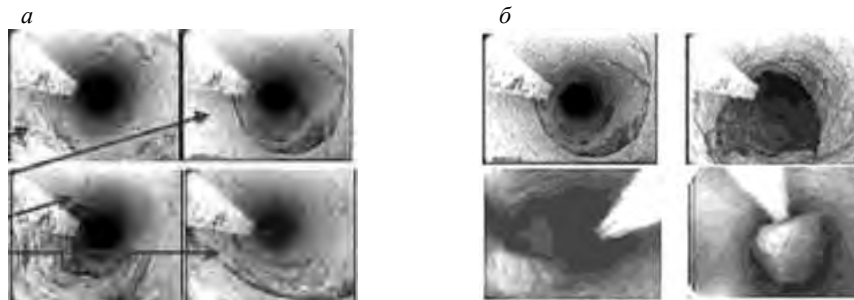


Рис. 6. Так виглядає свердловина: *а* – до початку ведення буро-вибухових робіт; *б* – характер порушень свердловин в наступному віялові при вибуху суміжного віяла

Як показує практичний досвід, втрати свердловин від складних гірничо-геологічних умов та впливу вибухових робіт негативно впливають на свердловини наступного віяла порушуючи його від 10 до 40%, що суттєво в кінцевому результаті впливає на свердловинне розбурювання. Тому не має сенсу проводити одразу всі бурові роботи, а з часом від просування випуску проводити бурові роботи. Завдяки такому підходу при бурінні свердловин створюються коливання рудного масиву, що поліпшує інтенсивність випуску.

При проведенні лабораторних дослідів на моделях з еквівалентними матеріалами (рис. 7) одразу помітно переваги запропонованої технології.

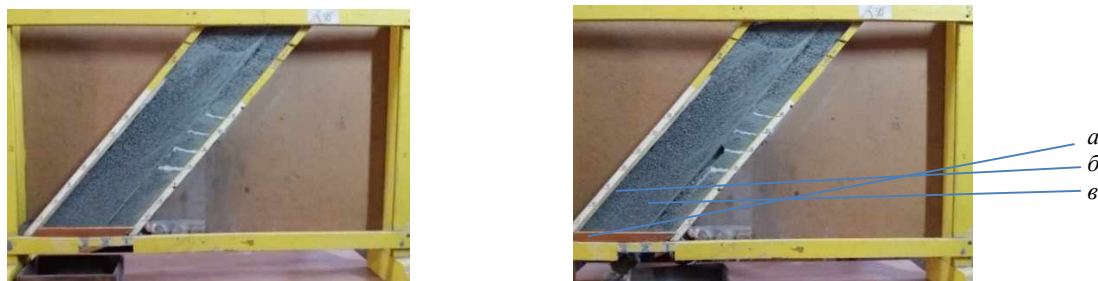


Рис. 7. Стадії випуску похилого потоку третього шару відбитої руди по ущільненим пустим породам під прикриттям непошкодженого рудного масиву: *а* – похилий потік відбитої руди; *б* – непошкоджений рудний масив; *в* – ущільнені вибухом пусті породи

Перевагою такої технології випуску є також ефект ущільнення пустих порід вибухом при послідовному відбиванні шарів руди. Отримавши переущільнений шар пустих порід використовують в якості площини, по якій безпосередньо здійснюється випуск відбитої руди. Завдяки даній технології, якість вилучення максимальна, а показники засмічення відсутні, як це видно в порівняльних знімках (рис.8).

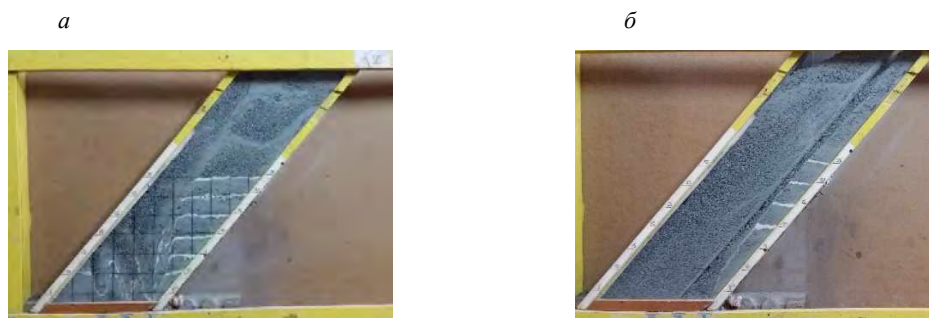


Рис. 8. Вигляд лабораторної моделі по завершенню очисних робіт. *а* - випуск традиційною технологією з доставних штреків

Виходячи з проведених лабораторних досліджень показники вилучення базуються на отриманих даних процесу випуску. Розрахунок зроблено з отриманих даних в чисельному вигляді. Завдяки отриманим даним, на рис. 9 було побудовано графік залежностей випуску рудної маси до початку її засмічення.

Дані проведені дослідження доводять той факт, що при відсутності формування нормальної еліпсоїди випуску, втрати в трикутнику лежачого боку відсутні, що обумовлює основним показником вилучення корисного компоненту з надр.

Рис.9. Графік залежності втрат корисної копалини на лежачому боці



Висновки та напрямок подальших досліджень. Технологія відпрацювання рудного покладу з веденням очисних робіт під перекриттям непопущеного масиву збільшує термін існування гірничих виробок оскільки відсутність виробленого простору знижує вплив на виробки. Побудувавши залежності і порівнявши дані технології отримали, що при даній технології відсутні критичні втрати на лежачому боці. Рівень засмічення мінімальний.

Подальшою необхідністю є визначення впливу інтенсивності відпрацювання блоку. Таким чином необхідно розглянути вплив розмірів фракції для отримання кращих показників вилучення до початку засмічення.

Список літератури

1. Калініченко В.О. Про питання зниження втрат руди на лежачому боці покладів / В. О. Калініченко, В. М. Тарасютін, С. В. Письменний, О. Л. Шепель // Гірничий вісник : науково-технічний збірник. – Кривий Ріг, 2015. – Вип. 99. – С. 42–44.
2. Kalinichenko, O., Fedko, M., Kushnerov, I., Hryshchenko, M. (2019) Muck drawing by inclined two-dimensional flow. *E3S Web of Conferences*, 123, art. no. 01015. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301015>
3. Ступнік М.І. Випуск руди з малорухомої зони на лежачому боці покладу похилим очисним вибоєм / М. І. Ступнік, В. О. Калініченко, О. В. Калініченко, М. А. Грищенко // Гірничий вісник : науково-технічний збірник. – Кривий Ріг, 2018. – Вип. 104. – С. 3–8.
4. M.Stupnik, O.Kalinichenko. Investigation of muck drawing in blocks with trapezoid sills. *E3S Web Conf. Volume 60*, art. no. 00021, 2018. (Scopus). Ukrainian School of Mining Engineering. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186000021>
5. Калініченко О. Дослідження та удосконалення процесу випуску відбитої руди в блоках с трапецієподібним днищем / М. Ступнік, О. Калініченко // Школа підземної розробки: тези доповідей XII Міжнародної науковопрактичної конференції/редкол.: В.І.Бондаренко та ін.. – Д.: ЛізуновПрес.2018. -116с.
6. Малахов Г.М., Безух В.Р., Петренко П.Д. Теория и практика выпуска руды. – М.: Недра, 1968. – 311 с.
7. Рыльникова М.В. К проблеме использования упругой энергии породного массива в качестве возобновляемого источника энергии / М.В. Рыльникова, Л.И. Маневич, В.А. Еременко, В.В. Смирнов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых/ - Новосибирск, 2015. – Вып. №6. – С. 119-132.
8. Глушко В.Т., Борисенко В.Г. Инженерно-геологические особенности железорудных месторождений. –М.: Недра, 1978. - 253
9. Чернокур В.Р., Шкребко Г.С., Шелегда В.И. Добыча руд с поэтажным обрушением. – М.: Недра, 1992. – 271 с.
10. Сторчак С.А. / Совершенствование системы поэтажного обрушения / С.А. Сторчак, В.А. Щелканов, В.А. Витряк, В.А. Сбитнев, В.О. Хивренко // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог: КТУ. – Вып. 74. – 2001. – С. 39-42

Рукопис подано до редакції 14.04.2020

С.Г. САВЕЛЬЄВ, д-р техн. наук, проф., М.М. КОНДРАТЕНКО, ст. викладач,
О.В. БАБАЄВСЬКА, асист.
Криворізький національний університет

ОЦІНКА МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ВПЛИВУ ВИСОТИ ШАРУ АГЛОШИХТИ НА ЙОГО СТРУКТУРНУ МІЦНІСТЬ

Відзначена важлива роль збільшення висоти шару залізородної шихти, що спікається, для поліпшення техніко-економічних показників агломераційного виробництва. Обґрунтована головна причина підвищення механічної міцності агломерату у цьому випадку, яка полягає у збільшенні кількості перенесеного тепла верхньої нагрітої частини шару до нижче розташованих шарів. Це призводить до підвищення температури в зоні формування агломерату, що викликає збільшення кількості розплаву в означеній зоні, підвищує ступінь завершення в ній фізико-хімічних перетворень. З іншого боку, збільшення висоти шару шихти, що спікається, викликає підвищення його газодинамічного опору з відповідним зниженням швидкості фільтрації газу та продуктивності агломераційної машини по спеку. Враховуючи існування критичного рівня підвищення висоти шару, що спікається, починаючи з якого відбувається непропорційне збільшення його газодинамічного опору, обумовлене погіршенням структури шихти внаслідок руйнування гранул нижнього шару, важливо мати методику визначення критичної висоти шару.

Метою роботи є дослідження можливості застосування теорії контактних напружень до вирішення питання впливу висоти шару агломераційної шихти на його структурну міцність.

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

Наукова новизна роботи. На основі проведених розрахунків встановлено, що теорія пружності та пластичної деформації при пружному зминанні не може бути застосована для дослідження деформації гранул згрудкованої агломераційної шихти під дією ваги верхніх шарів, оскільки у цьому випадку має місце невідповідність умовам застосування цієї теорії.

Практична значущість роботи полягає у необхідності розробки та застосуванні при оцінці впливу висоти шару аглошихти на його структурну міцність методів, які не базуються на теорії контактних напружень.

Результати роботи свідчать про те, що застосування теорії контактних напружень для визначення навантажень в насипному шарі гранул згрудкованої шихти на стрічці агломераційної машини та граничної висоти цього шару не коректно.

Ключові слова: агломерат, міцність, пружність, шар шихти, контакт, висота шару.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-122-128

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Парадигма сталого розвитку цивілізації, яка визначає ресурсно-екологічну стратегію промислового розвитку, встановлює певні обмеження (критерії) для вдосконалення, в тому числі процесів виробництва первинного металу: ресурсозбереження, енергозбереження, екологічні вимоги, проблеми підвищення якості сировини для доменної плавки [1, с. 4]. Останній критерій, в той же час, являє собою один з основних методів підвищення ефективності доменної плавки [2, с. 29]. Серед важливих показників якості агломерату – найбільш вагомої складової залізородної частини доменної плавки – значна роль належить так званій «холодній міцності» [3, с. 98-113].

Ефективним способом підвищення механічної міцності агломерату і зниження витрати коштовного твердого палива є спікання агломерату у високому шарі, що пов'язано зі збільшенням кількості тепла, яке надходить в нижче розташовані горизонти шихти, що спікається, а також створення більш сприятливих умов для формування мінералогічної структури готового агломерату.

При збільшенні висоти шару збільшується час контактування повітря з нагрітим спеком, який виступає в якості повітрянагрівача. Чим більше висота шару шихти, що спікається, тим вище температура повітря, що нагрівається, і тим більше тепла надходить в нижче розташований шар.

Слід відзначити, що при збільшенні висоти шару шихти якість верхньої частини спеку не покращується або покращується незначно, за рахунок зниження швидкості агломації, якщо це має місце. Корінне поліпшення якості відбувається у нижче розташованих частинах спеку. Одночасно з поліпшенням якості спеку знижується вихід звороту. [4, с. 125, 126].

Однією з причин підвищення міцності агломерату, отриманого за технологією агломерації в високому шарі, є збільшення кількості розплаву в зоні формування агломерату. Другою при-

чиною можна вважати більшу ступінь завершеності хіміко-мінералогічних перетворень, а уповільнення швидкості охолодження спеку сприяє значттю значної долі термічних і структурних напружень після завершення його кристалізації. Агломерація у високому шарі робить непотрібним використання спеціальної термообробки спеку [5, с. 327].

Однак, збільшення висоти шару шихти неминує призводить до збільшення його газодинамічного опору, зниженню швидкості фільтрації газу та відповідному зниженню продуктивності агломації по спеку. Збільшення висоти шару, що спікається до 0,4÷0,6 м з одночасним збереженням продуктивності є доволі складним технологічним заходом [6, с. 20].

Відомо [7], що при формуванні агломераційного шару, починаючи з деякої висоти, відбувається зростання газодинамічного опору шару, непропорційне збільшенню його висоти. Нижні шари шихти під дією динамічних навантажень при укладанні на палети, і під тиском ваги вище розташованих шарів більш ущільнені та чинять більший газодинамічний опір [8].

Таким чином, можна вважати, що для кожного складу і властивостей агломераційної шихти існує критична висота шару, починаючи з якої збільшення його газодинамічного опору починає змінюватись непропорційно збільшенню висоти шару, яке мало місце до цього, що пояснюється деформацією гранул шихти нижньої частини шару, тобто порушенням його структурної міцності. Визначення цієї критичної висоти шару аглошихти має важливе практичне значення, оскільки дозволяє встановити оптимальну для даної шихти висоту шару, що спікається, з точки зору його газопроникності. Тому проблема оцінки методики визначення впливу висоти шару аглошихти на його структурну міцність є актуальною практичною задачею і має важливе теоретичне значення.

Аналіз дослідження публікацій. Структурні зміни, які відбуваються в шарі шихти при її завантаженні на палету агломації і спіканні призводять до зменшення висоти шару, тобто усадки. Величина усадки характеризує якість підготовки шихти до спікання, міцність гранул, ступінь їх руйнування в процесі завантаження і агломерації, зміну порозності шару. Незважаючи на велике значення усадки шару, глибоких досліджень в цьому напрямку дуже мало [9, с. 32, 33].

Виходячи з того, що усадка є наслідком перекомпонування гранул в шарі, їх деформації та руйнування в зонах шихти, що агломерується, рядом дослідників була зроблена спроба математичного опису взаємозв'язків різних факторів, які впливають на усадку [9, с. 33, 34]. В основу математичної моделі усадки в початковий період спікання покладена залежність усадки внаслідок ущільнення гранул

$$\Delta h = H(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)/(1 + \varepsilon_1), \quad (1)$$

де H – початкова висота шару, м; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – початковий і кінцевий коефіцієнти порозності шару, част. од.

Формула (1) в подальшому була вдосконалена за рахунок встановлення залежності коефіцієнтів порозності від кута, що характеризує взаємне розташування гранул відносно одна одної.

Представлені результати фізико-механічних досліджень властивостей агломераційної шихти, виконаних з використанням методів механіки суцільного середовища, в тому числі рівноважної усадки по висоті шару при просмоктанні через нього газу. Розрахунки показали, що ступінь ущільнення шихти збільшується з глибиною її залягання в шарі, в той час як аналогічна залежність питомої усадки шихти від висоти шару має екстремальний характер.

Оцінюючи прийнятну методику, треба відзначити, що вона не може в повній мірі врахувати процеси, які відбуваються в реальних агломераційних шихтах, де усадка є незавершеною, далекою від рівноважної.

В процесі спікання збільшення висоти шару призводить до більш значущої усадки, ніж темп зростання висоти, що пояснюється більш тривалим перебуванням шихти в зоні перезволоження та більш інтенсивним руйнуванням гранул, особливо в нижніх горизонтах шару [9, с. 35]. Визначення усадки традиційним способом (періодичними замірами загальної висоти шару) без аналізу процесів, що відбуваються в шарі, не дає дійсної картини структурних змін і не здатне пояснити причини непропорційного збільшення газодинамічного опору зі збільшенням висоти шару, особливо більше 0,4÷0,5 м.

Постановка задачі. Завдання даної роботи полягає в аналізі можливості застосування теорії контактних напружень для розрахунку навантажень у шарі згрудкованої шихти на стрічці агломераційної машини, які впливають на структуру шару, та граничної висоти цього шару.

Викладення матеріалу та результати. В деяких роботах для визначення напруг, що призводять до руйнування гранул шихти, запропоновано використовувати методику вирішення задач теорії пружності та пластичної деформації про пружне зминання куль [5, с. 21-27; 8]. При цьому гранули шихти умовно вважаються такими, що мають сферичну форму з діаметром $d_{сер}$. Шар шихти, відповідно, буде сукупністю хаотично упакованих куль різного діаметру.

В основу теорії контактних напружень [10] покладено наступні припущення:

матеріал дотичних тіл в зоні контакту однорідний і відповідає закону Гука;

лінійні розміри майданчика контакту малі в порівнянні з радіусом кривизни і лінійними розмірами дотичних поверхонь в околиці точок контакту;

сили тертя між дотичними тілами мізерно малі.

При цьому знайдено, що при стискуванні двох тіл, обмежених плавними поверхнями, майданчик контакту має форму еліпса (зокрема, кола або смужки), а інтенсивність розподілу контактних напружень по цьому майданчику підпорядковується еліпсоїдному закону.

Контактні напруги – це механічні напруги, які виникають при взаємодії твердих тіл, що деформуються, на майданчиках їх стикання та поблизу цих майданчиків. Контактні напруги мають місцевий характер, тобто швидко зменшуються при достатньому віддаленні від місця контакту (стикання тіл). Розподіл контактних напруг майданчиком контакту та в його околиці нерівномірний і характеризується великими градієнтами. Важливою особливістю розподілу контактних напруг (наприклад, при стискуванні куль) є те, що максимальні дотичні напруги τ_{max} , які значною мірою зумовлюють міцність тіл, що стискаються, мають місце на деякій глибині під майданчиком контакту. Поблизу самого цього майданчика напружений стан близький до гідростатичного стискування, при якому, як відомо, дотична напруга відсутня.

Якщо вважати, що гранули шихти мають сферичну форму, майданчик контакту буде мати форму кола з радіусом a , на якому діє тиск з інтенсивністю $p(r) = p_0 \sqrt{1 - r^2/a^2}$; $r^2 = x^2 + y^2$; $0 \leq r \leq a$. Максимальна напруга, яка створюється в гранулі шихти, прямо пропорційна навантаженню і обернено пропорційна площі контакту тіл

$$p_0 = 1,5P/(\rho a^2), \quad (2)$$

де P – рівнодіюча сил, прикладених до кожної з дотичних куль.

При цьому радіус майданчику контакту буде визначатися за формулою

$$a = 0,5 \left\{ 6PR_1R_2 \left[(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2 \right] / (R_1 + R_2) \right\}^{0,33}, \quad (3)$$

де R_1 та R_2 – радіуси кривизни дотичних поверхонь; E_i ($i = 1, 2$) – модулі Юнга матеріалу розглядуваних тіл; ν_1, ν_2 – коефіцієнти Пуассона матеріалу розглядуваних тіл.

Найбільші стискаючі контактні напруги діють у центрі майданчика і дорівнюють $\sigma_z = -p_0$, а між напругами $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ у центрі майданчика контакту існує залежність $\sigma_x = \sigma_y = (0,5 + n)\sigma_z$.

Максимальні дотичні напруження в цьому випадку рівні $\tau_{max} = 0,3 p_0$ і мають місце в точці, що віддалена від центру майданчика контакту по осі O_z на відстань $0,786a$.

Частина припущень, на яких базується теорія контактних напружень, не може бути застосована до гранул агломераційної шихти. По перше, зминання гранул шихти можна назвати пружним з великою пересторогою: пружність – це властивість тіла повертатися до первинної форми після зняття прикладеної до нього сили. Такі деформації та тіла і називають пружними. Поки що не відбувалося досліджень, які б могли підтвердити наявність властивості пружності гранул агломераційної шихти і діапазон напруг, в якому пружність зберігається, а отже і відповідність закону Гука для них залишається під питанням. По друге, матеріал в зоні контакту гранул, що стикаються, ніяк не є однорідним. По третє, сили тертя між гранулами шихти, що стикаються, не можна вважати малими до нехтування.

Очевидно, що ані модуль Юнга, ані коефіцієнт Пуассона шихти ніким ніколи не досліджувався і за визначенням не може бути обчислений для не пружних тіл. Однак відома спроба теоретичного аналізу напруг, які призводять до руйнування гранул сирової шихти, за допомогою теорії пружності та пластичної деформації про пружне зминання куль [5, с. 22-25]. Проаналізуємо результати цих досліджень.

В зазначеній роботі наводяться результати серії випробувань з визначення максимальної величини руйнуючого зусилля (P), що прикладене в точці стикання гранули, шляхом роздавлювання пуансоном зі сферичною формою наконечника радіусом 8 мм, що на думку автора імітувало взаємодію двох гранул шихти сферичної форми. На жаль, в роботі матеріал пуансона не вказаний. Скоріше за все, це легована сталь, для якої модуль Юнга $E_1 = 2,1 \cdot 10^{11}$ Па, а коефіцієнт Пуассона $\nu_1 = 0,3$. Величина першого доданку в дужках формули (3) для легованих сталей складе

$$(1 - \nu_1^2) / E_1 = (1 - 0,3^2) / (2,1 \cdot 10^{11}) = 4,333 \cdot 10^{-12}.$$

Гранична висота шару шихти, за якої почнеться руйнування гранул, обчислюється за формулою [5, с. 22]

$$h_{cp} = (p_0 - p_2) / g, \quad (4)$$

де $p_2 = 8$ кПа – зусилля тиску фільтраційних газів; $\gamma = 1900$ кг/м³ = 18639 Н/м³ – насипна маса сирової шихти.

Очевидно, що фізичні параметри гранул сирової шихти будуть змінюватись в залежності від хімічного та гранулометричного складу шихти та її вологості. Але, як було зазначено вище, інформація про модулі Юнга та коефіцієнти Пуассона гранул сирової шихти будь-якого хімічного та гранулометричного складу та вологості відсутня у відомих літературних джерелах. Тому задля того, щоб не нехтувати другим доданком у формулі (3) замість шихт візьмемо аналогічні параметри ґрунтів для створення дорожніх покриттів [11, с. 28, 31; 12]: піску крупного ($E_2 = 30$ МПа, $\nu_2 = 0,3$); піску дрібного ($E_3 = 30$ МПа, $\nu_3 = 0,38$); суглинків ($E_4 = 40$ МПа, $\nu_4 = 0,33$); глини ($E_5 = 1000 \div 2000$ кг/см² = 98,1 ÷ 196,2 МПа, $\nu_5 = 0,42$). Ці матеріали за своїми фізичними властивостями та гранулометричними характеристиками найбільш подібні до залізородної агломераційної шихти.

Результати розрахунків радіусу майданчиків контакту a , максимальної напруги p_0 , яка створюється в гранулі, граничної висоти шару шихти h_{cp} , за якої почнеться руйнування гранул, для різних матеріалів наведено у табл. 1. Для більшої наочності узагальнені граничні значення параметрів шихти, розрахованих на основі теорії контактних напружень, представлені у табл. 2.

Аналіз формули (3) та результатів розрахунків, що містяться в таблицях 1 і 2, вказує на наступне.

Реальні коефіцієнти Пуансона агломераційних шихт мають знаходитись в тих межах, які були застосовані у вищеозначених розрахунках. Збільшення коефіцієнту Пуассона дуже незначною мірою збільшує граничну висоту шару матеріалу, за якої почнеться руйнування гранул.

У порівнянні з модулем пружності (Юнга) сталей ($E = (2 \div 2,1) \cdot 10^{11}$ Па) та інших металів модулі деформації природних матеріалів, що можуть входити до складу агломераційних шихт, на 3 ÷ 5 порядків менші ($2 \div 20$) $\cdot 10^9$ Па. Збільшення модуля пружності матеріалу гранул у декілька разів збільшує граничну висоту шару матеріалу, за якої почнеться руйнування гранул. Реальні модулі деформації (Юнга) агломераційних шихт мають знаходитись в тих межах, які були застосовані у наведених розрахунках.

За насипної маси шихти $\gamma = 1900$ кг/м³ та зусилля тиску фільтраційних газів $P_2 = 8$ кПа гранична висота шару матеріалу h_{cp} , за якої почнеться руйнування гранул, буде коливатись не в межах 0,18 ÷ 1,91 м [5, с. 23, табл. 1.2], а у межах декількох сотень метрів.

Застосування теорії контактних напружень для визначення граничної висоти шару аглошихти не є коректним, на що вказують неправдоподібно величезні значення результатів розрахунків для природних матеріалів, подібних агломераційній шихті. Це пов'язано з непружною природою гранул шихти, а також з тим, що в шарі шихти сили та навантаження діють зазвичай хаотично, їх векторна сума не діє по нормалі до поверхонь гранул; точок прикладення сили до однієї гранули зазвичай більше, ніж одна.

Таблиця 1

Результати розрахунків параметрів шксту з урахуванням характеристик різних типів матеріалів

Співвідношення концентрату з руд у загірзуванні суміші, %	Діаметр фракції, R, м	Рудинне зусилля, P, кт	Резонансне зусилля, F ₁ , Н	Пісок крупний E ₃ = 10 МПа, ν ₃ = 0,3		Пісок дрібний E ₃ = 30 МПа, ν ₃ = 0,38		Суглинок E ₃ = 40 МПа, ν ₃ = 0,33		Слина E ₃ = 98 МПа, ν ₃ = 0,42		Глина E ₃ = 1962 МПа, ν ₃ = 0,42									
				α · 10 ⁻⁴ , м	σ _{max} = P ₀ , МПа	k _{sp} , м	σ _{max} = P ₀ , МПа	α · 10 ⁻⁴ , м	k _{sp} , м	σ _{max} = P ₀ , МПа	α · 10 ⁻⁴ , м	k _{sp} , м	σ _{max} = P ₀ , МПа	α · 10 ⁻⁴ , м	k _{sp} , м	σ _{max} = P ₀ , МПа	α · 10 ⁻⁴ , м	k _{sp} , м	σ _{max} = P ₀ , МПа	α · 10 ⁻⁴ , м	k _{sp} , м
1:10	0,003	0,13	1,2753	3,99	3,83	205,23	3,90	3,99	213,86	3,60	4,71	252,21	2,60	9,02	483,69	2,06	14,32	767,80			
	0,005	0,238	2,33478	5,47	3,73	199,63	5,36	3,89	208,02	4,93	4,58	245,33	3,56	8,78	470,51	2,83	13,93	746,89			
	0,008	0,253	2,48193	6,09	3,19	170,98	5,97	3,33	178,17	5,49	3,92	210,14	3,97	7,52	403,08	3,15	11,93	639,88			
	0,01	0,287	2,81547	6,58	3,11	166,22	6,44	3,24	173,21	5,94	3,82	204,29	4,29	7,31	391,86	3,40	11,60	622,07			
	0,015	0,302	2,96262	7,06	2,84	151,89	6,92	2,96	158,28	6,37	3,49	186,68	4,60	6,68	358,12	3,65	10,61	568,54			
	0,003	0,059	0,57879	3,06	2,95	157,62	3,00	3,07	164,25	2,76	3,62	193,72	2,00	6,93	371,61	1,58	11,00	589,95			
	0,005	0,098	0,96138	4,07	2,77	148,41	3,99	2,89	154,65	3,67	3,41	182,41	2,65	6,53	349,93	2,10	10,36	555,55			
	0,008	0,137	1,34397	4,96	2,60	139,29	4,86	2,71	145,15	4,48	3,20	171,20	3,24	6,13	328,46	2,57	9,73	521,48			
20:80	0,01	0,176	1,72656	5,59	2,64	141,15	5,48	2,75	147,09	5,04	3,24	173,49	3,64	6,21	332,85	2,89	9,86	528,44			
	0,015	0,251	2,46231	6,64	2,67	142,78	6,50	2,78	148,79	5,95	3,28	175,49	4,33	6,28	336,68	3,43	9,97	534,52			
	0,003	0,044	0,43164	2,78	2,67	142,89	2,72	2,78	148,91	2,51	3,28	175,64	1,81	6,29	336,96	1,44	9,98	534,95			
	0,005	0,073	0,71613	3,69	2,51	134,49	3,61	2,62	140,15	3,33	3,09	165,31	2,40	5,92	317,17	1,91	9,39	503,56			
	0,008	0,11	1,0791	4,61	2,42	129,43	4,52	2,52	134,88	4,16	2,97	159,09	3,01	5,70	305,26	2,39	9,04	484,65			
	0,01	0,135	1,32435	5,12	2,42	129,17	5,01	2,52	134,61	4,62	2,97	158,78	3,33	5,69	304,65	2,65	9,02	483,70			
	0,015	0,194	1,90314	6,09	2,45	131,00	5,97	2,55	136,51	5,50	3,01	161,02	3,97	5,77	308,95	3,15	9,15	490,50			
	0,003	0,039	0,38259	2,67	2,57	137,25	2,61	2,67	143,02	2,41	3,15	168,70	1,74	6,04	323,66	1,38	9,59	513,85			
50:40	0,005	0,067	0,65727	3,58	2,44	130,69	3,51	2,55	136,19	3,23	3,00	160,64	2,34	5,75	308,22	1,85	9,13	489,35			
	0,008	0,1	0,981	4,47	2,34	125,37	4,38	2,44	130,65	4,03	2,88	154,11	2,91	5,52	295,70	2,31	8,76	469,48			
	0,01	0,123	1,20663	4,96	2,34	125,21	4,86	2,44	130,48	4,48	2,88	153,92	3,23	5,51	295,33	2,57	8,75	468,90			
	0,015	0,185	1,81485	5,99	2,41	128,93	5,87	2,51	134,36	5,41	2,96	158,48	3,91	5,68	304,09	3,10	9,01	482,79			
	0,003	0,039	0,38259	2,67	2,57	137,25	2,61	2,67	143,02	2,41	3,15	168,70	1,74	6,04	323,66	1,38	9,59	513,85			
	0,005	0,064	0,62784	3,53	2,41	128,70	3,46	2,51	134,12	3,18	2,96	158,20	2,30	5,67	303,54	1,83	8,99	481,93			
	0,008	0,096	0,94176	4,41	2,31	123,67	4,32	2,41	128,87	3,98	2,84	152,02	2,87	5,44	291,70	2,28	8,64	463,13			
	0,01	0,12	1,1772	4,92	2,32	124,18	4,82	2,41	129,41	4,44	2,85	152,65	3,21	5,47	292,91	2,55	8,68	465,06			
80:20	0,015	0,181	1,77561	5,95	2,39	127,99	5,83	2,49	133,38	5,37	2,94	157,33	3,88	5,63	301,87	3,08	8,94	479,28			
	0,003	0,037	0,36297	2,62	2,52	134,85	2,57	2,63	140,53	2,37	3,15	165,75	1,71	5,94	318,02	1,36	9,42	504,91			
	0,005	0,062	0,60822	3,49	2,38	127,34	3,42	2,48	132,70	3,15	2,93	156,53	2,28	5,61	300,34	1,81	8,90	476,85			
	0,008	0,097	0,95157	4,42	2,32	124,10	4,33	2,42	129,32	3,99	2,85	152,54	2,88	5,46	292,71	2,29	8,67	464,74			
	0,01	0,119	1,16739	4,91	2,32	123,84	4,81	2,41	129,05	4,43	2,85	152,23	3,20	5,45	292,09	2,54	8,65	463,76			
	0,015	0,178	1,74618	5,92	2,38	127,28	5,80	2,48	132,64	5,34	2,92	156,45	3,86	5,60	300,20	3,06	8,89	476,62			

Модуль пружності (Юнга) та руйнуюче зусилля для однієї окремої гранули не може бути застосований для розрахунків граничної висоти шару шихти, за якої почнеться руйнування гранул нижніх шарів. Потрібні дослідження фізичних властивостей та гранулометричних показників саме маси гранул різного розміру з хаотичною упаковкою в шар шихти. Для цих досліджень більше підійдуть установки та методики, застосовувані для досліджень шару дорожніх покриттів, сумішей та ґрунтів для цих покриттів.

Таблиця 2

Граничні (узагальнені) значення розрахунків параметрів шихти з різних матеріалів

Матеріал шихти	Матеріал пуансона – сталь		E_{2-5} , МПа	ν_{2-5}	a , м	$\sigma_{max} = p_0$, МПа	h_{zp} , м
	E_I , МПа	ν_I					
Пісок крупний	$2,1 \cdot 10^5$	0,3	30	0,33	$(2,62 \div 7,05) \cdot 10^{-4}$	$2,31 \div 3,83$	$123,67 \div 205,23$
Пісок дрібний			30	0,38	$(2,57 \div 6,92) \cdot 10^{-4}$	$2,41 \div 3,99$	$128,87 \div 213,86$
Суглинки			40	0,33	$(2,37 \div 6,37) \cdot 10^{-4}$	$2,84 \div 4,71$	$152,02 \div 252,21$
Глина			98,1	0,42	$(1,71 \div 4,60) \cdot 10^{-4}$	$5,44 \div 9,02$	$291,70 \div 483,69$
			196,2	0,42	$(1,36 \div 3,65) \cdot 10^{-4}$	$8,64 \div 14,32$	$463,13 \div 767,80$

Висновки та напрямок подальших досліджень. Результати проведеного дослідження свідчать про некоректність застосування теорії контактних напружень для розрахунку критичної висоти шару агломераційної шихти, починаючи з якої відбувається руйнування гранул нижнього горизонту шару з подальшим непропорційним зростанням газодинамічного опору. Цей висновок пояснюється невідповідністю властивостей гранул шихти умовам застосування теорії контактних напружень, а також складним характером навантажень на окрему гранулу в шарі шихти.

Подальший напрямок досліджень може бути пов'язаний із розробкою методики і установки для експериментального визначення зміни деформації (усадки) агломераційної шихти при збільшенні висоти шару.

Список літератури

1. Савчук Н.А. Агломерация: современный аспект / Н.А. Савчук, В.М. Чижикова // М.: Черметинформация, 2004. – 124 с.
2. Совершенствование технологии и оборудования производства железорудного сырья для современной доменной плавки / В.П. Лялюк, Н.И. Ступник, Ф.М. Журавлёв [и др.] // Кривой Рог: Дионат, 2017. – 368 с.
3. Вегман Е.Ф. Интенсификация агломерационного процесса / Вегман Е.Ф., Пыриков А.Н., Жак А.Р. – М.: Машиностроение, 1995. – 126 с.
4. Теория и практика управления агломерационным процессом / С.Б. Новак, Н.И. Гармаш, В.А. Мартыненко, А.В. Мартыненко // Кривой Рог: ЮГОК, 2006. – 340 с.
5. Петрушов С.Н. Современный агломерационный процесс: Монография / С.Н. Петрушов // Алчевск: ДонГТУ, 2006. – 360 с.
6. Агломерация рудных материалов / В.И. Коротич, Ю.А. Фролов, Г.Н. Бездежский // Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.
7. Александров Л.И. Исследование газопроницаемости агломерационного слоя при его переувлажнении и сушке / Бюллетень ЦНИИЧермет // 1971. – № 12. – С. 18, 19.
8. Увеличение толщины слоя шихты при производстве агломерата / Е.Ф. Вегман, И.М. Мищенко, В.И. Кривоносов [и др.] // Бюллетень ЦНИИЧермет – 1972. – № 19. – С. 22-24.
9. Петрушов С.Н. Формирование слоя шихты на агломашине. Курс лекций / С.Н. Петрушов // Алчевск: ДонГТУ, 2009. – 187 с.
10. Энциклопедия физики и техники. Контактные напряжения. http://femto.com.ua/articles/part_1/1735.html
11. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость Справочное пособие // А.Б. Айнбиндер, А.Г. Камерштейн // М.: Недра, 1982. – 341 с.
12. Студопедия. Общая характеристика ґрунтов. <https://studopedia.org/13-120350.html>

Рукопис подано до редакції 25.03.2020

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

УМОВИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗУДАРНОГО РЕЖИМУ РОБОТИ ПНЕВМАТИЧНИХ ВІБРАЦІЙНИХ ПРИВОДІВ ДІАФРАГМОВОГО ТИПУ

Мета. Метою роботи є усунення негативних наслідків ударних навантажень на елементи пневматичних вібраційних приводів гірничих машин за рахунок застосування безударних режимів роботи. Важливість проблеми інтенсифікації процесів випуску гірничої маси та продуктів її переробки з будь-яких ємностей в умовах гірничих та гірничозбагачувальних підприємств обумовлюється частими зависаннями та зводуотвореннями матеріалу. Застосування вібраційних засобів боротьби з цими явищами в блоках, рудозвальних висхідних виробках, бункерах дозволяє суттєво знизити їх кількість. Використання вібраційних приводів безударного типу є дуже перспективним і для процесу доставки гірничої маси у межах очисного блоку. Усе це підтверджує актуальності теми дослідження.

Методи дослідження. В результаті аналізу науково-технічної інформації сформульовано вимоги до таких пристроїв. За допомогою методу порівняльного аналізу визначено переваги віброзбудників пневматичного типу та перспективи їх використання в розглянутих умовах експлуатації. На підставі динамічного аналізу процесу роботи зроблено висновок про необхідність реалізації безударного режиму таких конструкцій для забезпечення високого рівня надійності та довговічності. Проаналізовано недоліки розглянутої раніше конструкції інерційного пневматичного віброзбудника з масивним поршнем. Зроблено висновок про її недостатній енергетичний рівень внаслідок обмежених можливостей шахтної пневмомережі.

Наукова новизна. Полягає у розробці ідеї підвищення енергетичних можливостей безударних конструкцій пневматичних віброзбудників шляхом використання конструктивних схем діафрагмового типу з поршневим та дисковим пульсаторами.

Практична значимість. Практична реалізація ідеї дозволить при тих самих параметрах шахтної пневмомережі отримати у декілька разів більші значення змушеного зусилля приводів, причому без підвищення їх маси та погіршення умов обслуговування.

Результати. Отримано залежності для визначення конструктивних параметрів безударних пневматичних вібраційних приводів діафрагмового типу з поршневим та дисковим пульсаторами.

Ключові слова: пневматичний вібраційний привод, безударний режим роботи, надійність і довговічність віброприводів.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-128-132

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Транспортування гірничої маси під час здійснення підземної розробки рудних родовищ пов'язано з виконанням численних навантажувальних і розвантажувальних операцій [1-4]. На рис. 1 показана традиційна схема руху гірничої маси від очисного забою до поверхневого комплексу шахти.

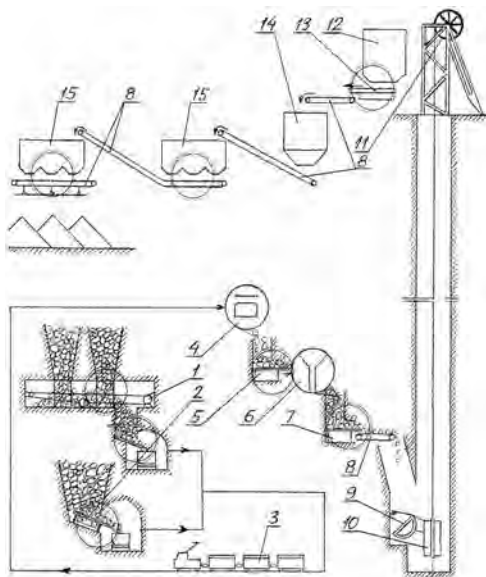


Рис. 1. Схема руху гірничої маси на залізородній шахті: 1 – скреперна лебідка; 2, 5, 7, 13 – живильники; 3 – електровозна відкатка; 4 – перекидач; 6 – дробарка; 8 – стрічкові конвеєри; 9 – дозатор; 10 – скіп; 11 – підйомна машина; 12, 14 – бункери; 15 – протяжні ємності з рудою

На цьому шляху потік руди з блоку спочатку транспортується скреперною установкою до рудозвальної виробки, якою скидається на нижній відкотний горизонт. Далі руда вагонами електровозної відкатки прямує до перекидного пристрою біля стволу шахти, після якого проходить дробарку і дозатор та скіповим підйомником видається на поверхню. На усіх етапах підземного транспортування гірничої маси багаторазово завантажується і розвантажується, падає з різної висоти, руйнується й ущільнюється при цьому. Рух руди на поверхні від стволу до дробильно-сортувальної фабрики та збагачувального підприємства також супроводжується подібними операціями. При цьому кожного разу виникає небезпека проміжного зависання гірничої маси внаслідок її злежування та взаємного заклинення шматків. Ліквідація ж зависань ручним або вибухо-

вим способами забирає багато часу і дуже небезпечна для гірників. Колами на рис. 1 показані виробничі дільниці, які конче потребують інтенсифікації процесу витікання гірничої маси з різного роду ємностей (блоків, рудозвальних виробок, бункерів).

Проблема може бути вирішена за рахунок широкого впровадження вібраційної техніки для випуску і транспортування сипких матеріалів. В останні десятиліття створено багато високо-ефективних конструкцій віброживильників та віброконвеєрів, які забезпечують суттєве підвищення продуктивності цих технологічних процесів за рахунок змінення властивостей дисперсних середовищ під впливом вібрації [2,3,5-9]. Використання такої техніки дає можливість широкого впровадження циклічно-потоківих та потоківих технологій гірничого виробництва [2,10].

У той же час, з особливими труднощами процес випуску і транспортування гірничої маси зустрічається в умовах використання систем розробки з підповерховим обваленням руди. Малі обсяги видобутку, що припадають на один випускний отвір, стиснені габарити доставкових виробок, обмежені терміни їх експлуатації внаслідок нестійкості руд і порід та сильного впливу гірничого тиску не дають можливості застосовувати сучасні потужні засоби вібраційного випуску і доставки гірничої маси. Досі випуск руди з дучок здійснюється здебільшого гравітаційним способом (під дією власної ваги гірничої маси і з дуже частими зависаннями), а її доставка у межах очисного блоку чи панелі – такими безнадійно застарілими, енергоємними та циклічними машинами, як скреперні установки. Сподіватися за таких обставин на суттєве зростання ефективності процесу очисного виймання руди – марна справа [2,3,8,10].

З огляду на вищесказане, важливість проблеми створення нових високопродуктивних і надійних конструкцій вібраційних пристроїв для інтенсифікації випуску і доставки гірничої маси в умовах підповерхового обвалення руди, а, разом із цим, й актуальність теми роботи не викликають жодних сумнівів.

Аналіз досліджень і публікацій. Для експлуатації в умовах систем розробки з підповерховим обваленням руди потрібні прості, дешеві і водночас ефективні вібраційні засоби випуску і доставки гірничої маси, рентабельні в умовах незначних її запасів у виймальній дільниці.

В роботі [11] було розглянуто можливі напрямки вирішення цієї проблеми. Для спонукання процесу витікання гірничої маси з дучки та доставки її до рудозвальної виробки доцільно використовувати віброзбудники легкого типу з віброприводами інерційного типу. Причому краще, якщо це будуть пневматичні приводи. Пневматична енергія доступна у будь-якому місці шахти, а її застосування (у порівнянні з електричною в електромеханічних приводах) набагато безпечніше в обводнених підповерхових виробках, а також під час ведення підривних робіт.

Важливо при цьому реалізувати раціональні режими роботи, потрібні для належного протикнення вібрацій у стовп руди у випускній виробці та вібротранспортування рудопотоку з максимальною швидкістю. Це вібрації з частотою коливань порядку 15-25 (30) Гц і амплітудою 2-5 (10) мм [2,11]. Крім того, вони повинні мати безударний режим роботи для забезпечення високого рівня надійності та довговічності конструкцій [11,12].

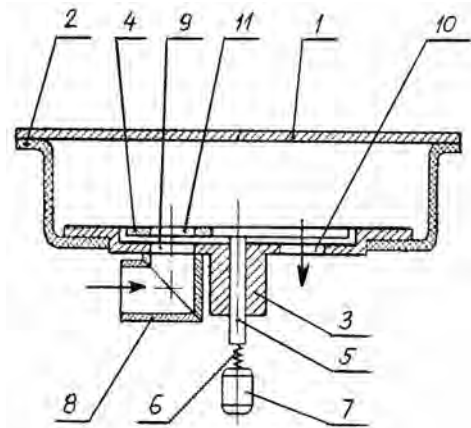
Розглянутий в роботі [11] інерційний пневматичний вібраційний привод з масивним поршнем цілком відповідає сформульованим вище вимогам. Він забезпечує потрібні режими коливань, а повітряні подушки в його робочих порожнинах – безударний режим роботи установки. Для цього запропоновані необхідні раціональні конструктивні параметри пристрою.

Проте, такий привод має доволі обмежені енергетичні можливості, а його обслуговування ускладнюється значною вагою віброзбудника. Справа у тім, що величина змушеного зусилля поршневого віброприводу залежить від тиску повітря та площі поршня, на яку він діє. Тиск повітря в шахтній пневмережі обмежений можливостями компресора, що її живить. Він забезпечує тиск порядку 0,7-0,8 МПа, від яких після доставки повітря до шахтних забоїв (а це можуть бути відстані у декілька кілометрів) в умовах численних витоків на трасі у кращому випадку залишається не більше 0,5 МПа. Розміри поршня також не можна збільшувати нескінченно. Вже при діаметрі 0,2 м його маса перевищує 50 кг, а маса усього віброзбудника з корпусом і кришками – 100-120 кг. Операції обслуговування і ремонту такого приводу в умовах крайньої незначної механізації стають дуже незручними і трудомісткими. А величина змушеного зусилля при такому розмірі поршня не перевищує 16 кН. Далі збільшувати розміри не можна, а разом із тим, для ефективного руйнування зависань у випускних виробках потрібні суттєво більші зусилля, які забезпечують віброживильники важкого типу – не менше 50-70 кН, а краще

передньо заданою чи регульованою частотою можна звільнити повітря від функції керування, залишив йому тільки силу, а частоту коливань регулювати за допомогою зовнішнього регулятора.

На рис. 3 показана схема такого діафрагмового вібробудника – з дисковим пульсатором.

Рис. 3. Розрахункова схема діафрагмового пневматичного вібробудника з дисковим пульсатором: 1 – робочий орган; 2 – діафрагма; 3 – корпус пульсатора; 4 – дисковий ротор; 5 – вал; 6 – муфта; 7 – електродвигун; 8 – впускний патрубок; 9 – впускний отвір; 10 – вихлопний отвір; 11 – перепускний отвір ротору



Він має аналогічній попередній конструкції робочий орган 1 і діафрагму 2, які утворюють пневмокамеру, а замість поршневого пульсатора тут використовується дисковий ротор 4, який обертається у корпусі 3 від електродвигуна 7 через муфту 6 і вал 5. Частота обертання ротора (а, значить, і частота коливань) задається електродвигуном [14].

Для реалізації безударного режиму роботи такого приводу потрібно усунути контакт між ротором і робочим органом пневмокамери. Цього можна досягти створенням повітряної подушки між ротором і робочим органом шляхом забезпечення залишкового тиску у пневмокамері під час вихлопу з неї. Тобто вихлоп має бути неповним, залишковий об'єм пневмокамери повинен бути не менше 10-15% максимального для гарантування відсутності контакту між ротором і робочим органом. Такий результат створюється належним підбором розмірів впускного і вихлопного вікон ротора.

Для вібробудників за схемами на рис. 2 і 3 за допомогою формули для визначення часу заповнення стисненим повітрям замкненого об'єму (див. [13,14]) можна отримати залежності, що описують вплив частоти коливань робочого органу пневмокамери на конструктивні параметри віброприводу. Для вібробудника з поршневим пульсатором матимемо

$$V_n = 5,52 \times 10^{-4} \omega V_{nn} W,$$

а для вібробудника з дисковим пульсатором

$$R = \frac{4,8 \times 10^{-3} \sqrt{W+17,4}}{k'},$$

де V_n , V_{nn} – об'єми відповідно підпоршневої та надпоршневої порожнин поршневого пульсатора; R – радіус ротору дискового пульсатора; ω – кругова частота коливань, рад/с; $k\phi = 0,9$ – коефіцієнт, що враховує наявність залишкового тиску повітря у пневмокамері.

На рис. 4 приведена номограма для вибору раціональних значень довжини поршня l_n поршневого та радіусу ротору R дискового пульсаторів. Номограма збудована за наступними залежностями l_n і R від величини змушеного зусилля $P_{зм}$, частоти ω та амплітуди A коливань робочих органів вібробудників з використанням формули для визначення часу заповнення повітрям обмеженого об'єму [15]

$$l_n = \frac{\sqrt{P_{зм} W A}}{2,57 \times 10^3}; \quad R = \frac{\sqrt{P_{зм} W A}}{5,2 \times 10^3}.$$

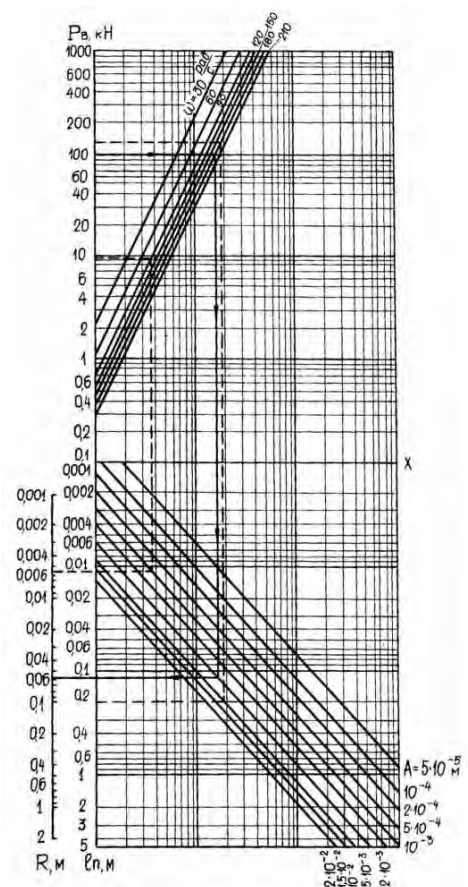


Рис. 4. Номограма для визначення конструктивних параметрів діафрагмових вібробудників

Можливості шахтної пневмомережі дозволяють використовувати пневмокамеру максимальною площею 0,2-0,25 м² (тобто діаметром від 0,5 до 0,56 м) при частоті 20-25 Гц та амплітуді 5-10 мм. Щоби забезпечити повітрям порожнину такого об'єму, необхідні наступні величини довжини поршню або радіусу ротору: $l_n = 0,1-0,15$ м, $R = 0,05-0,075$ м.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Застосування пневматичних вібраційних приводів різних типів для інтенсифікації процесів випуску і доставки гірничої маси в умовах гірничих та гірничозбагачувальних підприємств дасть можливість суттєво підвищити продуктивність такого обладнання, а безударний режим роботи – його експлуатаційну надійність та довговічність.

Список літератури

1. **Бизов В.Ф.** Гірничі машини. Підручник для студентів вищих навчальних закладів за напрямком «Гірництво». Бібліотека гірничого інженера в 14 томах. Том IX / **В.Ф. Бизов, В.П. Франчук.** – Кривий Ріг: Мінерал, 2004. – 468 с.
2. **Громадський А.С.** Проектування, формування та використання комплексів гірничорудного механізованого обладнання: Навч. посібник / **А.С. Громадський, Ю.Г. Горбачов, О.С. Ліфенцов.** – Кривий Ріг: КНУ, 2017. – 229 с.
3. **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.
4. Гірничі машини та обладнання для добування руд: навч. посіб. для студ. вищих навч. закладів / **Ю.Г. Горбачов, Б.М. Гопкало, А.С. Громадський, О.С. Ліфенцов, М.С. Плішко, В.А. Семенов, А.О. Хруцький, Ю.І. Чумак, І.А. Шиповський** / Під заг. ред. **А.С. Громадського.** - Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ. – 2017. – 410 с.
5. **Потураев В.Н.** Вибрационная техника и технологии в энергоемких производствах / **В.Н. Потураев.** – Дн-ск: НГА України, 2002, - 190 с.
6. **Blechman I.I.** Revisiting the models of vibration screening process / **I.I. Blechman, L.I. Blechman, L.A. Vaisberg, K.S. Ivanov.** - Vibroengineering PROCEDIA, 2014, V. 3, PP. 169-174.
7. **Гончаревич И.Ф.** Вибротехника в горном производстве / **И.Ф. Гончаревич.** – М.: Недра, 1992, - 319 с.
8. **Учитель А.Д.** Вибрационный выпуск горной массы / **А.Д. Учитель, В.В. Гушин.** – М.: Недра, 1981. – 232 с.
9. Вибрационные машины для выпуска и доставки руды / **В.Н. Потураев, В.И. Дырда, О.К. Авдеев, И.К. Поддубный, В.П. Надутый, Н.Г. Кравченко, В.Н. Платонов, В.И. Финогеев.** – К.: Наукова думка, 1981. - 152 с.
10. **Каварма И.И.** Комплексы поточного транспорта для подземной разработки крепких руд / **И.И. Каварма, А.В. Бровко.** - М.: Недра, 1986. - 86 с.
11. **Горбачов Ю.Г.** Обгрунтування режиму роботи вібраційних приводів пневматичного типу / **Ю.Г. Горбачов** // Гірничий вісник. – 2017. – Вип. 102. – С. 139-143.
12. **Перельцайг М.И.** Исследование динамики ударного пневматического поршневого привода / **М.И. Перельцайг.** // В кн.: Анализ и синтез машин-автоматов - М.: Наука, 1965.
13. **Горбачев Ю.Г.** Исследование безударного диафрагменного пневмовибропривода / **Ю.Г. Горбачев** // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 10. – М.: Недра, 1986. – С. 151-157.
14. **Горбачев Ю.Г.** О расчете рабочих и конструктивных параметров безударного диафрагменного вибровозбудителя с дисковым пульсатором / **Ю.Г. Горбачев, Н.Ф. Василенко** // В кн.: Научно-технические проблемы подземной разработки железорудных месторождений. Сб. научных трудов - Кривой Рог: НИГРИ, 1985. - С. 62-65.
15. **Герц Е.В.** Расчет пневмоприводов / **Е.В. Герц, Г.В. Крейнин.** – М.: Машиностроение, 1975. – 273 с.

Рукопис подано до редакції 30.04.2020

УДК 622.271.4

А.О. ХРУЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., **Вік.А. ГРОМАДСЬКИЙ**, канд. техн. наук, ст.викл., **Ю.І. ЧУМАК**, ст.викл., **М.Д. СУЛІМОВСЬКИЙ**, магістрант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ КАР'ЄРНИХ ЕКСКАВАТОРІВ ТИПУ ЕКТ

Мета. Підвищення ефективності проєктованих екскаваторів за рахунок уточнення емпіричних формул для наближеного попереднього розрахунку основних параметрів екскаваторів з урахуванням функціональних критеріїв якості.

Методи досліджень включають узагальнення досвіду проєктування механічних кар'єрних екскаваторів великої потужності, експериментальних досліджень, математичне моделювання та аналіз параметрів процесу копання.

© Хруцький А.О., Громадський Вік.А., Чумак Ю.І., Сулімовський М.Д., 2020

Наукова новизна. Уточнено методику попереднього розрахунку основних параметрів екскаваторів на основі емпіричних ступеневих залежностей виду $y = aX_K^b$ урахуванням параметрів розширеного модельного ряду екскаваторів з місткістю ковша від 4 м³ до 30 м³ і функціональних критеріїв якості.

Практична значимість. Отримано розрахункові залежності наступних параметрів: маса екскаватору, маса ковша, розміри ковша (ширина, довжина, висота), радіус черпання, максимальна висота розвантаження, довжина стріли, максимальна висота черпання, висота напірного валу (висота забою), довжина рукояті, висота п'яти стріли, відстань від осі п'яти до осі обертання екскаватора, потужність мережевого двигуна, тривалість робочого циклу, діаметр головних блоків екскаватора, хід рукояті екскаватора, швидкість підйому ковша, швидкість напору.

Результати. Проаналізовано типорозмірний ряд сучасних базових моделей механічних кар'єрних екскаваторів типу «пряма лопата» з місткістю ковша від 4 м³ до 30 м³ для розробки м'яких, щільних і підірваних скельних порід, що випускаються серійно та можуть бути використані у залізрудних кар'єрах. Уточнено коефіцієнти пропорційності відомих емпіричних формул для наближеного попереднього розрахунку основних параметрів екскаваторів з урахуванням критеріїв якості. Визначено шляхи підвищення якості екскаваторів на основі запропонованих критеріїв. Встановлено, що екскаватор буде тим ефективніший, чим він матиме більшу продуктивність при розробці найбільш важких, з точки зору екскавації порід, меншу тривалість циклу екскавації за рахунок зменшення кута повороту платформи. Тобто розташування транспортних засобів ближче до забою та зменшення тривалості зачерпування, також потрібно зменшувати власну масу екскаватору, збільшувати найбільшу висоту копання та найбільший радіус копання.

Ключові слова: кар'єрний екскаватор, робоче обладнання, процес зачерпування, розрахункові залежності, функційний критерій.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-132-138

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Кар'єрні механічні екскаватори типу пряма лопата залишаються основним виїмково-навантажувальним обладнанням на сучасних залізрудних кар'єрах попри широке запровадження потужних гідравлічних машин.

Визначальними параметрами, що характеризують умови роботи екскаваторів у забої, є стан, вид та розпушення підірваної скельної породи у забої, які є варійованими у межах бортів і уступів. Тому визначення основних параметрів на попередньому етапі проектування або модифікації екскаваторів є досить наближеним і ведеться за емпіричними формулами, які розроблені на основі існуючого парку машин, що випускаються серійно. Подібний підхід дозволяє швидко і достатньо просто визначити шукані параметри проекрованої машини, але вимагає постійного корегування наближених залежностей, до того ж потребує врахування функціональних критеріїв якості проєктованих екскаваторів задля підвищення ефективності нових машин.

Аналіз досліджень і публікацій. Механічні екскаватори типу пряма лопата є ефективним і широко застосовуваним виїмково-транспортуючим обладнанням для проведення екскавації попередньо розпушеної гірничої маси. Навіть при появі нових високо потужних гідравлічних екскаваторів, механічні моделі не втратили свої позиції за рахунок суттєвого недоліку сучасних гідравлічних екскаваторів - значного зростання експлуатаційних витрат, що, відповідно, істотно знижує економічний ефект від їх застосування вже через 6-7 років роботи цих машин [8].

Попереднє визначення параметрів проектованого екскаватора проводять виходячи з рекомендації і емпіричних залежностей, розроблених раніше, що у 60-ті роки. В основному ці залежності виведені із закону подібності або є результатом перекладання на математичну мову тих напрацювань в частині конструювання та експлуатації екскаваторів, які були накопичені у самому конструкторському бюро або відділі [10].

Відомі роботи [1, 8, 11, 12] містять декілька варіантів емпіричних залежностей для попереднього визначення основних параметрів екскаваторів, що ґрунтуються на характеристиках відомих моделей екскаваторів.

Слід виокремити роботу [10], у якій наведено докладний аналіз відомих підходів до попереднього розрахунку основних параметрів екскаваторів та запропоновано два підходи до формування залежностей з визначення лінійних параметрів робочого обладнання екскаваторів на основі коефіцієнтів, що оцінюють функціональні параметри машини. Перша залежність має вид

$$\text{Параметр} = \text{Коефіцієнт пропорційності} \times \text{Базовий параметр.}$$

Друга залежність має вид

$$\text{Параметр} = \text{Коефіцієнт пропорційності} \times \text{Базовий параметр}^{\text{коефіцієнт ступеня}}.$$

У якості базового параметру автори рекомендують використовувати ємність ковша або вагу екскаватору.

До того ж автори [10] вказують і на суттєвий недолік таких спрощених емпіричних залежностей, не зважаючи на їх розповсюдженість, який полягає у тому, що для визначення актуальних параметрів машини, самі залежності потребують постійного уточнення при випуску нових удосконалених та модифікованих моделей екскаваторів.

Як показав аналіз залежностей з джерел [4, 8, 10, 11,12], найкращою функцією апроксимації параметрів екскаваторів є залежність виду

$$\text{Параметр}(E_K) = a \times E_K^b, \quad (1)$$

де E_K – ємність ковша; a, b – коефіцієнти пропорційності.

Важливим питанням є визначення продуктивності кар'єрних екскаваторів, особливо експлуатаційної. Автори у своїй роботі [9] наводять результати аналізу з визначення експлуатаційної продуктивності кар'єрних екскаваторів, у яких зазначено, що для точного її визначення необхідним є урахування якості підготовки гірської маси і визначенням технологічних параметрів процесу екскавації, кінематичний і динамічний аналіз механізмів робочого обладнання, аналіз взаємозв'язків між режимом роботи головних механізмів (підйому і напору) та технологічними параметрами.

Слід також відзначити необхідність відповідності розрахованих параметрів функціональним критеріям якості, що наведені та проаналізовані у роботі [1]. Автори визначили основні показники, що характеризують процес екскавації гірської маси кар'єрним одноківшевим екскаватором, а саме потужність приводу, місткість ковша, маса екскаватора, питома зусилля копання, тривалість робочого циклу, строк експлуатації, найбільша висота та найбільший радіус копання.

На базі цих показників автори [1] визначили 5 функціональних критеріїв якості, що визначають технічний рівень кар'єрних одноківшових екскаваторів, а саме встановлений ресурс екскаватору, питома найбільша висота копання, питома найбільший радіус черпання, питома зусилля копання екскаватора, питома енергоємність, питома металоємність екскаватора.

Постановка задачі. Оскільки на сьогодні розроблено механічні екскаватори типу пряма лопата місткістю ковша до 30 м^3 , тому виникає нагальна потреба в уточненні відомих емпіричних формул для наближеного попереднього розрахунку основних параметрів екскаваторів з урахуванням критеріїв якості.

Викладення матеріалу та результати. На першому етапі проаналізуємо парк сучасних механічних кар'єрних екскаваторів типу пряма лопата, що випускаються серійно та можуть бути використані у залізничних кар'єрах.

На сьогодні серійно випускаються наступні базові та модифіковані моделі кар'єрних механічних лопат ЕКГ-4У, ЕКГ-4Ус, ЕКГ-5А, ЕКГ-5Д, ЕКГ-5У, ЕКГ-6,3У, ЕКГ-6,3Ус, ЕКГ-8І, ЕКГ-8У, ЕКГ-8Ус, ЕКГ-10, ЕКГ-12, ЕКГ-12У, ЕКГ-12Ус, ЕКГ-12,5, ЕКГ-15, ЕКГ-8,3, ЕКГ-17, ЕКГ-20А, ЕКГ-20, ЕКГ-30 з місткістю від 4 до 30 м^3 для розробки м'яких, щільних і підірваних скельних порід [2, 3, 5-8, 10]. Для уточнення емпіричних залежностей поміж наведених моделей виокремимо базові ЕКГ-5А, ЕКГ-8І, ЕКГ-10, ЕКГ-12, ЕКГ-12,5, ЕКГ-15, ЕКГ-20, ЕКГ-30.

Основним параметром, що визначає конструкційні параметри екскаватора прийнято вважати ємність ковша $E_K, \text{ м}^3$, яка за наведеним вище типорозмірним рядом базових моделей екскаваторів має наступний параметричний ряд: 4, 5, 8, 10, 12, 12,5, 15, 17, 20, 30.

Використовуючи залежності, наведені у роботах [8, 10, 11, 12,15], та порівнюючи технічні характеристики базових моделей екскаваторів [2, 3, 8, 10, 12, 14,16], визначено коефіцієнти пропорційності (табл.1) для нових залежностей виду (1).

Окремо розглянемо тривалість робочого циклу і хід рукояті екскаватора.

Згідно [8, 10] тривалість робочого циклу при куті повороту платформи екскаватора, що дорівнює 90° становить, с

$$t_u = 21,94 + 0,01 \times m_e, \quad (2)$$

де m_e - маса екскаватора, т.

З іншого боку, згідно [8], тривалість робочого циклу при куті повороту платформи екскаватора може визначатися так, с

$$t_u = \frac{67 \times d_{CP.P}^2}{E_K} + \frac{E_K}{0,11 \times E_K + 0,6} + 2 \times 0,5 \times \sqrt{\frac{b_{II}^2 \times \sqrt{(35 \times E_K + 0,42 \times E_K^2)^2}}{E_K}} + 3, \quad (3)$$

де $d_{CP,P}$ - середня шматковатість підірваної гірської маси, см; b_{Π} - кут повороту платформи екскаватора при робочому циклі, рад.

У той же час, згідно [13], час повороту екскаватора до місця розвантаження або до забою визначається так, с

$$t_{\Pi} = \frac{67 \times d_{CP,P}^2}{E_K} + \frac{E_K}{0,11 \times E_K + 0,6} + 2 \times 0,5 \times \sqrt[3]{\frac{b_{\Pi}^2 \times (35 \times E_K + 0,42 \times E_K^2)^{1,67}}{E_K}} + 3. \quad (4)$$

Таблиця 1

Встановлені залежності виду $\Pi = a \times E_K^b$

Параметр	Позн.	Од.вим.	a	b
Маса екскаватора	m_E	т	46,5	1
Маса ковша	m_K	т	1,84	1
Ширина ковша	b_K	м	0,7	0,68
Довжина ковша	w_K	м	1,28	0,38
Висота ковша	h_K	м	1,07	0,53
Радіус черпання	$R_{q_{max}}$	м	10,6	0,27
Максимальна висота розвантаження	$H_{P_{max}}$	м	5,8	0,2
Довжина стріли	L_C	м	8,6	0,25
Максимальна висота черпання	$H_{q_{max}}$	м	7,7	0,265
Висота напірного валу (висота забою)	H_q	м	5	0,285
Довжина рукояті	L_P	м	6,65	0,245
Висота п'яти стріли	$H_{\Pi C}$	м	3	0,18
Відстань від осі п'яти до осі обертання екскаватора	T	м	1,3	0,31
Потужність мережевого двигуна	N_{MD}	кВт	19	1,51
Діаметр головних блоків екскаватора	$D_{ГБ}$	м	0,59	0,42
Швидкість підйому ковша	$u_{\Pi L}$	м/с	0,69	0,16
Швидкість напору	u_{HL}	м/с	0,43	0,14

Порівняння реальної та тривалості циклу, визначеною за залежностями (2 - 4), наведено на рис.1, з якого видно з рис. 1, найкраще реальним параметрам відповідає залежність за формулою (4), що досить точно описує тривалість робочого циклу.

Хід рукояті екскаватора визначається з урахуванням геометрії робочого обладнання екскаватора, м

$$DL_P = R_{q_{max}} - (T + 0,5 \times L_C \times \cos(g) + H_q), \quad (5)$$

де g - кут нахилу стріли.

Проведемо аналіз екскаваторів с точки зору функціональних критеріїв, наведених у роботі [1], що визначають рівень якості та ефективності тієї чи іншої моделі екскаватора, яка зводиться до 5 основних функціональних показників.

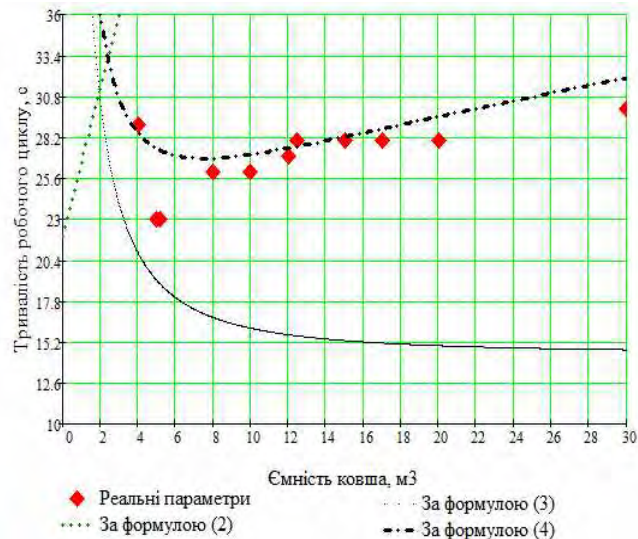
Як зазначає автор [1], у якості критеріїв беруться зворотні величини параметрів екскаваторів, зі зменшенням яких погіршується якість машини, тобто, чим якісніше машина, тим меншим повинно бути значення такого критерію.

Рис 1. Залежність тривалості робочого циклу від ємності ковша при $d_{CP,P} = 0,8$ м

Комплекс функціональних критеріїв якості екскаваторів, згідно [1]

$$\begin{cases} K_1 = N_{np} / (I \times \Pi); \\ K_2 = m_e / (I \times \Pi); \\ K_3 = \sqrt[3]{m_e} / (I \times H_{q_{max}}); \\ K_4 = \sqrt[3]{m_e} / (I \times R_{q_{max}}); \\ K_5 = E_K / (I \times P_{кон} \times H_{q_{max}}); \end{cases} \quad (6)$$

де $I = \Pi \times K_F$ - функціональний критерій оцінки якості, кВт [1]; Π - розрахунково-



теоретична продуктивність екскаватора, м³/год [4, 8, 10, 12]; K_F - питомий опір копанню, МПа [10]; $N_{пр}$ - потужність мережевого приводу, кВт; E_k - місткість ковша, м³; m_e - експлуатаційна маса екскаватора з робочим обладнанням, т; $R_{ч\max}$ - найбільший радіус копання, м; $H_{ч\max}$ - найбільша висота копання, м; $P_{кон}$ - максимальне зусилля при копанні, Н [8, 10, 12].

Залежності для визначення потужності мережевого приводу $N_{пр}$, експлуатаційної маси екскаватора з робочим обладнанням m_e , розрахункової тривалості циклу $t_{ц}$, найбільшого радіусу копання $R_{ч\max}$, найбільшої висоти копання $H_{ч\max}$ були розглянуті і уточнені вище (див. табл. 1).

Визначимо умови, за яких функціональні критерії якості набуватимуть мінімальних (найкращих) значень:

$$\begin{aligned} & K_1 \otimes \min; K_2 \otimes \min; K_3 \otimes \min; K_4 \otimes \min; K_5 \otimes \min; \\ & N_{пр} \otimes \min; l \otimes \max; П \otimes \max; K_F \otimes \max; E_k \otimes \max; \\ & t_{ц} \otimes \min; m_e \otimes \min; H_{ч\max} \otimes \max; R_{ч\max} \otimes \min; P_{кон} \otimes \max. \end{aligned}$$

Проаналізуємо ці вимоги. На початку виокремимо коефіцієнт K_F , який залежить не від параметрів екскаватора, а від властивостей гірської породи і входить до визначення першого функціонального критерію l . Перший функціональний критерій l можна збільшити, збільшивши продуктивність. Отже, екскаватор буде тим кращий, чим він матиме більшу продуктивність при розробці найбільш важких з точки зору екскавації порід.

Місткість ковша є головним параметром екскаватора, від якого залежать інші параметри. Вона визначається місткістю існуючих транспортних засобів (автосамоскидів, вагонів та ін.) або крупністю підірваної гірничої маси.

Тривалість циклу екскавації залежить від швидкості виконання технологічних операцій, таких як зачерпування, поворот і розвантаження. Остання операція є сталою практично для усіх конструкцій. У свою чергу швидкість зачерпування і повороту залежить від потужності приводів цих механізмів. Тривалість повороту екскаватора зменшувати дуже складно, оскільки поворотна платформа з навантаженим ковшем мають дуже велику інерцію, а, отже, зменшення можливе лише при зменшенні кута повороту платформи, тобто розташування транспортних засобів ближче до забою, що є технологічними особливостями відробітку уступу.

Збільшення потужності приводу механізму підйому і напору також може негативно вплинути на загальну споживану потужність екскаватору, що є не прийнятним, оскільки ці потужності, як було зазначено вище повинні зменшуватися. До того ж необхідно збільшувати максимальне зусилля підйому і напору. Таке збільшення зусиль без збільшення вживаної потужності електроприводів можливе при зменшенні власної ваги рукояті та ковша, вибору оптимальної довжини рукояті та розташування осі напірного валу. Для покращення значень критеріїв якості потрібно зменшувати власну масу екскаватору, збільшувати найбільшу висоту копання та найбільший радіус копання.

Отже робимо висновок, що найкращим шляхом покращення критеріїв якості екскаватора є мінімізація часу зачерпування шляхом збільшення швидкості руху рукояті і максимального зусилля на зубах ковша без збільшення потужності привода, зменшення власної маси екскаватору, збільшенні найбільшої висоти копання та найбільшого радіусу копання.

Аналізуючи значення функціональних критеріїв відомих базових конструкцій екскаваторів, наведені на рис 2, можна зробити наступні висновки. Згідно з розрахованими функціональними критеріями, найкращими є базові моделі екскаваторів з більшою місткістю ковша. Усі критерії, це підтверджують. Попри це, деякі моделі екскаваторів з меншою місткістю ковша демонструють добрі показники якості. Наприклад, екскаватор ЕКГ-12,5 має добрий показник енергоємності, екскаватори ЕКГ-10 та ЕКГ-17 мають добрі показники металоємності, ніж сусідні моделі з більшою місткістю ковша.

Додатково розраховано функціональні критерії якості екскаваторів на основі параметрів, що визначені за пропонуваними залежностями (див табл.1). Встановлено, що майже в усіх випадках критерії на основі параметрів, розрахованих за пропонуваними уточненими залежностями, є такими ж або навіть кращими за критерії на основі реальних параметрів базових моделей екскаваторів.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Уточнено методику попереднього розрахунку основних параметрів екскаваторів на основі емпіричних ступеневих залежностей виду

$P=a\mathcal{E}_K^b$ за допомогою аналізу параметрів розширеного модельного ряду екскаваторів з місткістю ковша від 4 м³ до 30 м³, що випускаються серійно.

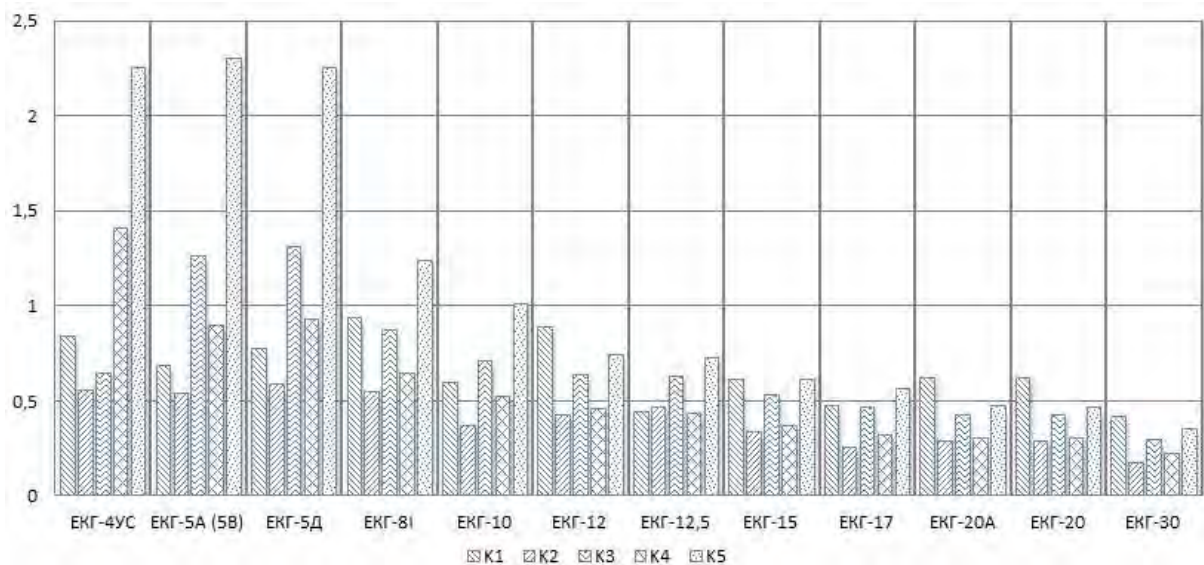


Рис 2. Функціональні критерії базових моделей екскаваторів

Встановлено, що з точки зору функціональних критеріїв якості, екскаватор буде тим ефективніший, чим він матиме більшу продуктивність при розробці найбільш важких з точки зору екскавації порід, меншу тривалість циклу екскавації за рахунок зменшення кута повороту платформи. Тобто необхідне розташування транспортних засобів ближче до забою та зменшення тривалості зачерпування. До того ж потрібно зменшувати власну масу екскаватору, збільшувати найбільшу висоту копання та найбільший радіус копання.

Встановлено, що з точки зору функціональних критеріїв якості, найкращими є базові моделі екскаваторів з більшою ємністю ковша. Попри це деякі моделі екскаваторів з меншою місткістю ковша демонструють добрі показники якості. Наприклад, екскаватор ЕКГ-12,5 має добрий показник енергоємності, екскаватори ЕКГ-10 та ЕКГ-17 мають добрі показники металоємності, ніж сусідні моделі з більшою місткістю ковша. Проведено порівняння функціональних критеріїв якості екскаваторів визначених на основі реальних параметрів та критеріїв, що визначені на основі уточнених залежностей та встановлено, що пропонувані залежності у переважній більшості випадків дозволяють визначити параметри екскаваторів, як свідчать визначені критерії якості, які забезпечують більшу ефективність розроблюваних машин.

Список літератури

1. Воронов Ю.Е., Зыков П.А. Обоснование и определение показателей технического уровня карьерных одноковшовых экскаваторов // Вестник Кузбасского гос. тех. унив., 2011.- №2.- С.67-70
2. Громадский А.С. Снижение динамических нагрузок карьерных экскаваторов: монография. - Кривой Рог : ИЦ КТУ, 2008. - 281 с.
3. Громадский А.С. Снижение динамических нагрузок карьерных экскаваторов. 2-е изд., перераб. и уточн. – Саарбрюккен : LAP LAMBERT Academic Publishing, 2013. – 295 с.
4. Дроздова Л.Г., Курбатова О.А. Одноковшовые экскаваторы: конструкция, монтаж и ремонт: учеб. пособие.- Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007.-235 с.
5. Ефимов В.Н., Цветков В.Н., Садовников Е.М. Карьерные экскаваторы. Справочник рабочего. — Москва: Недра, 1994. — 381 с
6. Замышляев В.Ф., Рисухин В.И., Шешко Е.Е. Эксплуатация и ремонт карьерного оборудования. Учеб. пособие для вузов. — М.: Недра, 1991. — 285 с.
7. Кантович Л.И., Гетопанов В.Н. Горные машины.-Москва: Недра, 1989. — 304 с.
8. Квагинидзе В.С., Козовой Г.И., Чакветадзе Ф.А., Антонов Ю.А., Корецкий В.Б. Экскаваторы на карьерах. Конструкции, эксплуатация, расчет: Учебное пособие. — М.: Издательство «Горная книга», 2011. —409 с.
9. Комиссаров А. П., Лагунова Ю. А., Файзуллин Р. Т., Шестаков В. С. Оценка эксплуатационной производительности карьерного экскаватора // Известия Уральского государственного горного университета № 4(36), 2014.- С.29-32

10. **Маковеев А.В.** Обоснование параметров карьерных экскаваторов в зависимости от условий эксплуатации. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. Наук.- Екатеринбург: ГОУ ВПО «Уральский государственный горный университет», 2008.-19с

11. **Подэрни Р.Ю.** Горные машины и комплексы для открытых горных работ: Учебник для вузов - 2-е изд., перераб. и доп.- м.:Недра, 1985.- 544 с.

12. **Подэрни Р.Ю.** Механическое оборудование карьеров: Учебник для вузов.-6-е изд., перераб. и доп.-М.: Изд-во МГГУ, 2007.-680 с.

13. **Ташкинов А.С., Сысоев А.А., Ташкинов И.А.** Сравнительная оценка производительности и карьерных экскаваторов при разработке взорванных пород // Вестн. КузГТУ. — 2009. — № 4 С.17-20.

14. **Хмызников К.П., Лыков Ю.В.** Механическое оборудование карьеров. Одноковшовые экскаваторы. Учебное пособие. — СПб.: СПГГИ, 2007. — 41с

15. **Шемякин С. А., Лещинский А. В.** Расчет землеройных машин : учеб. пособие. - Хабаровск : Изд-во тихоокеан. гос. ун-та, 2014.- 55 с.

16. **Штейнцайг В.М.** Интенсификация открытых горных работ с применением мощных карьерных одноковшовых экскаваторов. Научное издание. -М.: Наука,1990.-142с

Рукопис подано до редакції 13.05.2020

УДК 628.147.23:622.453

А.О. ГУРІН, д-р техн. наук, проф., В.А. ШАПОВАЛОВ, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

СПОСІБ ОЧИСТКИ ВІДКЛАДЕНЬ НА СТІНКАХ ПОВІТРОПРОВОДІВ

Мета. Метою даної роботи є підвищення надійності та ефективності роботи систем аспірації та вентиляції шляхом очистки відкладень на стінках повітропроводів. Повітропровідні системи є невід'ємною частиною інфраструктури підприємств різних галузей, які мають розвинену мережу трубопроводів систем аспірації і вентиляції. Умови забезпечення надійної та ефективної роботи цих систем визначається, переважно, станом їх внутрішніх поверхонь трубопроводів і устаткування. Процеси корозії і утворення відкладень на внутрішніх поверхнях трубопроводів незворотні і часто призводять до порушення технологічного процесу і параметрів роботи обладнання, а в окремих випадках – до обриву повітропроводу та його падіння на обладнання або людей. Навіть найдосконаліші початкові технічні характеристики обладнання систем аспірації або вентиляції вказують лише на технічні можливості роботи системи. Надійна та ефективна робота систем аспірації і вентиляції може бути забезпечена після впровадження способу очистки відкладень на стінках повітропроводів, за допомогою якого легкого і швидкого очищуються поверхні і усуваються причини порушення параметрів роботи цих систем.

Методи дослідження. Під час вивчення, систематизації та узагальнення способів очистки трубопроводів використано аналіз досліджень і публікацій, аналіз вітчизняного і закордонного досвіду, цільове натурне обстеження повітропроводів систем аспірації та вентиляції, проведені експериментальні дослідження.

Наукова новизна. Експериментально доведена можливість застосування ударних повітряних хвиль, утворених електричними розрядами від джерел високовольтної напруги, для руйнування і відділення іржі та відкладень від стінок повітропроводів.

Практична значимість. Використання запропонованого способу очистки відкладень на стінках повітропроводів підвищує надійність і ефективність роботи систем аспірації та вентиляції в різних промислових галузях, а також збільшує технологічні можливості, оскільки дозволяє проводити очищення трубопроводів складної конфігурації.

Результати. Знайдено рішення поширеної проблеми сучасного промислового виробництва і запропоновано спосіб очистки відкладень на стінках повітропроводів систем аспірації і вентиляції.

Ключові слова: трубопроводи, корозія, відкладення, очистка.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-138-142

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Характерною особливістю технологічних процесів сучасних промислових виробництв є наявність значної кількості апаратів, ємностей, бункерів, трубопроводів та іншого обладнання, працездатність якого визначається станом внутрішніх поверхонь. В процесі експлуатації устаткування і трубопроводів, відбувається неминуче забруднення їх внутрішніх поверхонь відкладеннями.

Більшість промислового устаткування і трубопроводів виготовлені з металу. Основною причиною пошкодження внутрішніх поверхонь, в більшості випадків, є відкладення і корозія (корозійне та ерозійне зношення), стійкість до яких і визначає терміни їх експлуатації.

Збитки, від пошкодження внутрішніх поверхонь, пов'язані не тільки з технологічними втратами, але і виходом з ладу трубопроводів і устаткування, оскільки порушується їх міцність, герметичність, що може призвести до аварій.

Видів корозії безліч, а причини корозії завжди визначаються властивостями корозійно-небезпечного середовища, з яким контактують внутрішні поверхні устаткування і трубопроводів [1, 2]. Корозія внутрішньої поверхні трубопроводів має місце в основному при транспортуванні середовищ, які містять корозійно-небезпечні речовини: солі, кислоти, луги тощо. Особливо агресивні сірчаний і сірчистий ангідриди, хлор, хлористий водень, оксиди азоту, фтористі з'єднання і аерозолі. Дуже активний сірчаний ангідрид, який утворює з парами води аерозоль сірчаної кислоти. Сірководень під впливом кисню окислюється в сірчаний ангідрид. Двоокис азоту з парами води утворює азотну і азотисту кислоти. Хлор взаємодіючи з вологою у повітрі утворює хлорну воду, стимулюючи процеси корозії, а хлористий водень - розбавлену соляну кислоту, інтенсифікує корозійні руйнування.

Корозійний вплив на металеві поверхні здійснюють не тільки волога і гази, що містяться в агресивному середовищі. Значно підвищують корозійну активність забруднення поверхонь у вигляді відкладень [3-5]. Водорозчинні забруднення технологічного характеру збільшують електропровідність плівок води, посилюючи корозійні процеси так само, як і малорозчинні відкладення, у вигляді окалини чи пилу. При корозії на поверхні утворюються нові речовини (продукти корозії), що включають оксиди і солі металу, який піддається корозії. Видимі продукти атмосферної корозії складаються в основному з гідратованих оксидів заліза і називають іржею, продукти газової корозії – окалиною.

Відкладення на поверхні дрібнодисперсного пилу можуть стати центрами конденсації вологи з повітря на поверхні металу. Тверді частки пилу стимулюють на поверхні утворення капілярної вологи. Цей процес сприяє зростанню сил адгезії і кількості осілого пилу у вигляді відкладень. Найбільшу корозійну небезпеку становлять частки, що мають високу гігроскопічність, при розчиненні яких утворюються агресивні рідики середовища (NaCl та ін.).

Корозія і відкладення на внутрішніх поверхнях трубопроводів та устаткування, порушують чистоту стінок, звужують прохідний переріз, змінюють аеродинамічні параметри роботи, ефективність теплопередачі, масообмінні характеристики технологічних процесів тощо. В окремих випадках, відкладення та забруднення на стінках технологічного обладнання і трубопроводів порушують технологічний режим, знижують продуктивність процесу, аж до повної зупинки виробництва. Для небезпечних виробничих об'єктів, де технологічними трубопроводами транспортується агресивні середовища, безпека технологічних процесів та обслуговуючого персоналу може залежати, в тому числі, від технічного стану трубопроводів, які виявляються непридатними через відкладення та ушкодження внутрішніх поверхонь, спричинених корозією [6].

Вирішення цієї проблеми актуальне для виробництв нафтопереробної, хімічної, будівельної галузі, а також для підприємств харчової промисловості тощо [7]. Слід підкреслити актуальність цієї проблеми для гірничо-збагачувальних виробництв і підприємств металургійної галузі, які мають розвинену мережу трубопроводів систем аспірації і вентиляції [8]. Повітроводи систем аспірації і вентиляції мають широке промислове застосування: їх можна зустріти на зернопереробних підприємствах і елеваторах, на деревообробних комбінатах та інших великих промислових об'єктах. Ефективність роботи цих систем безпосередньо пов'язана з чистотою внутрішніх поверхонь трубопроводів. Майже всі повітропроводи систем аспірації і вентиляції з терміном експлуатації більше 5-10 років мають відкладення на внутрішніх поверхнях трубопроводів.

Видалення пилу від дробильних установок, перевантажувальних вузлів гірничої маси, заборів гірничих виробок тощо, здійснюється по трубопроводам, внутрішня поверхня яких іржавіє і покривається пилом. Упродовж тривалої експлуатації трубопроводів товщина шару налиплого пилу сягає десятків міліметрів, через що зменшується площа перерізу трубопроводів, змінюються аеродинамічні параметри повітряного потоку, трубопроводи деформуються і, навіть, пошкоджуються. Для окремих ділянок систем аспірації (горизонтальні ділянки, відводи, переходи тощо) заповнення поперечного перерізу пилом може сягати 90 % [4, 5, 8], що може призвести до порушення аеродинамічної характеристики системи, збільшення навантаження на вентиляційне обладнання, а в окремих випадках – до обриву повітропроводу та його падіння на обладнання або людей.

Відкладення та забруднення на внутрішніх поверхнях трубопроводів може призвести до поступового порушення технологічного процесу, поступової відмови, погіршення якісних і кількісних показників роботи систем аспірації і вентиляції.

Так як процеси корозії і утворення відкладень на внутрішніх поверхнях трубопроводів незворотні і часто призводять до порушення технологічного процесу і параметрів роботи обладнання, то очистка відкладень на стінках трубопроводів є однією з важливих невирішених проблем сучасного промислового виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відомі хімічні, ультразвукові, механічні способи очистки трубопроводів [9,10], які показують хороші результати очистки відкладень на стінках трубопроводів. Разом з цим, відомі способи очистки дуже витратні, не обходяться без закупівлі коштовних і небезпечних для навколишнього середовища хімічних реагентів, процеси трудомісткі і потребують участі кваліфікованих спеціалістів. Деякі методи відрізняються вибірковістю по відношенню до різних видів відкладень, тобто якийсь шлам видаляється, якийсь залишається. Інші методи очистки здатні механічно пошкоджувати поверхні, особливо у старих трубопроводах систем з тривалим терміном експлуатації, або мають низьку ефективність при видаленні твердих кристалічних відкладень.

Деякі способи хімічної очистки передбачають застосування сильних мінеральних і органічних кислот та інших з'єднань. Їх застосування забезпечує досить ефективну очистку від солевих відкладень, однак нерідко ці методи мають і свої суттєві недоліки: пошкоджується поверхня матеріалів, в результаті чого після декількох хімічних чисток їх доводиться міняти; відпрацьовані технологічні розчини необхідно нейтралізувати або знешкоджувати до кондицій, дозволених до скидання в каналізацію; при впровадженні багатьох хімічних методів очищення, як вітчизняних, так і зарубіжних, доводиться використовувати дуже великий об'єм реагентів (десятки і навіть сотні кілограмів), що призводило до того, що від застосування цих способів відмовлялися навіть на тих підприємствах, де вони застосовувалися протягом тривалого періоду часу.

Відомий спосіб очистки відкладень на стінках трубопроводів, який відрізняється тим, що всередині трубопроводу розташовують змонтовані на рамі співвісні електроди з полу сферичним відбивачем і поплавком. Подачею високої напруги між електродами створюють електричний розряд, який утворює електрогідралічний удар. Відбивач фокусує на поверхню трубопроводу електрогідралічний удар, який переміщає раму всередині трубопроводу [11].

Однак технологічні можливості такого способу для очистки повітропроводів обмежені, оскільки очистка відкладень на стінках, передбачається в заповнених рідким середовищем трубопроводах. Крім того, очищення протяжних повітропроводів системи витяжної вентиляції малоєфективна, через те, що неможливо переміщати раму з електродами і відбивачем у повздовжньому напрямку всередині трубопроводу по поверхні з твердими відкладеннями і нерівностями.

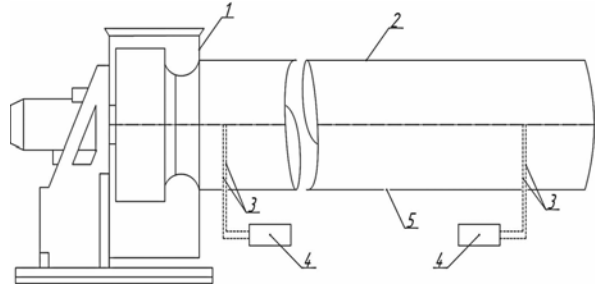
Відомий також спосіб очистки відкладень на стінках трубопроводів за допомогою пневмопушки [10], яка утворює імпульс стисненого повітря (азоту), яким очищає відкладення на стінках трубопроводів. Цей спосіб також проблематичний для очистки повітропроводів значного діаметра і протяжності, через значні витрати стисненого повітря.

Також відомий спосіб очистки відкладень на стінках трубопроводів за допомогою електромагнітного удару по поверхні трубопроводів [12], який спричиняє коливання металевих стінок і відшарування відкладень на них. Однак, застосовувати цей спосіб для очистки відкладень на стінках повітропроводів систем аспірації або вентиляції неможливо, оскільки їх трубопроводи виготовляють з жерсті товщиною близько 1 мм, через що вони швидко руйнуються від удару.

Постановка завдання. Повітропровідні системи є невід'ємною частиною інфраструктури підприємств різних галузей, які мають розвинену мережу трубопроводів систем аспірації і вентиляції. Умови забезпечення надійної та ефективної роботи цих систем визначається, переважно, станом їх внутрішніх поверхонь трубопроводів і устаткування. Навіть найдосконаліші початкові технічні характеристики обладнання систем аспірації або вентиляції вказують лише на технічні можливості роботи системи. Надійна та ефективна робота систем аспірації і вентиляції може бути забезпечена після впровадження способу очистки відкладень на стінках трубопроводів, за допомогою якого легкого і швидко очищуються поверхні і усуваються причини порушення параметрів роботи цих систем.

Викладення матеріалу та результати. Запропонований спосіб очистки відкладень на стінках трубопроводів реалізується наступним чином [13]. Всередині повітропроводу розміщують електроди, на які подається високовольтна напруга для утворення електричного розряду, яким забезпечується руйнування і очистка відкладень, які видаляються потоком повітря. Подачу високовольтної напруги виконують по черзі, починаючи з електродів, встановлених на тому кінці трубопроводу, через який видаляються відкладення (рис. 1).

Рис. 1. Схема очистки відкладень на стінках повітропроводу: 1 – вентилятор; 2 – трубопровід; 3 – електроди; 4 – джерело високовольтної напруги; 5 – отвори



Установка складається з вентилятора 1, приєднаного до трубопроводу 2 системи аспірації або вентиляції, електроди 3, які вставляються через отвори 5 всередину трубопроводу 2, і джерело високовольтної напруги 4, до якого підключаються електроди.

У міру засмічення трубопроводу джерело високовольтної напруги 4 по черзі підключають до електродів 3, подаючи на них високу напругу. Між електродами 3 виникає електричний розряд, який утворює ударну повітряну хвилю, яка поширюється по трубопроводу 2 в протилежних напрямках. Діючи на шар пилу, ударна повітряна хвиля викликає в ньому хвилю напруги і відбиту хвилю, які руйнують зв'язки злежаного пилу, дроблять його й відривають від стінок трубопроводу 2. Повітряний потік, створюваний вентилятором 1, здимає пил у зважений стан і видаляє з трубопроводу 2.

Проміжок між електродами залежить від інтенсивності ударної повітряної хвилі, фізико-механічних властивостей пилу (іржі), діаметра трубопроводу тощо, і може бути встановлений експериментальним шляхом після першого розряду і обстеження стану внутрішньої поверхні трубопроводу.

Експериментальні дослідження запропонованого способу очистки було проведено на трубопроводі діаметром 2 дюйма (≈ 51 мм) і довжиною 2,5 м із шаром іржі у 2-3 мм на стінках трубопроводу. В середині трубопроводу було розташовано електроди. В якості джерела високовольтної напруги було використано дефібрилятор імпульсний ДИ-03. Апарат генерує імпульс струму, який має форму затухаючого коливального розряду. Амплітуда струму при напрузі заряду дефібрилятора 7000 В знаходиться в межах від 30 до 50 А. Елементи розрядного ланцюга мають параметри, зазначені в табл. 1.

Апарат працює від мережі змінного струму частотою ($50 \pm 0,5$) Гц з номінальною напругою 220 В при відхиленні напруги в мережі на $\pm 10\%$ від номінального значення.

Дослідження внутрішньої поверхні після двох розрядів показали, що трубопровід повністю очищено від іржі, яку було винесено з порожнини ударною повітряною хвилею.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Експериментально доведена можливість застосування ударних повітряних хвиль, утворених електричними розрядами від джерел високовольтної напруги, для руйнування і відділення іржі та відкладень від стінок повітропроводів. Знайдено рішення поширеної проблеми сучасного промислового виробництва і запропоновано спосіб очистки відкладень на стінках повітропроводів систем аспірації і вентиляції. Використання запропонованого способу очистки відкладень на стінках повітропроводів підвищує надійність і ефективність роботи систем аспірації та вентиляції в різних промислових галузях, а також збільшує технологічні можливості, оскільки дозволяє проводити очищення трубопроводів складної конфігурації.

Таблиця 1

Параметри елементів розрядного ланцюга

Назва параметру	Величина
Індуктивність котушки	$(0,11 \pm 0,011)$ Гн
Активний опір котушки	$(12 \pm 2,4)$ Ом
Ємність конденсатора	$(16 \pm 1,6)$ мкФ

Список літератури

1. Коррозия и защита металлов. В 2 ч. Ч. 1. Методы исследований коррозионных процессов: [учебно-методическое пособие] / Н.Г. Россина, Н.А. Попов, М.А. Жилиякова, А.В. Корелин. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. – 108 с.
2. Исаев М.И. Теория коррозионных процессов / Исаев М.И. – М.: Металлургия, 1997. – 344 с.
3. Karolina Vyhliadalova Dust analyses in ventilation ducts / Karolina Vyhliadalova, Petr Vlček1, Olga Rubinová, Jiří Bernard // Journal of Sustainable Construction Materials and Technologies. – 2016. – 1(1). 29-35.
4. Обстеження систем аспірації та вентиляції ЦВО-1, ЦВО-2 та розробка рекомендацій по підвищенню ефективності їх роботи для зниження викидів забруднюючих речовин в атмосферу та запиленості на робочих місцях: Отчет о НИР / Криворожский технический университет: №ГР 0106U008416. – Кривой Рог, 2006. – 130 с.
5. Деньгуб Т.В. Исследование аэродинамического сопротивления аспирационных воздуховодов при пылевых отложениях / Т.В. Деньгуб, Н.В. Худик // Металлургическая и горнорудная промышленность. – Днепропетровск, 2014. – № 4. – С. 115-117.
6. Основные аспекты оценки технического состояния технологических трубопроводов / Р.А. Шайбаков, Д.Г. Давыдова, А.В. Жуков [и др.] // Нефтегазовое дело: электронный научный журнал. – 2013. – №4. – С. 258 – 270.
7. Гапонюк О.И. Проблемы функционирования аспирационных установок и пути их совершенствования / О.И. Гапонюк, А.А. Гончарук, А.П. Лапин // Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса: 2014. – Вип. 46. – Том 1. – С.201-204.
8. Обеспечение эффективных рабочих режимов аспирационных систем фабрик окомкования ГОКов в условиях длительной эксплуатации / А.М. Голышев, С.И. Задорожний, А.В. Герасимчук, А.А. Голышев // Разработка рудных месторождений. – Кривий Ріг. – 2007. – Вип. 91. – С. 232-236.
9. СТП 0910.37.409.09 Стандарт ГПО «Белэнерго». Проведение механических и химических очисток теплообменников. – Минск: РУП «БелТЭИ», 2009.
10. Мараховский А.В. Методика очистки внутренних отложений трубопроводов и оборудования с применением пневмоудара. ООО «Астра сервис». / А.В. Мараховский, Е.О. Савельева. – М: Московский педагогический университет, 2015.
11. А. с. 625782 СССР, МКИ В 08 В 7/00, Е 03 F 9/00. Устройство для очистки внутренней поверхности трубопроводов от отложений / В.П. Губина, Н.В. Губина (СССР). – № 2117098/22-02; заявл. 25.03.75; опубл. 30.09.78, Бюл. № 36.
12. Кузьменко Н.В. Применение эффекта электромагнитного удара для стабилизации работы электролизера / Н.В. Кузьменко, М.М. Маловичко // Технические средства и системы управления производственными процессами: межвузовский сборник. – Братск, 1991. – С. 15-18.
13. А. с. 1125074 СССР, МКИ В 08 J 7/00. Способ очистки трубопроводов от невзрывчатых отложений / А.А. Гурин, В.П. Исаев, А.Е. Лапшин, В.И. Базаря (СССР). – № 3547110/28-12; заявл. 21.01.83; опубл. 23.11.84, Бюл. № 43.

Рукопис подано до редакції 13.05.2020

УДК 624.012.45

О.І. ВАЛОВОЙ¹, канд.техн.наук, проф., В.І. АСТАХОВ, В.В. АФАНАСЬЄВ,
М.О. ВАЛОВОЙ, О.Ю. ЄРЕМЕНКО, кандидати техн. наук, доценти
Криворізький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ ГІРНИЧОРУДНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ У ПРОМИСЛОВОМУ, ЦИВІЛЬНОМУ ТА ТРАНСПОРТНОМУ БУДІВНИЦТВІ

Мета. На сьогодні в Україні промисловими відходами відчувається до 5 тис. га земельних ділянок. Це є серйозною небезпекою для екологічного стану регіонів України і особливо Кривбасу. Відходи збагачених залізних руд займають перше місце серед відходів гірничодобувної промисловості і їх обсяг зі збільшенням видобутку корисних копалин буде зростати. У роботі висвітлено інформацію по дослідженню відходів гірничорудної промисловості Кривбасу і подальшому їх використанню в промисловому цивільному та транспортному будівництві.

Методи дослідження. При збагаченні залізистих кварцитів методом мокрої магнітної сепарації виділяється велика кількість дрібнодисперсних відходів. Вони являють собою суспензію твердих частинок у воді і підрозділяються на відходи поточного виходу, які після збагачення руди не викинуті в відстійники, і хвости, що направляються гідротранспортом в сховища, де відбувається осадження твердих частинок. Для більш ефективного використання хвостів збагачення залізної руди їх фракціонують. Технологічна схема збагачення відходів зі хвостосховищ передбачає як перспективне обладнання так і те, що серійно випускається промисловістю.

Наукова новизна. Перспективним є обладнання з ударно-балістичною технологією, що розроблена на будівельному факультеті КНУ.

¹ О. Валовой О.І., Астахов В.І., Афанасьев В.В., Валовой М.О., Єременко О.Ю., 2020

Практична значимість. За підсумками аналізу досліджень основних фізико-механічних характеристик бетонів на дрібних відходах Г'ОК, можна відзначити, що стосовно міцності і деформативних властивостей, зазначені бетони не поступалися, а за деякими параметрами і перевершують традиційні бетони на кварцовому піску.

Напрацювання результатів дослідження бетонів на заповнювачах з відходів ГЗК були використані, як основа для всебічних досліджень роботи залізобетонних конструкцій, як при короткочасному так і тривалому дії навантаження.

Результати. В результаті досліджень бетону на відходах збагачення залізних руд виявлено ряд характерних особливостей фізико-механічних властивостей (підвищена міцність, знижена деформативність), які слід враховувати при розробці розрахункового апарату для залізобетонних конструкцій на зазначених бетонах.

Дослідження показує можливість широкого застосування відходів збагачення залізних руд для виготовлення звичайних і попередньо напружених залізобетонних конструкцій.

Ключові слова: відходи ГЗК, бетон, залізобетонні конструкції, випробування.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-142-147

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На сьогодні в Україні промисловими відходами відчується до 5 тис. га земельних ділянок. Щорічно додається тільки відходами збагачення залізних руд на 60-80 мільйонів тонн. На п'яти гірничо-збагачувальних комбінатах Кривбасу із загального обсягу видобутої гірничої маси у вигляді товарної сировини використовується лише 38%, інша йде у відвали. Загалом у відвалах і хвостосховищах цих комбінатів накопичилося понад 350 млн м³ мінеральних відходів. У середньому гірничо-збагачувальні комбінати Кривого Рогу щорічно складають у відвали 15-20 млн м³ безрудних кварцитів.

Сьогодні це є серйозною небезпекою для екологічного стану регіонів України й особливо Кривбасу. Тому проблеми використання промислових відходів вимагають невідкладного рішення.

За останні роки намітилася чітка тенденція до забезпечення підприємств будівельної індустрії матеріалами з відходів гірничорудної промисловості.

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.

Аналіз досліджень і публікацій. Питаннями використання хвостів збагачення мокрої магнітної сепарації як дрібних заповнювачів у бетонах займалися такі науковці: Бондаренко Г.Н., Стороженко Г.Т., Барашиков А.Я., Шевченко Б.Н., Валовой О.І.

Постановка задачі. Висвітлення інформації з дослідження відходів гірничорудної промисловості Кривбасу й подальшого їх використання в промисловому цивільному та транспортному будівництві.

Викладення матеріалу та результати. На всіх гірничо-збагачувальних комбінатах способи збагачення залізних руд принципово однакові. За допомогою магнітної сепарації з послідовно подрібнюваної залізної руди видаляється порода, залишаючи максимальний відсоток заліза. При збагаченні залістистих кварцитів методом мокрої магнітної сепарації виділяється велика кількість дрібнодисперсних відходів. Вони являють собою суспензію твердих частинок у воді й підрозділяються на відходи поточного виходу, які після збагачення руди не викинуто у відстійники, і хвости, що направляються гідротранспортом у сховища, де відбувається осадження твердих частинок.

На Криворіжжі видобуток і збагачення корисних руд здійснюються п'ятьма гірничо-збагачувальними комбінатами (Південним, Новокриворізьким, Північним, Центральним та Інгулецьким). Відходи поточного виходу на всіх ГЗК містять, здебільшого, однакову кількість зерен розміром 0,14 - 5 мм за рахунок однакового технологічного процесу. Гранулометричний склад хвостів мокрої магнітної сепарації змінюється в широких межах.

Відходи зі хвостосховищ більш грубозернисті за рахунок того, що в процесі накопичення дрібні та глинисті частинки води виносяться з відстійника, а великі – осідають у прибережній

частині сховища. Середня щільність хвостів зі хвостосховищ коливається в межах 1400-1750 кг/м³.

Петрографічне вивчення показало, що відходи гірничо-збагачувальних комбінатів представлені, здебільшого, кварцом та бідними зростками кварцу з гематитом, магнетитом і сидеритом із вкрапленням, в окремих випадках, вільних зерен магнетиту, гематиту та зростків рудних матеріалів. За хімічним складом ці відходи складні й неоднакові для різних гірничо-збагачувальних комбінатів.

Для більш ефективного використання хвостів збагачення залізної руди їх фракціонують. Необхідність фракціонування особливо відчувається при використанні хвостів як дрібного заповнювача бетонів відповідних конструкцій, де потрібна висока марка бетону й виключається перевитрата цементу. Можна фракціонувати як піски після першої стадії збагачення, так і хвости зі хвостосховищ. За першою методикою працює установка на Інгулецькому ГЗК. Виділення великої фракції відходів досягають на спеціальній установці за рахунок застосування сепараторів ПБМ-90/250, магнітних дешламаторів МД-5, гідроциклонів діаметром 360 мм і стрічкових вакуум-фільтрів Л-4.

Через примусове відділення грубозернистої фракції від пульпи та зневоднення кварцово-залізістий пісок за хімічним, гранулометричним складом та фізичними властивостями характеризується відносною сталістю. Він відповідає технічним вимогам РСН 201-84 і може бути застосований у будівельних розчинах і бетонах.

Технологічна схема збагачення відходів зі хвостосховищ передбачає як перспективне обладнання, так і те, що серійно випускається промисловістю. Перспективним є обладнання з ударно-балістичною технологією, розробленою на будівельному факультеті КНУ.

Властивості бетонів на заповнювачах із кварцово-залізістого піску – відходах ГЗК – досліджувалися на будівельному факультеті КНУ та в Дніпропетровській філії НДІБВ. Вивчення технологічних особливостей збагачених відходів показало вплив їх якості на властивості бетонної суміші й тужавілого бетону. Основними критеріями, що характеризують властивості класифікованих відходів, були цементо- й водоспоживання.

Дослідження на кварцово-залізістому піску проводилися в зіставленні з аналогічними зразками з важких бетонів на традиційних дрібних заповнювачах – кварцових пісках.

Зі збільшенням крупності кварцово-залізістого піску водоспоживання його зменшується. Витрата цементу на одиницю міцності бетону на збагачених відходах менша, ніж на природному кварцовому піску аналогічного складу.

Властивості бетону на відходах досліджувалися як при термовологісному обробленні, так і при тужавленні в природних умовах. У першому випадку питома витрата цементу на збагачених відходах становить 85-95% від питомої витрати цементу в бетоні на природному піску; після теплового оброблення – 74-93%. Установлено, що застосування класифікованих відходів дозволяє економити 50-100 кг цементу на 1м² бетону порівняно із застосуванням дрібнозернистих природних пісків.

У результаті досліджень підібрано склади бетонів, які виконуються загальноприйнятим способом. Зв'язок між активністю цементу, щільністю цементного каменю й міцністю бетону задовільно описується залежністю виду

$$R = AR_u \frac{\alpha I}{e B} - a \frac{\ddot{o}}{\emptyset} \quad (1)$$

де R – кубикова міцність бетону в 28-добовому віці; R_u – активність цементу; I і B – витрати цементу й води на 1м³ бетонної суміші; A та a – емпіричні коефіцієнти. Для описуваних бетонів рекомендуються коефіцієнти $A = 0,62$; $a = 0,5$.

Величина початкового модуля пружності бетону може бути визначена за емпіричною формулою

$$E_g(t) = \frac{E_m R(t)}{S + R(t)}, \quad (2)$$

де $E_g(t)$ – модуль пружності бетону при завантаженні його в довільному віці t ; $R(t)$ – кубикова міцність бетону в тому ж віці; E_m і S – емпіричні константи. Для бетонів на дрібних відходах ГЗК рекомендується приймати $E_m = 6 \cdot 10^4$, $S = 27$.

Бетон на відходах інтенсивно набирає міцність до 14 діб, після 28- добового віку зростання міцності практично припиняється. У сьомидобовому віці кубикова міцність вища на 62%, призма – на 34%, а при центральному розтягу – на 30%, ніж у звичайного. Підвищена міцність бетону на відходах збагачення пояснюється дещо більшою, порівняно з піском, шорсткістю зерен, механічною міцністю й додатковими цементувальними сполуками, викликаними присутністю заліза у відходах.

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 [1,2].

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.

Напрацювання результатів дослідження бетонів на заповнювачах із відходів ГЗК були використані як основа для всебічних досліджень роботи залізобетонних конструкцій як при короткочасній, так і тривалій дії навантаження.

Детально на факультеті проведено дослідження роботи залізобетонних балок і стояків.

У першій великій серії випробувань досліджено залізобетонні балки та стояки з бетону класу В 20 на дрібному заповнювачі з відходів ГЗК. Установлено, що несуча здатність таких конструкцій на 10-12% вища за розрахункову несучу здатність залізобетонних елементів.

Руйнівний згинальний момент для балок з дрібним заповнювачем із відходів ГЗК на 15,3% вищий, ніж для балок з бетону на кварцовому піску.

Момент утворення тріщин у балках з бетону на відходах ГЗК опинився в середньому на 20% вищий, ніж у балках з бетону на кварцовому піску. Ширина розкриття тріщин в елементах з бетону на відходах ГЗК при $M = 0,6M_n$ на 27% менша, ніж для бетонів на кварцовому піску. Поліпшення властивостей тріщиностійкості бетону на відходах пояснюється підвищеним зчепленням арматури з бетоном. Прогини балок з бетонів на відходах ГЗК у середньому на 20% менші, ніж у балках з бетону на кварцовому піску [1,3].

Отримано підвищену міцність стояків на відходах ГЗК у середньому на 7% порівняно зі стояками з бетону на кварцовому піску. Прогини стояків із бетону на відходах ГЗК опинилися на 13% меншими, ніж в аналогічних елементах з бетону на кварцовому піску.

Тривалі дослідження попередньо напружених залізобетонних елементів виявили особливості деформування конструкції з бетонів на відходах ГЗК порівняно з аналогічними конструкціями з бетонів на кварцовому піску. Експериментальні значення (у віці 480 діб) втрат попереднього напруження в арматурі від усадки досліджуваного бетону майже на 20% менші, ніж у попередньо напружених балках з бетону на кварцовому піску. Втрати попереднього напруження в арматурі від повзучості бетону для балок і стояків, виготовлених із бетону на відходах ГЗК, відповідно на 18,2 і 21,5% менші, ніж у таких же елементах із бетону на кварцовому піску.

Для теоретичного визначення несучої здатності, тріщиностійкості і деформативності згинальних та позацентрово стиснутих елементів на першому етапі було з успіхом використано методіку розрахунку, рекомендовану чинними нормами. Для кожного конкретного випадку розрахунку розроблено систему коригувальних коефіцієнтів, що враховують властивості описуваного бетону й вид напруженого стану конструкції. Уточнення методіки розрахунку конструкцій із бетонів на відходах ГЗК триває.

Бетонні та залізобетонні конструкції промислових будівель і споруди підприємств чорної металургії, зазвичай, працюють у складних умовах експлуатації – при підвищених рівнях напружень, безперервно змінюються за інтенсивністю, знаком і напрямком. Зміна навантажень у процесі експлуатації споруд може призвести до результатів, якісно відмінних від тих, які виходять при розрахунку на постійні навантаження максимальної інтенсивності. Тому було всебічно досліджено поведінку бетону на відходах при складних, нестандартних режимах навантаження.

Для визначення придатності залізобетонних конструкцій при роботі їх у складних умовах підприємств чорної металургії досліджувалися також і попередньо напружені залізобетонні згинальні елементи на дрібних заповнювачах із відходів збагачення залізних руд при дії повторних статичних навантажень. Розглянуто вплив небагаторазово повторюваних навантажень із максимальним рівнем навантаження $\gamma = 0,38 - 0,85$ від руйнівного з повним і частковим розвантажен-

ням на міцність, деформативність і утворення тріщин згинальних залізобетонних елементів з бетонів на відходах ГЗК. У результаті проведених досліджень розроблено методи розрахунку згинальних залізобетонних конструкцій, що експлуатуються при дії змінних статичних навантажень. Вони дозволяють визначати міцність, зусилля тріщиноутворення, ширину розкриття й умови закриття нормальних тріщин, жорсткість і деформативність нормальних перетинів.

Дослідження показали, що при середньому (експлуатаційному) рівні навантаження $M - (0,6 \dots 0,7) M$ характер зміни навантаження надає найбільш істотний вплив на зміну прогинів (жорсткостей), утворення, розкриття й закриття тріщин. У той же час історія навантаження практично не відбивається на несучій здатності конструкцій. При розрахунку згинальних залізобетонних елементів на дію статичних повторних навантажень за I і II групами граничних станів у першому наближенні в основу можуть бути покладені рекомендації чинних норм. Однак при цьому повинні бути враховані зміни основних фізико-механічних характеристик бетону залежно від режиму навантаження.

При проектуванні конструкцій слід урахувувати умови експлуатації, особливо можливість появи повторних навантажень, оскільки в багатьох випадках вони можуть призвести до втрати експлуатаційних якостей, а іноді й до руйнування. Застосування залізобетонних конструкцій із бетонів на відходах ГЗК при складних змінних експлуатаційних впливах показало їх високу ефективність і надійність. Виробничі випробування підтвердили достовірність пропонованих методів розрахунку.

З метою впровадження у виробництво результатів, отриманих у КНУ, були проведені експериментальні дослідження типових залізобетонних конструкцій на монотонне статичне навантаження відповідно до вимог ГОСТ. Було випробувано 8 видів натурних конструкцій із бетону на відходах ГЗК. Для порівняння паралельно випробовувалися конструкції з бетонів на кварцовому піску. Дослідні конструкції виготовлялися на виробництвах ЗАТ "Криворіжіндбуд".

Розрахункові показники плит із бетону на відходах ГЗК (серії ПТК-58- 12 і ПК-8-63-12) перевищують відповідні характеристики конструкцій із бетонів на кварцовому піску за міцністю на 20-28%, жорсткістю – на 40- 45%, деформативністю – на 37-40% і 33-34%.

Серійні несучі конструкції (плити, ферми, ригелі, підкранові та фундаментні балки тощо) з бетону на відходах ГЗК задовольняють вимоги ГОСТ 8829-66 і відповідних робочих креслень за міцністю, жорсткістю й тріщиностійкістю й можуть із успіхом застосовуватися в будь-яких будівлях і спорудах.

Попередньо напружені та звичайні залізобетонні (конструкції з використанням як дрібних заповнювачів відходів ГЗК) можна отримувати в заводських умовах, не змінюючи технологічного процесу виготовлення. При цьому не потрібно додаткових витрат робочого часу й капітальних вкладень.

Висновки та напрямок подальших досліджень. У результаті досліджень бетону на відходах збагачення залізних руд виявлено низку характерних особливостей фізико-механічних властивостей (підвищена міцність, знижена деформативність), які слід урахувувати при розробленні розрахункового апарату для залізобетонних конструкцій на зазначених бетонах.

Дослідження показує можливість широкого застосування відходів збагачення залізних руд для виготовлення звичайних і попередньо напружених залізобетонних конструкцій.

Натурні випробування типових залізобетонних конструкцій, виконаних з бетону на відходах, показали можливість широкого застосування й високу ефективність рекомендованого бетону.

Використання відходів як заповнювачів для бетонів дає можливість знизити реальну вартість залізобетонних конструкцій без істотних змін технології робіт.

Застосування бетонів на відходах ГЗК відкриває шляхи до широкого впровадження більш економічних конструкцій, що дозволяють отримати не тільки техніко-економічний, а й соціальний ефект.

За останні роки на ГЗК були ліквідовані установки з фракціонування пісків із хвостів хвостосховищ, що призвело до припинення їх поставок на підприємства будівельної індустрії.

На будівельному факультеті КНУ розроблено перспективну технологію та обладнання для виділення крупної фракції будівельного піску зі хвостосховищ. У зв'язку з цим перед нами та ГЗК поставлено завдання з відновлення виробництва фракціонованого піску з хвостів збагачення залізних руд.

Це відкривє можливість забезпечити у великому обсязі дешевим якісним будівельним штучним піском як будівельну індустрію, так і будівництво автошляхів.

Усі вищеперераховані дослідження проводилися з бетоном, де крупним заповнювачем був гранітний щебінь. У зв'язку з цим перед нами поставлено завдання провести широкі дослідження з використання гірських порід як щебеню для конструктивних бетонів та бетонів покриття і основ автошляхів.

Список літератури

1. **Валовой О. І., Срьоменко О.Ю., Валовой М.О.** «Коррозійна стійкість бетонів на заповнювачах з відходів металургійної промисловості». Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне, 2016. – Вип. 32. – С.15-22.
2. **Валовой М.О.** «Технологія виготовлення та аналіз тріщиностійкості дослідних зразків балок на відходах гірничо-збагачувальних комбінатів». Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне. – 2013. – Вип.25. – С. 233–239.
3. **Валовой О.І., Герб П.И., Валовой М.А., Попруга Д.В.** «Использование отходов горнорудной промышленности при изготовлении строительных конструкций». Качество минерального сырья: сб. научн. трудов. – Кривой Рог, 2008. – С. 461–471.
4. **Шевченко Б. Н.** Исследование прочности и деформативности предварительно напряженных железобетонных элементов, изготовленных из бетонов на мелких заполнителях – отходах горно-обогажительных комбинатов: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.23.01 «Будівельні конструкції, будівлі та споруди» / Б. Н. Шевченко. – К., 1980. – 20 с.
5. Железобетонные конструкции из бетона на отходах горнорудной и металлургической промышленности / [Л. И. Стороженко, Б. Н. Шевченко, В. М. Ильенко и др.]. – К.: Будівельник, 1982. – 72 с.
6. **Валовой А. И.** Влияние кратковременных переменных нагрузок на прочность, деформативность и трещиностойкость железобетонных элементов из бетонов на отходах обогащения железных руд: автореф. дис. на соискание уч. степени канд. техн. наук. – К.: КИСИ, 1980. – 20 с.
7. **Valovoi A., Koval P., Eremenko A., Valovoi M., Volkov S.,** “Durability of beams with hybrid reinforcement from metal and basalt fiber reinforced polymer (BFRP) armature”, MATEC Web of Conferences **230**, 02035 (2018) (<https://doi.org/10.1051/mateconf/201823002035>)
8. **Valovoi A., Eremenko A., Valovoi M., Volkov S.,** “Research of the Deflections of Beams Reinforced with BFRP Armature and Hybrid Reinforcement Using Metal and BFRP Armature”, *Actual Problems of Engineering Mechanics: Materials Science Forum*. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland (2019), **Vol. 968**, p. 301-308.(DOI:<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.301>).
9. **Срьоменко О.Ю.** Ефективність варіантів підсилення у стиснутій зоні залізобетонних елементів, що працюють на згин. Дисс. канд. техн. наук. КНУБА, 2005. - 133с.
10. **Валовой М.О.** Міцність, тріщиностійкість та деформативність підсилених згинальних елементів при повторних навантаженнях Дисс. канд. техн. наук. КНУБА, 2011. - 126с.

Рукопис подано до редакції 13.05.2020

УДК 622.775

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук, проф., П.К. НІКОЛАСНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ВПЛИВ ТИПУ ДРОБЛЕННЯ ОКИСЛЕНИХ ЗАЛІЗИСТИХ КВАРЦИТІВ НА ПОДАЛЬШЕ ЇХ РОЗКРИТТЯ ПРИ ПОДРІБНЕННІ В КУЛЬОВОМУ МЛІНІ

Мета. Метою даних досліджень є, порівняння показників збагачення окислених залізистих кварцитів дроблених в валковій дробарці та ролер-пресі, при наступному їх кульовому подрібненні, та визначення особливостей руйнування зростків отриманих в валках високого тиску. Задачею є ознайомлення науково-технічних працівників з особливостями впливу дроблення окислених залізистих кварцитів в ролер- пресі на розкриття зростків мінералів при їх подальшому кульовому подрібненні.

Методи дослідження. Лабораторні дослідження з застосуванням устаткування для дроблення та збагачення.

Наукова новизна. Встановлено оптимальний розмір зростків рудного та нерудного компонентів окислених залізистих кварцитів, в якому найповніше проявляється ефект розміщення міжкристалічних зав'язків між зернами, закладений в них у процесі руйнування в ролер-пресі.

Практичне значення. Визначено показники збагачення окислених залізистих кварцитів дроблених в валковій дробарці та ролер-пресі, та встановлено що застосування останнього дозволяє: підвищити якість кінцевого концентрату на 1,78% (з 63,7 до 65,48%) та вилучення заліза загального на 5,88% (з 70,49 до 76,37%); знизити вміст кварцу в концентраті на 1,82% (з 7,19 до 5,37%) та його вилучення на 1,04% (з 6,01 до 4,97%); знизити вміст заліза загально-

го в хвостах на 2,22% (з 17,26 до 15,04%) при одночасному підвищенні вмісту в них кварцу на 3,6% (з 72,74 до 76,36%).

Результати. Використання в технології збагачення окислених залізистих кварцитів, для дроблення вихідної руди ролер-пресу, у порівнянні з валковою дробаркою, забезпечує більш селективне руйнування руди та ефективну підготовку поверхонь зростків для наступного їх розкриття при подальшому подрібненні в кульових млинах. В результаті цього знижуються втрати рудних мінералів в хвости, в процесі збагачення, при більш повному видаленні в них частинок пустої породи (кварцу).

Ключові слова: руда, гематит, залізо, дроблення, ролер-прес, зростки, розкриття, збагачення

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-147-154

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Розробка технології збагачення окислених залізистих кварцитів, в яких основним рудним мінералом є гематит, активно проводилася у 80-х роках ХХ-го століття.

Інтерес до даного виду сировини базується на тому, що:

її не потрібно видобувати окремо, так як вона є супутнім продуктом при розробці родовищ магнетитових кварцитів;

кількість попутно видобуваємих окислених кварцитів значна та складає до 30% від об'єму видобутих магнетитових кварцитів;

вміст заліза загального у руді ідентичний вмісту заліза в магнетитових кварцитах.

У даний час, тільки у Криворізькому залізорудному басейні окремо заскладовано близько 800 млн. тонн окислених залізистих кварцитів [1].

Ефективність процесу збагачення гематитових руд залежить від того, наскільки повно при рудопідготовці вдалося забезпечити розкриття видобутих мінералів при мінімальному їх переподрібненні [2]. Незважаючи на великі досягнення в частині рудопідготовки, лише одиничні технологічні рішення відповідають одному з головних принципів оптимального збагачення – «не дробити нічого зайвого». Обумовлено це, передусім, недостатнім розумінням механізму селективного руйнування, невивченістю зв'язків між властивостями руд, мінералів, умовами дезінтеграції й показниками подрібнення.

Аналіз досліджень і публікацій. На початкових стадіях руйнування переважну роль у формуванні структурних елементів розкриття мінералів відіграють текстурні характеристики руд і макроскопічні фізико-механічні характеристики гірських порід. У міру скорочення розмірів куска більшою мірою проявлятиметься роль структурних характеристик руди та властивостей окремих мінералів і комплексів. Це припускає збільшення кількості товарних потоків, «тонше налаштування» режимів відповідних стадій рудопідготовки як у частині дезінтеграції, так і розділення [2].

В існуючих технологіях збагачення окислених залізистих кварцитів, на стадії розкриття руди, в якості руйнуючих апаратів використовують конусні дробарки та кульові млини.

Дробарки зменшують крупність вихідної руди у три стадії, з 1200 до 20 мм, кульові млини у дві стадії – з 20 мм до 70% класу 74 мкм (80% класу 150 мкм) та 90,5% класу 44 мкм (80% класу 50 мкм), що відповідає розкриттю рудних та нерудних мінералів.

Для збагачення подрібненої руди використовують високоінтенсивні магнітні сепаратори з напруженістю поля 0,8-1 Тл.

За цією схемою передбачалося отримувати концентрат із вмістом заліза 61% і вилученні 70%.

Аналіз продуктів збагачення даної схеми показав, що основні втрати заліза припадають на класи крупності менше 10-20 мкм. Їх величина у першій стадії збагачення складає 54,9% а у другій – 42,7%. Це пояснюється тим, що при кульовому подрібненні сировини відбувається посилене ошламування і закріплення тонких частинок на поверхні як рудних, так і нерудних мінералів. На рудних частинках, як правило, закріплюються нерудні тонкі частинки (кварц, глинисті домішки та ін.), а на нерудних - рудні частки (гідроксиди заліза, гематит, мартит та ін.) [3].

Для поліпшення селективності процесу поділу подрібнених продуктів пробували застосовувати різні поверхнево-активні речовини, зокрема бішофіт, подаючи його в млини [4]. Це дозволило підвищити вміст заліза у кінцевому концентраті до 64%, за рахунок зняття тонких частинок з поверхні мінералів, але не вирішило проблему селективного розкриття компонентів руди.

Таким чином, можна зробити висновок, що при використанні у даній технології у якості подрібнюючих апаратів кульових млинів, ККД яких відносно поверхні зрощення мінералів складає частки відсотка, не виконана задача селективного руйнування та не враховані ні фізичні принципи ні параметри, які визначають утворення зростків та розкриття мінералів.

Одним з напрямів зниження ошламування та селективного руйнування є перехід на досягнення крупності руйнованого матеріалу з 20 до 3-1 мм шляхом дроблення замість подрібнення, що дозволить також знизити енерговитрати на процес до 50%.

Це можливо, при використанні валкових дробарок різного типу.

Вибір способу руйнування визначається співвідношенням пружних і міцнісних характеристик мінералів, структурою і станом границі зростання.

Підвищення якості розкриття слід розглядати як співвідношення пружних і міцнісних властивостей мінералів які розкриваються, стану кордонів зрощення і параметрів деформування. В основі селективного руйнування лежить неоднорідність структури і відмінність пружних характеристик мінералів, що дозволяють створити різну деформацію в мінералах, які розкриваються і викликати напруги на границі їх зростання.

Селективне руйнування може бути викликано, наприклад, відмінністю тріщиностійкості мінералів зростання. Реалізувати схильність руди до селективного розкриття можна, сформувавши в мінералах, які мають контраст пружних і міцнісних властивостей, складнонапружений стан в результаті нерівнокомпонентного деформування структурного елемента розкриття. Такі навантаження передбачають створення на границі мінералів зсувних і розтягуючих деформацій, що створюють умови для інтеркристалітного руйнування (селективне розкриття щодо кордонів зрощення) [5]. На кожному рівні неоднорідності виникає своя структура мікронапруг, яка залежить від розміру елементів, які руйнуються: чим більше розмір шматка, тим менше вплив неоднорідностей, пов'язаних з окремими мінералами. Одним з рішень підвищення селективності розкриття мінералів в процесі рудопідготовки гематитових руд є застосування в схемі валків високого тиску (ролер-пресів), які дозволяють дробити шматки руди крупністю 20-0 мм до крупності 3-1 мм та менше [6].

При дробленні матеріалу в ролер-пресі, міжчастинкове руйнування руди відбувається за рахунок сил що тиснуть на шар, в якому концентруються розтягуючі і зсувні напруження [7, 8].

При відсутності бокового тиску або малих його значеннях, опір зсуву всередині зерна на порядок більше опору зсуву по межі. При зсуві, може відбуватися зміщення в напрямку, перпендикулярному поверхні тріщини. При високому бічному тиску і неможливості зміщення, міцність на зсув по межі наближається до міцності зерна. У точці перетину прямої тертя Кулона для межі зерна і обвідної Мора для зерна, міцності вирівнюються, і скол по зернам стає більш імовірним [9].

На першому етапі (верхні зони захоплення валками) руйнування одиничних кусків при критичних рівнях деформації відбувається за елементами структурного розміщення (мікротріщини, розщеплення і т.д.). Зростання тріщин можливо тільки за рахунок енергії пружної деформації, запасеної в зразку (в робочих органах) перед руйнуванням. Заключна фаза руйнування відбувається при об'ємному деформуванні шару

Гранулометричний склад продуктів руйнування визначається енергетичним фактором, що враховує тип навантаження - жорсткий або м'який. При аналізі роботи ролер-преса часто ігнорується принципова відмінність, що визначає гранулометричний склад кінцевого продукту, - режим деформування. У ролер-пресі руйнування одиничних шматків і навантаження шару, на відміну від валкової дробарки, проходить в жорсткому режимі (при заданій деформації) [5].

Таким чином можна припустити, що спосіб навантаження в ролер-пресі дозволяє, максимум зруйнувати матеріал по межі спайності зерен, з отриманням великої кількості нерудних зерен після дроблення, та розміцнити міжкристалічні зв'язки між ними в зростках, які утворюються, що при подальшому руйнуванні дозволить ефективно їх розділити. Тим більше, що роль концентрації напружень між мінеральними компонентами і на межах їх зрощення збільшується в міру зменшення розмірів шматка. Це особливо актуально при наближенні розміру зростка до розміру розкритих рудного та нерудного зерен (оптимальним є загальний розмір рудного та нерудного зерен). Наявність інтеркристалітного руйнування в такому агрегаті зерен дозволить розділити його в процесі подрібнення з мінімумом затрат та переподібненням мінералів.

Постановка задачі. Було виконано дослідження по впливу дроблення окислених залізістих кварцитів в ролер-пресі на подальше їх розкриття при подрібненні їх в кульовому млині.

Викладення матеріалу та результати. Роботу проведено в два етапи. На першому етапі було визначено хімічний і мінеральний склад вихідної руди та проміжні крупності дроблення та подрібнення матеріалу, для проведення технологічних досліджень.

На другому етапі було зроблено порівняння показників збагачення руди крупністю 20-0 мм дробленої в валковій дробарці та ролер-пресі при ідентичних режимах подальшого подрібнення в кульових млинах та поділу в високо інтенсивному магнітному сепараторі.

Оцінку отриманих показників проводили по кількісним показникам поділу, вмісту заліза і кварцу в продуктах та індексу селективності по операціях.

Значення індексу селективності приймається в якості показника для вимірювання ефективності відносного поділу двох залучених мінералів. Визначається індекс селективності за формулою (1) [10]

$$SI = \sqrt{\frac{M \cdot n}{m \cdot N}} \quad (1)$$

де M – вміст корисного компоненту у концентраті, %; m – вміст корисного компоненту у хвостах, %; n – вміст пустої породи у хвостах, %; N – вміст пустої породи у концентраті, %.

Перший етап. Хімічний аналіз руди, яка використовувалася при проведенні експериментів приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Хімічний аналіз окислених залізістих кварцитів

Компоненти, %										
Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	K ₂ O	MgO	Mn	Na ₂ O	P	S	в.п.п
36,0	46,5	0,42	0,04	0,035	0,11	0,01	0,012	0,01	0,02	0,67

Мінералогічний аналіз показав, що дана руда є по суті бінарною системою, яка складається з гематиту та кварцу.

При визначенні проміжної крупності дроблення та подрібнення матеріалу, для проведення технологічних досліджень, вихідну руду крупністю 20-0 мм було подрібнено в шоківій дробарці до крупності 6,35- 0 мм і розсіяно на класи, які вивчалися на розкриття гематиту та кварцу.

Аналіз розкриття гематиту та кварцу в руді (рис. 1, 2), дозволив виявити три розміри фракцій в яких проводилися подальші технологічні дослідження, це: 1 мм, 150 та 53 мкм.

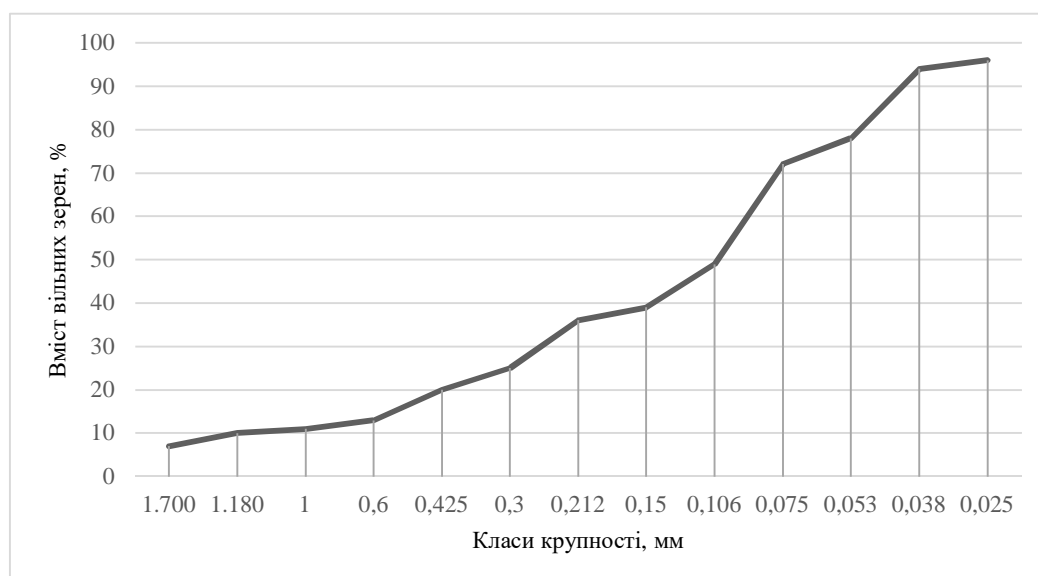


Рис. 1. Розкриття гематиту по класам крупності вихідної руди

Так кількість розкритих зерен гематиту та кварцу по фракціям складає відповідно: 1 мм - 12% та 31%; 150 мкм - 45% та 70%; 53 мкм - 86% та 87%.

Відмінностями цих фракцій є ступінь розкриття гематиту та кварцу, яка підвищується зі зменшенням крупності. Для руди, яка використовується при дослідженнях, матеріал крупністю 53 мкм можна вважати розкритим.

Таким чином ці розміри фракцій були прийняті для концентрації заліза високоінтенсивною магнітною сепарацією.

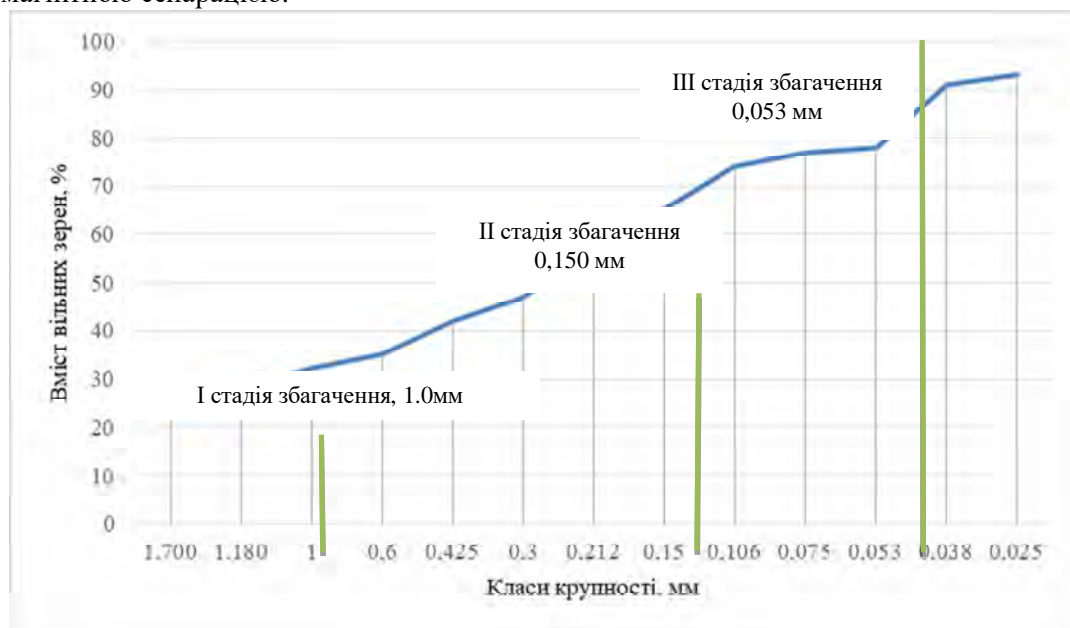


Рис. 2. Розкриття кварцу по класам крупності вихідної руди

Другий етап. Вихідну руду крупністю 20-0 мм було подроблено в валковій дробарці та ролер-пресі до крупності 1-0 мм. Отримані продукти подавалися на магнітну сепарацію у високоінтенсивному сепараторі при індукції магнітного поля 0,8 Тл.

Аналіз отриманих результатів (табл. 2) свідчить про суттєву перевагу використання для дроблення руди ролер-пресу:

- вміст заліза загального в магнітному продукті більше на 6% (49,35 проти 43,35%);
- вилучення заліза загального в магнітний продукт більше на 0,84% (91,58 проти 90,74%);
- вилучення кварцу в магнітний продукт менше на 17,94% (40,22 проти 58,16%);
- вміст заліза загального в немагнітному продукті менше на 1,95% (9,55 проти 11,5%);
- індекс селективності більше на 1,5;

вихід немагнітного продукту склав 32,21%, що відповідає кількості розкритого кварцу в цій крупності (табл. 2).

Таблиця 2

Порівняння показників високоінтенсивної магнітної сепарації руди крупністю 1-0 мм дробленої в валковій дробарці та ролер-пресі

Вихідний матеріал	Продукти	Показники, %					Індекс селективності
		вихід	вміст Fe _{заг}	вміст SiO ₂	вилучення Fe _{заг}	вилучення SiO ₂	
Руда крупністю 1-0 мм після Валкової дробарки	Живлення	100,00	35,50	46,98	100,00	100,00	2,52
	Магнітний продукт	74,31	43,35	36,78	90,74	58,16	
	Немагнітний продукт	25,69	11,50	78,21	9,26	41,84	
Руда крупністю 1-0 мм після ролер-пресу	Живлення	100,00	36,50	46,01	100,00	100,00	4,02
	Магнітний продукт	67,79	49,35	27,30	91,58	40,22	
	Немагнітний продукт	32,21	9,55	85,40	8,42	59,78	

Магнітні продукти крупністю 1-0 мм, подрібнювалися в кульовому млині до крупності 150-0 мкм, та направлялися на високоінтенсивну магнітну сепарацію при індукції магнітного поля 0,8 Тл.

Аналіз отриманих результатів (табл. 3) показав перевагу використання для дроблення руди ролер-пресу, але не таку суттєву:

- вихід магнітного продукту більше на 12,3% (80,4 проти 68,1%);
- вилучення заліза загального в магнітний продукт більше на 2,49% (93,37 проти 90,88%);
- індекс селективності більше на 2,06.

Таблиця 3

Порівняння показників високоінтенсивної магнітної сепарації магнітного промпродукту крупністю 1-0 мм подрібненого в кульовому млині до крупності 150-0 мкм

Вихідний матеріал	Продукти	Показники, %					Індекс селективності
		вихід	вміст Fe _{заг}	вміст SiO ₂	вилучення Fe _{заг}	вилучення SiO ₂	
Магнітний продукт крупністю 150 мкм при дробленні вихідної руди в валковій дробарці	Живлення	100,00	43,35	36,78	100,00	100,00	2,81
	Магнітний продукт	68,10	57,85	16,38	90,88	30,33	
	Немагнітний продукт	31,90	12,35	80,39	9,12	69,67	
Магнітний продукт крупністю 150 мкм мм при дробленні вихідної руди в ролер-пресі	Живлення	100,00	49,35	27,30	100,00	100,00	4,87
	Магнітний продукт	80,40	57,31	16,64	93,37	49,0	
	Немагнітний продукт	19,60	16,70	71,01	6,63	51,0	

При цьому спостерігалось по обох варіантах, значне зростання вмісту заліза загального в магнітному продукті (до 57,31-57,85%) і порівняно невеликий вміст кварцу в магнітних продуктах (16,38-16,64%). В цілому ці показники по обох варіантах практично однакові. Це можна пояснити тим, що дана крупність є проміжною і режим подрібнення передбачає наявність значної кількості зростків (до 55%), які за розмірами суттєво перевищують розмір розкритих зерен (53 мкм).

Магнітні продукти крупністю 150-0 мкм, подрібнювалися в кульовому млині до крупності 53-0 мкм, та подавалися на високоінтенсивну магнітну сепарацію при індукції магнітного поля 1,0 Тл.

Аналіз отриманих результатів (табл. 4) показав суттєву перевагу використання для дроблення руди ролер-пресу:

- вміст заліза загального в магнітному продукті більше на 1,78% (65,48 проти 63,7%);
- вилучення заліза загального в магнітний продукт більше на 3,85% (89,32 проти 85,47%);
- вилучення кварцу в магнітний продукт менше на 9,13% (24,94 проти 34,07%);
- вміст заліза загального в немагнітному продукті менше на 9,51% (28,05 проти 37,56%);
- індекс селективності більше на 1,97.

Таблиця 4

Порівняння показників високоінтенсивної магнітної сепарації магнітного промпродукту крупністю 150-0 мкм подрібненого в кульовому млині до крупності 53-0 мкм

Вихідний матеріал	Продукти	Показники, %					Індекс селективності
		вихід	вміст Fe _{заг}	вміст SiO ₂	вилучення Fe _{заг}	вилучення SiO ₂	
Магнітний продукт крупністю 53 мкм при дробленні вихідної руди в валковій дробарці	Живлення	100,00	57,85	16,38	100,00	100,00	3,05
	Магнітний продукт	77,62	63,70	7,19	85,47	34,07	
	Немагнітний продукт	22,38	37,56	48,20	14,53	65,93	
Магнітний продукт крупністю 53 мкм при дробленні вихідної руди в ролер-пресі	Живлення	100,00	57,31	16,64	100,00	100,00	5,02
	Магнітний продукт	78,17	65,48	5,37	89,32	24,94	
	Немагнітний продукт	21,83	28,05	57,87	10,68	75,06	

При однаковій тенденції змін показників поділу руди в крупності 1-0 мм та 53-0 мкм, виявлена одна характерну відмінність, а саме різке зменшення заліза загального в немагнітному продукті (з 1,95% при крупності 1-0 мм до 9,51% при крупності 53-0 мм). Це можна пояснити тим, що при використанні у голові процесу, у якості дробарного апарату ролер-пресу, саме в даному діапазоні скорочення крупності частинок матеріалу (150-53 мкм) подрібненням в кульовому млині, проявляється ефект розміцнення міжкристалічних зв'язків між зернами в існуючих зростках, яке дозволяє розкрити їх без значного переподрібнення.

Загалом використання в технології збагачення окислених залізистих кварцитів, для дроблення вихідної руди ролер-пресу, у порівнянні з валковою дробаркою, дозволяє (табл.5):

підвищити якість кінцевого концентрату на 1,78% (з 63,7 до 65,48%) та вилучення заліза загального на 5,88% (з 70,49 до 76,37%);

знижити вміст кварцу в концентраті на 1,82% (з 7,19 до 5,37%) та його вилучення на 1,04% (з 6,01 до 4,97%);

знижити вміст заліза загального в хвостах на 2,22% (з 17,26 до 15,04%) при одночасному підвищенні вмісту в них кварцу на 3,6% (з 72,74 до 76,36%).

Таблиця 5

Порівняння збагачення руди дробленої в валковій дробарці та ролер-пресі						
Характеристика вихідного матеріалу та умов проведення експерименту	Продукти	Показники, %				
		вихід	вміст Fe _{заг}	вміст SiO ₂	вилучення Fe _{заг}	вилучення SiO ₂
Магнітне збагачення в три стадії при дробленні вихідної руди в валковій дробарці	Живлення	100,00	35,50	46,98	100,00	100,00
	Концентрат	39,29	63,70	7,19	70,49	6,01
	Сумарні хвости	60,71	17,26	72,74	29,51	93,99
Магнітне збагачення в три стадії при дробленні вихідної руди в ролер-пресі	Живлення	100,00	36,53	46,01	100,00	100,00
	Концентрат	42,60	65,48	5,37	76,37	4,97
	Сумарні хвости	57,40	15,04	76,36	23,63	95,03

Це свідчить про більш селективне руйнування руди в процесі дроблення в ролер-пресі ніж у валковій дробарці та ефективну підготовку поверхонь зростків для наступного їх розкриття при подальшому подрібненні в кульових млинах. В результаті цього знижуються втрати рудних мінералів в хвости, в процесі збагачення, при більш повному видаленню в них частинок пустої породи (кварцу).

Висновки та напрямок подальших досліджень.

1. Проведено дослідження по використанню ролер-пресу для дроблення окислених залізистих кварцитів.

2. Визначено особливості процесу руйнування матеріалу в робочій зоні ролер-пресу, та зроблено припущення, про можливість розміцнення міжкристалічних зв'язків між зернами в зростках які утворюються, що дозволить розкрити їх без значного переподрібнення. Особливо це стосується зростків с загальним розміром рудного та нерудного зерен.

3. Проведено дослідження та визначено три розміри фракцій в яких проводилися подальші технологічні дослідження, це: 1 мм, 150 та 53 мкм. Відмінностями їх є ступінь розкриття гематиту та кварцу, яка підвищується зі зниженням крупності. Для руди яка використана при дослідженнях, матеріал крупністю 53 мкм можна вважати розкритим.

4. Проведено порівняння показників збагачення окислених залізистих кварцитів дроблених в валковій дробарці та ролер-пресі з подальшим їх подрібненням в кульовому млині та магнітним збагаченням.

5. Встановлено, що застосування ролер-пресу для дроблення вихідної руди крупністю 20-0 мм до крупності 1-0 мм, з подальшим його збагаченням, дозволило суттєво покращити показники поділу, в порівнянні з матеріалом дробленим в валковій дробарці. Так: вміст заліза загального в магнітному продукті більше на 6% (49,35 проти 43,35%); вилучення заліза загального в магнітний продукт більше на 0,84% (91,58 проти 90,74%); вилучення кварцу в магнітний продукт менше на 17,94% (40,22 проти 58,16%); вміст заліза загального в немагнітному продукті менше на 1,95% (9,55 проти 11,5%); індекс селективності більше на 1,5. Тобто після дроблення було отримано велику кількість нерудних зерен, які було видалено при магнітному збагаченні.

6. Збагачення магнітного продукту крупністю 1-0 мм подрібненого у кульовому млині до крупності 150-0 мкм, також показало переваги застосування матеріалу дробленого в ролер-

пресі. Так: вихід магнітного продукту більше на 12,3% (80,4 проти 68,1%) при практично однаковому вмісті в ньому заліза загального та кварцу; вилучення заліза загального в магнітний продукт більше на 2,49% (93,37 проти 90,88%); - індекс селективності більше на 2,06.

7. Особливо проявився ефект від дроблення руди в ролер-пресі при подрібненні магнітного продукту крупністю 150 мкм до крупності розкриття мінералів (53 мкм), а саме різке зменшення вмісту заліза загального в немагнітному продукті (на 9,51%) в порівнянні зі збагаченням матеріалу дробленого в валковій дробарці. Це пояснюється тим, що саме в даному діапазоні скорочення крупності частинок матеріалу (150-53 мкм) який відповідає оптимальному загальному розміру зростків рудного та нерудного компонентів, проявляється ефект розміщення міжкристалічних зв'язків між зернами, закладений в них у процесі руйнування. Це дозволило розкрити рудні та нерудні зерна без значного їх переподрібнення.

8. Загалом використання в технології збагачення окислених залізистих кварцитів, для дроблення вихідної руди ролер-пресу, у порівнянні з валковою дробаркою, дозволяє більш селективне руйнування руди та ефективну підготовку поверхонь зростків для наступного їх розкриття при подальшому подрібненні в кульових млинах. В результаті цього знижуються втрати рудних мінералів в хвости, в процесі збагачення, при більш повному видаленню в них частинок пустої породи (кварцу).

Напрямок подальших досліджень доцільно вважати розгляд механізму розміщення міжкристалічних зв'язків між зернами мінералів в крупності близької до їх розкриття.

Список літератури

1. Morkun V., Gubin G., Oliinyk T., Lotous V., Ravinskaia V., Tron V., Morkun N., Oliinyk M. High-energy ultrasound using to improve the quality of iron ore particles purification in the process of its enrichment // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6 № 12 (90) P. 41–51.
2. Олійник Т.А. Дослідження умов селективного руйнування мінеральних комплексів при збагаченні гематит-ільменітових руд / Т.А. Олійник, Л.В. Скляр, М.О. Олійник // Збагачення корисних копалин. – Дніпропетровськ. – 2015. – Вип. 60(101). – С. 57–67.
3. Олійник Т.А. Современные тенденции развития технологий обогащения гематитовых руд в Украине /Збагачення корисних копалин, 2014. – Вип. 56(97) Дніпропетровськ: НГУ, 2014.
4. Булах О.В. Використання бішофіту при подрібненні окислених залізистих кварцитів Скелеватського та Ваявкінського родовищ для зниження шламоутворення / О.В. Булах, О.О. Булах // Збагачення корисних копалин.– Вип.№ 57(98) – Дніпропетровськ: НГУ, 2014. – С. 80 – 82
5. Хопунов Э. А. Энергетические и силовые факторы селективного разрушения руд // Известия вузов. Горный журнал. 2020. № 1. С. 79–88.
6. Олійник Т.А. Використання математичного моделювання для визначення гранулометричного складу продукту дроблення руди в шарі під тиском / Т.А. Олійник, П.К. Ніколаско // 2019. – Збагачення корисних копалин - 72(113). – С. 44-47.
7. Fuerstenu D.W., Kapur D.Ñ., Gutsche Î. Comminution of minerals in a laboratory-size, choke-fed high-pressure roll mill // Mines carriers: Tech. 1994, no 3–4, pp. 24–28.
8. Kellerwessel H.A.M. High pressure particlebed comminution. State of the art, application, recent developments // Engineering and Mining Journal. 1996. Vol. 197, no 2, p. 45.
9. Лейбовиц А. Разрушение. Неорганические материалы. Т. 7, Ч. 1. - М.: Мир, 1967. - с. 61-128.
10. Интернет ресурс <http://hdl.handle.net/2115/37830>

Рукопис подано до редакції 13.05.2020

УДК 693

В.А. ШИМКО, ст. викладач, Криворізький національний університет
Г.В. ОНЬКОВА, інж., ДП «ДПІ «Кривбаспроект»

СУЧАСНИЙ РОЗВИТОК ІНДУСТРІАЛЬНИХ МЕТОДІВ ЗВЕДЕННЯ МАЛОПОВЕРХОВОГО ЖИТЛА РІЗНИХ КАТЕГОРІЙ

Мета. Метою даної роботи є розглянути сучасні та більш індустриальні методи та організаційно-технологічні рішення при зведенні малоповерхових житлових будинків, малоповерхових міні-готелів та модульних містечок.

Методи дослідження. Для досягнення сформульованої мети застосовано теоретичні методи: аналіз та узагальнення наукової літератури та робіт з тематики, законодавчої та нормативної бази у сфері малоповерхового будівництва в Україні.

© Шимко В.А., Онькова Г.В., 2020

Наукова новизна. Проблема, що піднімається в роботі, обґрунтована стрімким розвитком індустріального малоповерхового будівництва, потребою в доступному житлі в замських зонах великих і малих міст України, необхідністю зведення в короткий термін будинків різного призначення, житлових містечок для військовослужбовців і жителів районів, що перебувають в особливих і екстремальних умовах. Саме у розв'язанні цієї задачі, встановленні сучасної класифікації будівельних технологій, визначенні більш ефективних методів зведення малоповерхових житлових будинків різних категорій й полягає наукова новизна даної роботи.

Практична значимість. Практична реалізація полягає в тому, що через перенаселення великих міст і непомірної вартості міського житла в цей час іде активне формування позитивного іміджу замського проживання. Крім того в Україні з кожним роком все більше розвиваються міжнародні транспортні зв'язки й міжнародний туризм, необхідність прискореного й широкого обміну науковою інформацією й передовим досвідом шляхом проведення міжнародних конференцій і нарад, організація міжнародних фестивалів, виставок тощо.

Результати. Використання сучасних індустріальних та організаційно-технологічних рішень при зведенні малоповерхового житла різних категорій в даний час дозволяють суттєво підвищити темпи будівництва, знизити трудові витрати, а також вдосконалення технологічних процесів призводить до скорочення термінів будівництва; раціональні способи зведення комплексу малоповерхових будівель; наведено аналіз технологічних операцій при монтажі трансформованих малоповерхових житлових будинків з використанням сендвіч-панелей.

Ключові слова: малоповерхове житло, каркасні будинки, швидкобудуючі будівлі, технологічні параметри зведення, збірно-розбірні або модульні будинки, контейнерні будівлі, технології 3D-друку у будівництві.

doi: 10.31721/2306-5435-2020-1-107-154-162

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Через перенаселення великих міст, непомірної вартості міського житла, екологічної складової тощо, на сьогодні йде активне формування позитивного іміджу замського проживання. Основні надії покладаються на розвиток сфери котеджного або малоповерхового домобудівництва й відповідної інфраструктури вдалині від великих міст.

Крім того, розвиток малоповерхового будівництва в сучасних умовах обумовлений потребою в доступному житлі в замських зонах великих і малих міст України, а також необхідністю зведення в короткий термін житлових будинків різного призначення, житлових городків для військовослужбовців і жителів районів, що перебувають в особливих і екстремальних умовах.

Ці актуальні проблеми можуть бути успішно вирішені шляхом широкого впровадження більш індустріальних методів та технологій будівництва житлових будинків високої заводської готовності з поліпшеними теплотехнічними й експлуатаційними характеристиками та меншою вартістю.

Аналіз досліджень і публікацій. На цей час більшість проведених досліджень у сфері малоповерхового житлового будівництва ставиться до рішення задач в області вдосконалення наявних та опробованих конструктивно-технологічних рішень і традиційних технологій їх зведення. Слід зазначити, що великий внесок у вивчення розвитку сучасних технологій малоповерхового житлового будівництва зробили такі вітчизняні дослідники, як Черенько Л.М.[1], Гирич В.Ю.[2], Рабінська О.П. [3], Дьяченко Л.Ю. [4], Мироненко В.П. [5], Андрійчук О.В. [6] та багато інших. Крім того, цій темі присвячено багато статей на різних електронних ресурсах [7-12].

Але на цей час залишається малодослідженим саме більш оптимальний вибір організаційно-технологічної схеми будівництва малоповерхових будівель з урахуванням багатьох чинників.

Ця робота спрямована на подальший розвиток нових технологій, зокрема, на зведення невеликих житлових будівель різних категорій, які набирають популярності серед населення в умовах складної економічної ситуації в країні.

Постановка завдання. Показати та обґрунтувати необхідність широкого впровадження сучасних індустріальних методів та технологій при зведенні малоповерхового житла різних категорій, поставити завдання та методи дослідження.

Викладення матеріалу та результати. У сучасному світі наявність власного житла формує у людини почуття соціальної захищеності та відповідальності. Саме завдяки зведенню доступних для широкого загалу населення житлових будинків, громадяни будуть здатні оцінювати свої можливості витрат на проживання для вирішення питання демографічної ситуації.

Будівництво житла й на сьогодні залишається одним із пріоритетів реалізації містобудівної політики в державі. При цьому значну частку в житловому будівництві відіграє будівництво

малоповерхового житла різних категорій. Житлові проекти такого житла повинні поєднувати в собі економію коштів і термінів їх проектування і будівництва, а також відповідати сучасним уявленням про комфортне житло.

Суттєву роль при зведенні такого житла відіграє саме використання сучасних індустріальних методів та технологій, які дозволяють значно скоротити як вартісні показники, так і терміни будівництва взагалі, що в даному випадку є принциповим питанням для забудовника.

На сьогодні в світі у галузі малоповерхового житлового будівництва вже існують і з'являються ще новіші технології зведення будівель і розвиток цих технологій йде в напрямку "чим будівля легше, тим вона дешевше". Завдяки тісним зв'язкам та входженням нашої країни у ВТО ці технології активно впроваджуються й на нашому ринку, при чому вибір той чи іншої технології для забудовника не завжди очевидний.

Принциповими більш індустріальними методами та технологіями зведення малоповерхових будинків є наступні види (рис.1): каркасні будинки, будинки з СП-панелей, швидкобудеміодульні будинки (ШМБ), будинки контейнерного типу, будинки, що будуються 3D-друком.



Рис.1. Види сучасних індустріальних методів та технологій зведення малоповерхових житлових будинків

Каркасні будинки. Каркасна система отримує все більше поширення в приватному житловому будівництві. Це обумовлено простотою монтажу, економічністю і оперативністю будівельного процесу. Однією з найбільш відомих технологій каркасного будівництва є канадська.

Особливість каркасних будинків в тому, що основним несучим елементом виступають каркаси (колони), а не стіни. У той же час в Канаді

та ряді прогресивних європейських країн до 80% приватних будинків побудовані за даною технологією.

Канадська технологія (нарівні зі скандинавської) вважається еталонною. Дотримуючись її принципів, вдається в короткі терміни звести надійний і теплий «каркасник», що не поступається за цим критерієм кам'яному будинку. Основа подібної будови – каркас, що складається з горизонтальних і вертикальних профілів, які з'єднуються між собою за принципом конструктора. Каркас Порожнечі каркасу заповнюють утеплювачем. Конструкція характеризується невеликою вагою, тому під неї можуть монтуватися полегшені фундаменти (стрічковий, стовпчастий або неглибоко заглиблена фундаментна плита). Вибір фундаментів досить широкий і має обов'язково проводитися з урахуванням особливостей ґрунту. За умови відповідного типу фундаменту будинку по канадській технології можна зводити на нестійких ґрунтах із близьким заляганням підземних вод.

Можливість відмовитися від складних, додатково армованих фундаментів, дозволяє 2-3 рази скоротити і спростити процес будівництва, зменшити кошторис.

Розроблена і застосована в країнах Північної Америки технологія підходить також і для будівництва в кліматичних умовах України. Будинки характеризуються атмосферостійкістю, протистоять ураганному вітрі, не бояться морозів. Вони підходять навіть для зведення в сейсмічно активних районах.

Серед мінусів виділяється горючість елементів каркасу, оскільки за своєю пожежною безпекою будинки подібні дерев'яним спорудам. Знизити небезпеку загоряння дозволяє обробка поверхонь антипіреном, використання в якості зовнішньої обробки штукатурки або покриттів з вогнестійких матеріалів

При дотриманні технології будівництва і використання якісних матеріалів термін служби будови сягає 50-70 років.

Зведення будинків за канадською технологією включає в себе наступні етапи: заливка фундаменту; зведення каркасу; обшивка стін; установка покрівлі; монтаж вікон і дверей; інженерні мережі; утеплення; фінальні оздоблювальні роботи.

Використовуючи канадську технологію, можна зводити практично будь-який будівельний об'єкт: житловий будинок(рис. 2, 3), міні-готель, кафе чи магазин.



Рис.2. Приклад “класичного” житлового будинку зведеного за канадською технологією



Рис.3. Приклад “сучасного” житлового будинку зведеного за канадською технологією

Будинки з СІП(SIP)-панелей. Більш дорогим, але простим у збірці є будинок за каркасно-щитовою технологією або із СІП-панелей. Такі конструкції збирають з готових (виготовлених в заводських умовах) щитів. Для кожної ділянки об'єкта передбачений власний комплект щитів – стінові панелі з різними комунікаціями, дверними і віконними прорізами. Ці елементи досить об'ємні і важкі, провести збірку своїми силами не вдасться, тому необхідний кран.

В основі панелей – OSB листи. Виробник почергово прокладає лист, клейовий шар і утеплювач (пінопласт), отримуючи в результаті міцний матеріал, що володіє високими теплоізоляційними властивостями. СІП-панелі мають особливу конструкцію і сполучні вузли, завдяки чому можливо як каркасне, так і безкаркасне будівництво. На відміну від вироблених на заводі панелей, СІП-аналогії мають менші розміри (зазвичай 2,5 на 1,22 м) і вага (1 м² стіни чи важить більше 20 кг), що дозволяє монтувати їх власноруч.

Серед найбільш поширених фундаментів під такі конструкції – стрічковий, пальовий, стовпчастий або плитний фундаменти. Зведення стін починається з організації нижньої об'язки, після яких виставляються кутові стійки, потім – проміжні стійки, і після виробляється верхня об'язка.

Можна також зібрати каркас на землі, після чого за допомогою крану слід підняти його до основи і закріпити. Цей метод зручніше, але він вимагає наявності помічників та залучення будівельної техніки.

На готовий каркас фіксуються стінові панелі (при необхідності вони утеплюються мінераловатними матеріалами), організовується кровляна покрівельна система (найчастіше це двоххилий чи мансардні дахи), виконується обшивка покрівлі.

На користь будівництва сіп-будинків говорять такі аргументи, як: мала вага конструкцій; мінімальні терміни будівництва; всесезонність будівництва; простота складання; мінімум шкоди природі і забруднень в процесі робіт; відсутність процесу усадки будинку; екологічність і енергоефективність.

Сіп-будинки (рис. 4, 5) зберігають тепло взимку, а прохолоду влітку. Будинки, що зведені за сіп-технологією, не схильні до усадки і змонтовані таким чином, що усі стіни ідеально рівні і готові до обробки. Внутрішні і фасадні оздоблювальні матеріали можуть застосовуватися будь-які, обмежень немає, все залежить від побажань замовника. При виборі оздоблювальних матеріалів слід врахувати декоративну складову - відповідність стилю усього будинку і захисну - стійкість і міцність шару фасадного покриття.

Швидкобудуємі модульні будинки. Модульне будівництво – на сьогодні це вже тренд сучасного життя. Основна ідея модульного будівництва - це виробництво готового будинку на заводі і установка його на обраній ділянці.

Будинок повинен бути зручним, комфортним і його будівництво має бути швидким. Ось головні вимоги сучасного покупця. І модульне будівництво дому в повній мірі відповідає цим вимогам. Україна тільки починає знайомитися з поширеною на Заході технологією будівництва

модульних будинків, яка передбачає повністю заводське виготовлення і складання споруди. Адже такий підхід допоміг би вирішити безліч житлових проблем нашої країни.



Рис.4. Приклад житлового будинку зведеного з СПП-панелей



Рис.5. Приклад житлової будівлі міні-готелю зведеної з СПП-панелей

Об'ємно-модульне малоповерхове домобудівництво виникло у нас десь 10-15 років тому. В основі більшості способів швидкого малоповерхового будівництва лежить щитовий або панельний принцип: на об'єкт доставляють комплект великоформатних деталей стін і перекриттів, збирають будинок «начорно», що займає від 2 тижнів до 1,5 міс, далі приступають до обробки і монтажу інженерного обладнання.

При об'ємно-модульній технології основні будівельні операції, включаючи обробку, прокладку кабелів і труб, монтаж сантехніки, освітлювального та опалювального обладнання, здійснюються на заводі. Деякі компанії, слідуючи західній традиції, оснащують свої будинки навіть вбудованими меблями і побутовою технікою. Готові модулі, в кожному з яких може бути від половини кімнати до трьох ізольованих приміщень, привозять на вантажних платформах і переносять краном на заздалегідь підготовлений фундамент. Потім йде експрес-монтаж, що займає від двох до десяти днів.

Можливість транспортування модульних будинків обумовлена їх конструктивними особливостями. У більшості випадків площа модулів не перевищує 45 м² (рис.6), а форма елементів визначається параметрами вантажного автомобіля: модулі є витягнутим паралелепіпедом з поперечною шириною корпусу 3-4 м. При цьому, ширину, висоту і, відповідно, площу модульного будинку можна збільшити шляхом приєднання нових модулів. Утримати форму під час транспортування і при підйомі краном допомагає жорстка металева рама модульного будинку. Основну частину об'єму стін заповнює утеплювач, що забезпечує легку вагу будівель і чудові показники енергоефективності.

Модульні будинки (рис.7) можна монтувати без спеціально облаштованого заглибленого фундаменту - на стовпчасті опори або навіть просто на вирівняний майданчик. Установка і підключення модульного будинку до комунікацій займає всього один день.



Рис.6. Приклад малогабаритного модульного житлового будинку



Рис.7. Приклад модульного житлового будинку

Переваги та недоліки модульних будинків. Хоча спосіб виробництва модульних будинків нагадує каркасну технологію (будівля збирається на основі каркасу з утеплювачем), тут все ж є і немало відмінностей. Передусім, найважливішою перевагою модульної технології є відсут-

ність будівельних процесів на ділянці (хоча інженерні комунікації до будинку провести все ж доведеться). Швидкість виробництва будинку може навіть перевищити каркасне будівництво і у більшості випадків обмежується 7-8 тижнями з дня купівлі проекту модульного будинку.

Замість облаштування фундаменту в даному випадку досить встановити спеціальні опори для модулів або розчистити ділянку і зробити гравійну подушку завтовшки близько 200 мм. На зведення конструкції не потрібне отримання дозвільної документації (хоча зареєструвати будинок як нерухомість, за бажанням, можна).

При цьому можливість сполучення модулів відкриває додаткові переваги. Планування не обов'язково має бути витягнутим, а цілком може бути традиційно квадратним (у тому числі з терасою, яку роблять між окремими модулями (рис.8)). Сам будинок, як вже говорилося, можна у будь-який момент збільшити.

До мінусів модульних будинків відносять менший термін служби порівняно з каркасними конструкціями (до 50 років), неможливість облаштування підвалу і конструктивні обмеження окремих виробників. Так, використати модулі в якості другого поверху можна далеко не завжди, а максимальна площа збірних конструкцій частенько обмежується 150-180 м².

Рис.8. Приклад модульної будівлі міні-готелю

Середня вага будинку на основі одного модуля складає 4-7 тонн, і для його перевезення знадобиться низькорамна платформа. Збільшити обсяг витрат може віддаленість ділянки від місця виробництва модульної конструкції і відсутність під'їзних шляхів до місця установки.

Модульні будинки не відрізняються найвищим рівнем естетичного дизайну, проте, враховуючи їх порівняно невисоку вартість, економічність і сучасний високотехнологічний стиль оформлення, вони досить затребувані та зручні.

Будинки контейнерного типу. Подібний тип будівництва тільки набирає популярність, що пов'язано з малою обізнаністю населення. Невелика вартість будівлі – одне з головних достоїнств будинку з контейнерів. Країни СНД не є активним користувачем даного рішення для побудови житла. А ось за кордоном все частіше використовують це проектне рішення, і попит на такі споруди отримав навіть окрему гілку для ведення бізнесу на ринку будівництва нерухомості. Так, є організації, які займаються проектуванням, а також виготовленням на фабриці заготовок для майбутніх будинків, за основу яких взято контейнер. Ними виступають підготовлені модулі із закладеною проводкою електричних систем, опаленням, заготівлею підлог, а також стін, вже є двері і вставлені вікна. Будинок з контейнерів можна побудувати своїми руками або купити вже готовий. Такі практично готові модулі поставляються на місце будівництва, потім повністю збираються у споруду згідно з розробленим проектом. Застосування такого роду заготовок значно економить час та кошти власників житла. Цей напрямок включає послуги з проектування та будівництва будинків з контейнерів під ключ, так званих «конструкцій-напівфабрикатів».

Напівфабрикатом називається модель, яка використовується в якості основи для будівництва будівлі. У більшості випадків використовують 20-ти футовий морський контейнер з визначеними розмірами (рис.9). Ця конструкція виготовляється на фабриці, вона має чорнову підлогу і стіни. Крім цього стандартна комплектація напівфабрикату включає додаткові системи та елементи: віконні конструкції; електричну проводку; двері; систему опалення. Після вибору певного проекту власнику земельної ділянки залишиться лише купити вантажні морські контейнери в необхідній кількості. Вони доставляються на будівельний майданчик, де згодом будуть об'єднані в одну споруду(рис.10).

Використання таких моделей дозволяє істотно скоротити терміни будівництва будинку, що є одним з найбільш вагомих переваг даної технології.

Будівництво житла на земельній ділянці виконується поетапно. Оскільки будівля не потребує складного фундаменту, всі роботи можна виконати самостійно. Основні етапи будівництва:



розробка проекту; облаштування фундаментної частини будівлі; установка контейнерів; покрівельні роботи; монтаж утеплювача; внутрішні і зовнішні оздоблювальні роботи.



Рис.9. Розмірні параметри 20-футового морського контейнера



Рис.10. Приклад двоповерхового житлового будинку з різнокольорових морських контейнерів

Дана технологія не обмежується певними кліматичними умовами. При наявності відповідної теплоізоляції будинок з контейнерів можна зводити практично в будь-яких широтах.

Будинки з використанням технологій 3D-друку. На сьогодні технології 3D-друку розвиваються доволі швидко та використовуються у різних сферах людства.

Одна з причин зростання популярності будівельної 3D-друку - економія тимчасових і фінансових витрат. Маючи під рукою апарат для 3D-друку, можна істотно скоротити швидкість зведення будівлі, витрата будівельного матеріалу і витрати на логістику, а також обійтися без великого числа робочих рук - досить мати операторів, що відповідають за експлуатацію 3D-принтера.

Друга причина - широкі можливості для дизайнерських рішень. Будинки, зведені за допомогою 3D-принтера, нерідко дуже сильно відрізняються від традиційних квадратних коробок.

В сучасних умовах 3D-друк ідеально підходить для будівництва будинків в дачних селищах, будинків низькою поверховості і котеджів. 3D-друк підходить як для масової забудови, так і для індивідуальної. Переваги одні і ті ж - простота, швидкість, відсутність людського фактора на будівництві, що не так важливо.

Наявні на сьогодні будівельні 3D-принтери відрізняються конструкціями та методами зведення стін. Найбільш часто зустрічаються принтери порталної конструкції (рис.11), двота чотирьох опорної конструкції, на базі руки-маніпулятора або циркульної конструкції. Обладнання дозволяє створювати малі архітектурні форми та елементи споруджень для подальшої їх збірки на місці, чи дозволяють друкувати цілу будівлю на будівельному майданчику. Висота та розмір друкованого будинку залежать від технічних характеристик використаного принтера (рис.12).



Рис.11. Будівельний 3D-принтер порталного типу "АМТ" S-300



Рис.12. Технологія зведення двоповерхового житлового будинку методом 3D-друку

Американська некомерційна благодійна організація з Кремнієвої долини New Story протягом 2018 р. інвестувала 9 млн доларів спочатку в start-up проект, а згодом – у повноцінну будівельну компанію ICON (м. Остін, штат Техас), з метою 3D-друку доступних житлових будинків площею близько 60 м² (рис.13) для малозабезпечених верств населення (або постраждалих від природних катаклізмів) спочатку Латинської Америки (серед першочергових країн значаться Гаїті, Сальвадор, Болівія, Мексика), а згодом – всього світу із залученням інших некомерційних організацій та урядів країн. Вартість одного будинку, що оснащений усіма мінімальними для життя зручностями (вікна, двері, водопровід, каналізація, сантехніка, електрика) і складається з вітальні, однієї спальної кімнати, невеличкого робочого простору (кабінету), ванної кімнати, оцінюється всього в 4000 доларів.

Будівництво відбувається за допомоги 3D принтеру Vulcan розробки компанії ICON (рис.14), що представляє собою стаціонарну модульну платформу (на відміну від самохідного 3D-принтера The CyBe RC 3Dp), розміщену на рейках. 3D-принтер Vulcan «друкує» будівельною сумішшю, що розроблена саме для нього, об'єкти розміром 6.1 м завширшки, 3.35 м заввишки та необмеженої довжини, оскільки переміщується по рейках та може бути переставлений на нове місце. Вага такого 3D-принтера складає приблизно 900 кг, його можна завантажити в автомобіль та легко перевезти та встановити на будівельному майданчику.



Рис.13. Житловий будинок пл. 60 м² компанії ICON збудований методом 3D-друку



Рис.14. 3D-принтер Vulcan розробки компанії ICON

Виготовлення конструкцій 3D-принтером відкриває більші можливості для підприємств будівельної та схожих сфер. Практичне застосування виявило наступні переваги адитивного виробництва:

- знімає обмеження з уяви дизайнерів та архітекторів, бо дає можливості, не доступні при будівництві звичними нам методами;
- висока швидкість будівництва будівель та інших споруд;
- повна автоматизація процесу;
- низькі енерговитрати обладнання;
- значна економія проти класичних методів будівельних робіт внаслідок зниження витрат на оплату праці персоналу та енергоресурси та збільшення термінів будівництва;
- повністю виключається утворення відходів будівельних матеріалів;
- мінімізація людського втручання в процес будівництва не лише дозволяє будувати в недоступних для людей місцях, але й на звичних територіях нівелює людський фактор та зменшує ймовірність помилки.

3D-друк дозволяє на 60 відсотків знизити використання матеріалів, на 70 відсотків - часу і на 80 відсотків - праці в порівнянні зі звичайним процесом будівництва. Як друківаного матеріалу використовується суміш будівельного щебеню, промислових відходів, цементу і затверджувача. При цьому перевитрата виключений: при друку будинків використовується тільки необхідну кількість будівельних матеріалів.

Висновки. В останні роки в Україні будівельний ринок розвивається дуже високими темпами. Проте швидкість впровадження перспективних сучасних технологій, що оптимізують процеси будівництва, залишає бажати кращого. Основними причинами, що заважають широко-

му розповсюдженню новинок, фахівці називають консерватизм споживачів, відсутність нормативної бази, дефіцит проєктувальників, лобізм виробників традиційних матеріалів, недолік інвестицій.

Вітчизняний досвід зведення малоповерхових житлових будинків достатньо відрізняється від закордонного. В цілому ж для зняття гостроти житлової проблеми, поліпшення якості міського середовища та розвитку широкої житлової демократії такий досвід потребує більш активної адаптації та впровадження як в країні в цілому, так і до умов м. Кривого Рогу.

Список літератури

1. **Черенько Л.М.** Житлові умови населення України та вибір пріоритетних напрямів житлової політики // Демографія та соціальна економіка. – 2018. – № 1 (32). – С.126–139. – <https://doi.org/10.15407/dse2018.02.126>
2. **Гирич В.Ю.** Аналіз досвіду проєктування та будівництва енергоефективних та екологічно безпечних будинків у Швеції. Будівництво України. 2009. № 1–2. С. 29–33.
3. **Рабінська О.П.** Ефективні енергозберігаючі конструкції малоповерхових житлових будинків. Містобудування та територіальне планування: наук.-техн. зб. Київ. 2012. Вип. 45, Ч. 2. С. 159–163.
4. **Дьяченко Л.Ю.** Особливості зведення швидкопоруджуваних малоповерхових будівель із блок-модулів в Україні / Дьяченко Л.Ю., Дьяченко О.С., Малащенко А.С. // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2016. – № 2. – с. 69–74.
5. **Мироненко В.П.** Мобильное жилье как функционально-типологическая разновидность индустрии современного домостроения / В.П. Мироненко, Т.А. Цымбалова // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – № 7-8. – с. 55–70
6. **Андрійчук О.В.** Застосування технології 3D-друку в будівництві / О.В. Андрійчук, П.Я. Оласюк // Сучасні технології та методи розрахунку в будівництві. – Вип. 3. – 2015. – С. 11–18.
7. Нужно ли экономить на каркасном строительстве? [Електронний ресурс].]. – Режим доступу: <https://eurohouse.ua/blog/nuzhno-li-ekonomit-na-karkasnom-stroitelstve>
8. Дома по канадской технологии [Електронний ресурс].]. – Режим доступу: <http://fb.ru/article/138871/doma-po-kanadskoy-tehnologii-otzyivi-kanadskaya-tehnologiya-stroitelstva-karkasnyih-domov>
9. Сип-панели. [Електронний ресурс].]. – Режим доступу: <http://budmaydan.com/dom/chto-takoe-sip-panel/>
10. Плюси та мінуси сучасних технологій будівництва. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://stroyobzor.ua/news/89660.html> (дата звернення: 28.03.2019)
11. 3D-принтери для будівництва будинків: міф чи реальність? [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.dialogue.center/blog/3d-pryntery-dlia-budivnytstva-budynkiv-mif-chy-realnist/>
12. 3D-принтер Vulcan «друкує» будинки вже сьогодні! [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pro3d.com.ua/a396324-druk-budinkiv.html>

Рукопис подано до редакції 13.05.2020

АНОТАЦІЇ

УДК 621.7.022.6

Моркун В.С., Кравченко О.М. Моделювання параметрів ультразвукового поля в процесі очищення виробів складної конфігурації

Мета. З допомогою моделювання визначити, як змінюється значення акустичного тиску, отримане датчиком, в процесі ультразвукового очищення виробів різної конфігурації з забрудненням різної товщини та щільності.

Методи дослідження. Моделювання за допомогою наявних програмних засобів імітації розповсюдження високоінтенсивних ультразвукових хвиль.

Наукова новизна. На основі побудованої моделі процесу ультразвукового очищення встановлено залежність між ультразвуковим відгуком датчика та ступеню забрудненості тіла.

Практична значимість. Встановлено залежності між щільністю і товщиною забруднення та ультразвуковим відгуком, що отримує датчик, для тіл різної конфігурації. Шляхом аналізу отриманих даних сформовано загальний висновок щодо залежності між забрудненням та ультразвуковим віддзеркаленням для будь-якої конфігурації очищувального тіла.

Результати. Під час аналізу отриманих даних виявлено наступні закономірності: у процесі очищення тіла правильної форми із забрудненням високої щільності простежується стабільне збільшення максимального відхилення акустичного тиску при зменшенні товщини наявного забруднення. Коли щільність забруднення невисока, то починають спостерігатися додаткові акустичні сплески, що обумовлені віддзеркаленням і від виробу, що очищується. Очищення тіла з геометричними особливостями не має такої ж стабільної картини щодо збільшення амплітудного відхилення в одному напрямку осі, але все ще можна спостерігати зростання різниці між максимальним та мінімальним значеннями акустичного тиску. Отже, для визначення ступеню забруднення об'єкта, а, відповідно, і необхідності продовжувати процес ультразвукового очищення можна враховувати максимальне відхилення акустичного тиску та кількість значних відхилень. Є сенс продовжувати ультразвукове очищення, поки відбувається зміна акустичного тиску, при цьому зосереджуючи найінтенсивніший вплив на ділянках, де спостерігається найбільше зростання амплітудних відхилень. Очищене тіло буде мати найбільший за різницею амплітуд сигнал та найменшу наявність дисперсійних відхилень.

Ключові слова: ультразвукове поле, акустичний тиск, моделювання, ультразвукове очищення.

Моркун В.С., Кравченко О.М. Моделирование параметров ультразвукового поля в процессе очистки изделий сложной конфигурации

Цель. С помощью моделирования определить, как меняется значение акустического давления, полученное датчиком, в процессе ультразвукового очистки изделий различной конфигурации с загрязнением разной толщины и плотности.

Методы исследования. Моделирование с помощью имеющихся программных средств имитации распространения высокоинтенсивных ультразвуковых волн.

Научная новизна. На основе построенной модели процесса ультразвукового очистки установлена зависимость между показаниями ультразвукового датчика и степенью загрязненности тела.

Практическая значимость. Установлено зависимости между плотностью и толщиной загрязнения и ультразвуковым откликом, который получает датчик, для тел различной конфигурации. Путем анализа полученных данных сделан общий вывод относительно зависимости между загрязнением и ультразвуковым отражением для любой конфигурации очищаемого тела.

Результаты. Во время анализа полученных данных выявлены следующие закономерности: в процессе очистки тела правильной формы с загрязнением высокой плотности прослеживается стабильное увеличение максимального отклонения акустического давления при уменьшении толщины имеющегося загрязнения. Когда плотность загрязнения невысокая, то начинают наблюдаться дополнительные акустические всплески, обусловленные отражением и от загрязнения, и от очищаемого изделия. Очистка тела с геометрическими особенностями не имеет такой же стабильной картины по увеличению амплитудного отклонения в одном направлении осей, но можно наблюдать рост разницы между максимальным и минимальным значениями акустического давления. Итак, для определения степени загрязнения объекта, а, соответственно, и необходимости продолжать процесс ультразвукового очищения можно учитывать максимальное отклонение акустического давления и количество значительных отклонений. Есть смысл продолжать ультразвуковую очистку, пока происходит смена акустического давления, при этом сосредотачивая самый интенсивный влияние на участках, где наблюдается наибольший рост амплитудных отклонений. Очищенное тело будет иметь наибольший за разницей амплитуд сигнал и наименьшее наличие дисперсионных отклонений.

Ключевые слова: ультразвуковое поле, акустическое давление, моделирование, ультразвуковая очистка.

Morkun V.S., Kravchenko O.M. Modelling of the ultrasonic field parameters in cleaning products of complex configuration

Purpose. Definition how the value of the acoustic pressure, which obtained by the sensor, in the ultrasonic cleaning process of products of various configuration with contamination with various thickness and density.

Research method. Modeling using available software to simulate the propagation of high-intensity ultrasonic waves.

Scientific novelty lies in establishing the relationship between the ultrasonic response of the sensor and the degree of contamination of the body, based on the model of the ultrasonic cleaning process.

Practical value. The relationship between the density and the thickness of the contamination and the ultrasonic response received by the sensor is established for bodies of various configuration. By analyzing the obtained data, a general conclusion was drawn regarding the relationship between contamination and ultrasonic reflection for any configuration of the treatment body.

Results. The analysis of the obtained data revealed the following regularities: in the process of cleaning the body with simple configuration with high density contamination, a steady increase in the maximum deviation of the acoustic pressure is

observed while reducing the thickness of the existing contamination. When the density of contamination is low, additional acoustic bursts due to the reflection of both the dirt and the cleaning product. Cleaning a body with geometric features does not have the same stable picture of increasing the amplitude deviation in one axis direction, but the difference between the maximum and minimum acoustic pressure can still be observed. Therefore, to determine the degree of contamination of the object, and, accordingly, the need to continue the process of ultrasonic cleaning can take into account the maximum deviation of the acoustic pressure and the number of significant deviations. It makes sense to continue ultrasonic cleaning as long as there is a change in acoustic pressure, while concentrating the most intense influence on the areas where the greatest increase in amplitude deviations is observed. The purified body will have the largest signal amplitude difference and the least dispersion available.

Key words: ultrasonic field, acoustic pressure, modeling, ultrasonic cleaning.

УДК 699.865:692.23

Тимофєєв М.В., Шамріна Г.В., Хохрякова Д.О. Обґрунтування вибору збірних систем зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Outdoor за умов забезпечення енергоефективності будівлі

Мета. Визначення областей можливого застосування збірних систем зовнішніх стін із використанням цементної плити КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor на основі відповідності їх приведеного опору теплопередачі мінімальним нормативним вимогам України, що встановлюються при розрахунках енергоефективності будівель.

Методи дослідження. Чисельне моделювання двовірних температурних полів та теплових потоків з використанням програми THERM 7.5, аналітичні розрахунки енергетичних та теплотехнічних показників.

Наукова новизна. Обґрунтовано можливість застосування в кліматичних умовах України конструктивних рішень збірних систем зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor на основі системного принципу, що пов'язує теплотехнічні розрахунки окремої конструкції з розрахунками енергоефективності будівлі.

Практична значимість. Результати розрахунків чисельних значень лінійних коефіцієнтів теплопередачі збірних систем зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor і вузлових з'єднань для каркасно-монолітних будівель включені до змін в ДСТУ Б В.2.6-189:2013 «Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель». Зміна №1. Результати приведених у статті досліджень дозволяють значно спростити вибір конструкції зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor на стадії прийняття проєктних рішень.

Результати. Встановлено, що прийняті на основі європейської практики конструктивні рішення збірних систем зовнішніх стін з використанням цементних плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor з найбільш типовими конструктивними елементами каркасно-монолітної будівлі можуть бути застосовані лише у промислових (сільськогосподарських) будівлях, оскільки їх приведені опори теплопередачі не відповідають вимогам ДБН В.2.6-31:2016, що встановлюються при розрахунках енергоефективності житлових і громадських будівель. При доробці найбільш тепловитратних вузлових з'єднань (примикання перекриття до зовнішньої стіни з неповним її обпиранням на залізобетонну плиту; примикання внутрішніх вертикальних конструкцій (колона) до зовнішньої стіни) можливе застосування в житлових і громадських будівлях з прогнозованим нормативним значенням рівня енергоефективності «С».

Ключові слова: приведенний опір теплопередачі, лінійний коефіцієнт теплопередачі, збірні системи зовнішніх стін, плита КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor.

Тимофєєв Н.В., Шамріна Г.В., Хохрякова Д.А. Обоснование выбора сборных систем наружных стен с использованием цементных плит КНАУФ AQUAPANEL® Outdoor при условии обеспечения энергоэффективности здания

Цель. Определение областей возможного применения сборных систем наружных стен с использованием цементной плиты КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor на основе соответствия их приведенного сопротивления теплопередаче минимальным нормативным требованиям Украины, устанавливаемых при расчетах энергоэффективности зданий.

Методы исследования. Численное моделирование двумерных температурных полей и тепловых потоков с использованием программы THERM 7.5, аналитические расчеты энергетических и теплотехнических показателей.

Научная новизна. Обоснована возможность применения в климатических условиях Украины конструктивных решений сборных систем наружных стен с использованием цементных плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor на основе системного принципа, что связывает теплотехнические расчеты отдельной конструкции с расчетом энергоэффективности здания.

Практическая значимость. Результаты расчетов численных значений линейных коэффициентов теплопередачи сборных систем наружных стен с использованием цементных плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor и узловых соединений для каркасно-монолитных зданий включены к изменениям в ДСТУ Б В.2.6-189: 2013 «Методы выбора теплоизоляционного материала для утепления зданий». Изменение №1. Результаты приведенных в статье исследований позволяют значительно упростить выбор конструкции наружных стен с использованием цементных плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor на стадии принятия проектных решений.

Результаты. Установлено, что принятые на основе европейской практики конструктивные решения сборных систем наружных стен с использованием цементных плит КНАУФ AQUAPANEL® Cement Board Outdoor с наиболее типичными конструктивными элементами каркасно-монолитного здания могут быть применены только в промышленных (сельскохозяйственных) зданиях, поскольку их приведенные сопротивления теплопередаче не соответствуют требованиям ДБН В.2.6-31: 2016, устанавливаемых при расчетах энергоэффективности жилых и общественных зданий. При доработке наиболее теплотратных узловых соединений (примыкание перекрытия к наружной стене с неполным ее опиранием на железобетонную плиту; примыкание внутренних вертикальных конструкций (колонна) к наружной стене) возможно применение в жилых и общественных зданиях с прогнозируемым нормативным значением уровня энергоэффективности «С».

Ключевые слова: приведенное сопротивление теплопередаче, линейный коэффициент теплопередачи, сборные системы наружных стен, плита KNAUF AQUAPANEL® Cement Board Outdoor.

Tymofieiev M.V, Shamrina G.V, Khokhriakova D.O. Justification of the choice of assembled exterior wall systems using KNAUF AQUAPANEL® Outdoor cement slabs in calculating the building's energy efficiency

Purpose. Determining the range of possible applications of assembled exterior wall systems using the KNAUF AQUAPANEL® Cement Board Outdoor based on the compliance of their reduced heat transfer resistance with the minimum regulatory requirements of Ukraine, established when the energy efficiency of the buildings is determined.

Research methods. Numerical simulation of two-dimensional temperature fields and heat flow rate using the THERM 7.5 program, analytical calculations of energy performance and thermal engineering indicators.

Scientific novelty. The suitability constructive solutions of assembled exterior wall systems using the KNAUF AQUAPANEL® Cement Board Outdoor based on the system principle, which connects the thermal engineering calculation of a separate construction with the calculation of the building's energy efficiency, is justified under the climatic conditions of Ukraine.

Practical value. The calculation results of linear thermal transmittance of assembled exterior wall systems and construction details using KNAUF AQUAPANEL® Cement Board Outdoor for frame-monolithic buildings are included in the changes to DSTU B V.2.6-189: 2013 "Methods for choosing of insulation material for insulation of buildings". Change No. 1. The results of the research can significantly simplify the choice of exterior wall construction using cement panels KNAUF AQUAPANEL® Cement Board Outdoor at the stage of design.

Results. It was established that the structural solutions adopted on the basis of European practice for assembled exterior wall systems using KNAUF AQUAPANEL® Cement Board Outdoor with the most typical structural elements of a frame-monolithic building can only be used in industrial (agricultural) buildings, since their reduced resistance heat transfer does not meet the requirements of DBN V.2.6-31:2016, established in the calculation of energy efficiency of residential and public buildings. When finalizing the most heat-consuming construction details (connection with structural floor; connection with column), it is possible to use it in residential and public buildings with the predicted standard values of the energy efficiency level "C".

Key words: reduced resistance heat transfer, linear thermal transmittance, thermal bridges, assembled system of exterior wall, AQUAPANEL® Cement Board Outdoor.

УДК 681.5.08:622.412.13

Алексеев М.О., Голинько О.В. Автоматичний контроль чутливості датчиків стаціонарних термокаталітичних аналізаторів метану

Мета. Підвищення надійності контролю вибухонебезпечності рудникової атмосфери та зменшення витрат на обслуговування стаціонарних аналізаторів метану а рахунок застосування автоматичної діагностики та корегування чутливості первинних перетворювачів стаціонарних термокаталітичних аналізаторів метану.

Методи дослідження. Для вирішення цього завдання використано: наукове узагальнення раніше виконаних досліджень; теоретичний аналіз газодинамічних і теплових процесів в термокаталітичних первинних перетворювачах аналізаторів метану; експериментальні дослідження зміни характеристик датчиків аналізаторів з подвійним дифузійним фільтром при зниженні чутливості термоелементів під впливом різних факторів.

Наукова новизна Полягає в розробці та обґрунтуванні нового метода автоматичного контролю та регулювання чутливості первинних перетворювачів стаціонарних аналізаторів метану, який полягає в аналізі зміни вихідних характеристики перетворювачів на дільниці виходу вихідної напруги вимірювального моста на горизонтальну частину (плато) характеристики при зміні величини струму через чутливі елементи.

Практичне значення. Теоретичні та експериментальні дослідження дозволили вдосконалити алгоритм і програму роботи стаціонарного аналізатора метану, реалізованого на базі мікропроцесора ATMEGA8, що дозволяє здійснювати автоматичний контроль і корегування чутливості первинних перетворювачів аналізаторів, шляхом управління електроживленням чутливих елементів перетворювачів та аналізу зміни їх вихідних характеристик.

Результати. Виконані дослідження дозволили обґрунтувати метод автоматичної діагностики стану стаціонарних термокаталітичних аналізаторів метану в частині автоматичного дистанційного контролю чутливості первинних перетворювачів. Показано, що при використанні сучасних мікропроцесорних засобів обробки інформації є можливість не тільки автоматично перевіряти стабільність чутливості первинних перетворювачів, а і здійснити корегування показань газоаналізатора при зміні чутливості. Для реалізації результатів досліджень розроблено алгоритм і програму роботи аналізатора з функцією автоматичного дистанційного контролю чутливості датчиків метану.

Ключові слова: вугільні шахти, вміст метану, контроль, аналізатор, автоматична діагностика, первинні перетворювачі, чутливість.

Алексеев Н.А., Голинько А.В. Автоматический контроль чувствительности датчиков стационарных термокаталитических анализаторов метана

Цель. Повышение надежности контроля взрывоопасности рудничной атмосферы и уменьшение расходов на обслуживание стационарных анализаторов метана путем применения автоматической диагностики и корректировки чувствительности первичных преобразователей стационарных термокаталитических анализаторов метана.

Методы исследования. Для решения этой задачи использованы: научное обобщение ранее выполненных исследований; теоретический анализ газодинамических и тепловых процессов в термокаталитических первичных преобразователях анализаторов метана; экспериментальные исследования изменения характеристик датчиков анализаторов с двойным диффузным фильтром при снижении чувствительности термоэлементов под влиянием различных факторов.

Научная новизна. Заключается в разработке и обосновании нового метода автоматического контроля и регулирования чувствительности первичных преобразователей стационарных анализаторов метана, который заключается в анализе изменения выходных характеристик преобразователей на участке выхода выходного напряжения измерите-

льного моста на горизонтальную часть (плато) характеристики при изменении величины тока через чувствительные элементы.

Практическое значение. Теоретические и экспериментальные исследования позволили усовершенствовать алгоритм и программу работы стационарного анализатора метана, реализованного на базе микропроцессора ATMEGA8, что позволяет осуществлять автоматический контроль и корректировку чувствительности первичных преобразователей анализаторов, путем управления электропитанием чувствительных элементов преобразователей и анализа изменения их выходных характеристик.

Результаты. Выполненные исследования позволили обосновать метод автоматической диагностики состояния стационарных термокаталитических анализаторов метана в части автоматического дистанционного контроля чувствительности первичных преобразователей. Показано, что при использовании современных микропроцессорных средств обработки информации есть возможность не только автоматически проверять стабильность чувствительности первичных преобразователей, а и осуществить корректировку показаний газоанализатора при изменении чувствительности. Для реализации результатов исследований разработан алгоритм и программа работы анализатора с функцией автоматического дистанционного контроля чувствительности датчиков метана.

Ключевые слова: угольные шахты, содержание метана, контроль, анализатор, автоматическая диагностика, первичные преобразователи, чувствительность.

Alekseev M.O., Holinko O.V. Automatic sensitivity control of sensors of stationary thermo catalytic methane analyzers

Purpose. Improving the reliability of explosion hazard control of the mine atmosphere and reducing the cost of maintenance of stationary methane analyzers through the use of automatic diagnostics and sensitivity adjustment of primary transducers of stationary thermo catalytic methane analyzers.

Research methods. To solve this problem used: scientific generalization of previously performed research; theoretical analysis of gas-dynamic and thermal processes in thermo catalytic primary converters of methane analyzers; experimental researches of change of characteristics of sensors of analyzers with the double diffusion filter at decrease in sensitivity of thermo elements under the influence of various factors.

Scientific novelty is to develop and substantiate a new method of automatic control and sensitivity control of primary transducers of stationary methane analyzers, which is to analyze the change of output characteristics of transducers at the output voltage of the measuring bridge to the horizontal part (plateau) characteristics when changing current elements through sensitive elements.

Practical value. Theoretical and experimental studies have improved the algorithm and program of a stationary methane analyzer based on ATMEGA8 microprocessor, which allows automatic control and adjustment of the sensitivity of primary analyzers by controlling the power supply of sensitive elements of the converters and analysis of changes in their output characteristics.

Results. The performed researches allowed to substantiate the method of automatic diagnostics of the state of stationary thermo catalytic methane analyzers in the part of automatic remote control of sensitivity of primary converters. It is shown that when using modern microprocessor information processing means it is possible not only to automatically check the stability of the sensitivity of the primary transducers, but also to adjust the readings of the gas analyzer when the sensitivity changes. To implement the research results, an algorithm and a program of the analyzer with the function of automatic remote control of the sensitivity of methane sensors have been developed.

Key words: coal mines, methane content, control, analyzer, automatic diagnostics, primary converters, sensitivity.

УДК 622.271.4:622.271.32-027.235

Луценко С.А., Жуков С.А., Григорьев Ю.И. Методика определения объемов вскрышных работ обеспечивающих в карьере нормальные условия для добычи полезного ископаемого

Цель. Усовершенствовать научно-методическую базу в области проектирования и планирования открытых горных работ путем разработки методов определения объемов вскрышных работ, обеспечивающих в карьере нормальные условия добычи полезного ископаемого при изменении его производительности, которые должны учитывать взаимосвязь параметров системы разработки, исходя из условия обеспечения нормативного объема готовых к выемке запасов.

Методы исследования. При определении отставания вскрышных работ необходимо учитывать взаимосвязь ширины рабочей площадки и длины активного фронта горных работ, которые обеспечивают в карьере необходимый объем готовых к выемке запасов. Выведены формулы для определения текущих коэффициентов вскрыши при расширении рабочих площадок, а также объемов задолженности по вскрыше.

Научная новизна. При снижении производительности карьера по руде уменьшение коэффициента вскрыши достигается за счет уменьшения ширины рабочих площадок вследствие чего верхние горизонты (вскрышные) имеют меньшую скорость горизонтального подвигания, чем нижние горизонты (рудные). Несоответствие фактической длины активного фронта горных работ длине фронта принятой при определении максимально возможной производительности карьера по руде и составлении перспективного календарного плана горных работ без учета взаимосвязи ширины рабочей площадки и длины активного фронта горных работ, обеспечивающих норматив готовых к выемке запасов приводит к нарушению равенства скоростей перемещения рудных и нерудных уступов.

Практическая значимость. Усовершенствована методика определения объемов вскрышных работ, обеспечивающих в карьере нормальные условия добычи полезного ископаемого при изменении его производительности. Применение методики возможно, как в случае вовлечения в разработку одного, так и нескольких участков рабочей зоны карьера.

Результаты. Выведены формулы для определения текущих коэффициентов вскрыши, а также объемов задолженности по вскрыше при снижении производительности карьера по руде.

Ключевые слова: железорудные карьеры, вскрышные работы, коэффициент вскрыши, рабочая площадка уступа, опережение вскрышных работ, ширина рабочей площадки.

Луценко С.О., Жуков С.О., Григор'єв Ю.І. Методика визначення обсягів розкривних робіт, що забезпечують в кар'єрі нормальні умови для видобування корисних копалин

Мета. Удосконалити науково-методичну базу в області проектування і планування відкритих гірничих робіт шляхом розробки методів визначення обсягів розкривних робіт, що забезпечують в кар'єрі нормальні умови видобутку корисних копалин при зміні його продуктивності, які повинні враховувати взаємозв'язок параметрів системи розробки, виходячи з умови забезпечення нормативного обсягу готових до виймання запасів.

Методи дослідження. При визначенні відставання розкривних робіт необхідно враховувати взаємозв'язок ширини робочого майданчика і довжини активного фронту гірничих робіт, які забезпечують в кар'єрі необхідний обсяг готових до виймання запасів. Виведені формули для визначення поточних коефіцієнтів розкриву при розширенні робочих майданчиків, а також обсягів заборгованості за розкривом.

Наукова новизна. При зниженні продуктивності кар'єру за рудою зменшення коефіцієнта розкриву досягається за рахунок зменшення ширини робочих площадок внаслідок чого верхні горизонти (розкривні) мають меншу швидкість горизонтального посування, ніж нижні горизонти (рудні). Невідповідність фактичної довжини активного фронту гірничих робіт довжині фронту, прийнятої при визначенні максимально можливої продуктивності кар'єру за рудою і складанні перспективного календарного плану гірничих робіт без урахування взаємозв'язку ширини робочого майданчика і довжини активного фронту гірничих робіт, що забезпечують норматив готових до виймання запасів, призводить до порушення рівності швидкостей переміщення рудних і нерудних уступів.

Практична значимість. Удосконалено методику визначення обсягів розкривних робіт, що забезпечують в кар'єрі нормальні умови видобутку корисних копалин при зміні його продуктивності. Застосування методики можливо, як у випадку залучення в розробку одного, так і декількох ділянок робочої зони кар'єру.

Результати. Виведено формули для визначення поточних коефіцієнтів розкриву, а також обсягів заборгованості за розкривом при зниженні продуктивності кар'єру за рудою.

Ключові слова: залізрудні кар'єри, розкривні роботи, коефіцієнт розкриву, робоча площадка уступу, випередження розкривних робіт, ширина робочого майданчика.

Lutsenko S. A., Zhukov S. A., Hrigoriev Yu. I. Method of determination of amount of mining works which provide normal mining conditions for mineral extracting

Purpose. To improve the scientific and methodological base in the field of designing and planning of open-pit mining works by developing methods of determining the volume of overburden mining works, which provides in the open-pit normal conditions for mining while changing its productivity, which should take into account the interrelation of parameters of the development system, based on the condition of ensuring a standard volume of ready-to-extract rocks.

Research methods. In determining the gap of overburden work, it is necessary to take into account the interrelation of the width of the bench and the length of the active front of the mining works, which provide in the open-pit the required volume of ready to extract rocks. Formulas were derived for determining current overburden ratios while the expansion of work sites, and the amount of indebtedness on overburden.

Scientific novelty. By reducing the ore productivity of the open-pit, a reduction in the overburden is achieved by reducing the width of the bench, resulting in upper horizons (overburden) have a lower horizontal movement speed than lower horizons (ore). Discrepancy between the actual length of the active mining front and the length of the front that taken for determining of the maximum possible ore productivity and designing a prospective calendar of mining without taking into account the interrelation of the bench width and the length of the active mining front lead to the inconsistency of the equality of speed of movement of ore and overburden benches.

Practical significance. The method of determining the amount of mining works that provide normal conditions of mining while changing its productivity has been improved. The application of the methodology is possible, both in the case of involvement in the development of one or several sections of the working area of the open-pit.

Results. The formulas for determining the current overburden ratio, and the amount of debt on overburden in conditions of the ore productivity reducing were determined.

Key words: iron ore open-pit, overburden works, overburden ratio, working bench, outrunning of overburden works, working site width.

УДК 624.042.41

Сахно С.І., Люльченко С.В., Янова Л.О., Пищикова О.В. Аналіз вітрових навантажень на елементи малоповерхових будівель із двосхилим дахом методом обчислювальної гідрогазодинаміки

Мета. Знаходження вразливих для сильних вітрів місць в конструкції будинків з двосхилим дахом, що не враховуються стандартною методикою обліку вітрових навантажень.

Методи досліджень. Для дослідження розроблена математична твердотільна модель будинку з двосхилим дахом. Розрахунок навантажень, згідно ДБН проводився в програмному комплексі SCAD ++, моделювання розподілу вітрових навантажень твердотільної моделі виконувалося в програмному комплексі SolidWorks корпорації Dassault Systemes. Дослідження проводилися з урахуванням статичних вітрових навантажень при швидкості вітру 25 м/с. Розглядалися впливи з фронтального, бокового та діагонального вітру.

Наукова новизна. В результаті досліджень отримав подальший розвиток метод кінцевих елементів для підвищення надійності елементів будівель, що зазнають вітрові впливи які відрізняються від стандартних. Виявлено значні вітрові впливи в районі піддашкового звису спроможні спричинити руйнування даху. Виявлено, що розподілення вітрових навантажень знайдених методом обчислювальної гідрогазодинаміки не співпадає з розподіленням вітрових навантажень відповідно до ДБН В.1.2-2:2006.

Практичне значення. Запропонована методика дозволяє, приймаючи за базу стандартні вітрові навантаження, забезпечити більш надійну, довговічну і безпечну роботу елементів даху будівлі, які зазнають вітрових впливів, що відрізняються від стандартних.

Результати. Виявлені розподілення вітрових навантажень на стіни і дах при різних напрямках вітру. Показано, що навантаження не має рівномірно розподілений характер, а концентрується в особливих точках конструкції будівлі. Особливі вітрові впливи спостерігаються в зонах козирків даху та карнизних звисів. В цих зонах на площину даху одночасно діє позитивний тиск знизу і негативний тиск зверху. Різниця в тисках створює великі відривні зусилля спроможні відірвати дах від будівлі. Запропонована методика дозволяє швидко виявляти нестандартні, стосовно до вітрового навантаження, вузли і з урахуванням виявлених додаткових вітрових впливів підбирати методи їх підсилення.

Ключові слова: вітер, вітрове навантаження, малоповерхове житлове будівництво, конструювання

Сахно С.И., Люльченко Е.В., Янова Л.А., Пищикова Е.В. Анализ ветровых нагрузок на элементы малоэтажных зданий с двускатной крышей методом вычислительной гидрогазодинамики

Цель. Нахождение уязвимых мест в конструкции зданий с двускатной крышей, не учитываемых стандартной методикой учета ветровых нагрузок.

Методы исследований. Для исследования разработана математическая твердотельная модель дома с двускатной крышей. Расчет нагрузок, согласно ДБН проводился в программном комплексе SCAD ++, моделирование распределения ветровых нагрузок твердотельной модели выполнялось в программном комплексе SolidWorks корпорации Dassault Systemes. Исследования проводились с учетом статических ветровых нагрузок при скорости ветра 25 м / с. Рассматривались влияния с фронтального, бокового и диагонального ветра.

Научная новизна. В результате исследований получил дальнейшее развитие метод конечных элементов для повышения надежности элементов зданий, испытывающих ветровые воздействия, отличающиеся от стандартных. Вывявлены значительные ветровые воздействия в районе карнизного свеса способные вызвать разрушение крыши. Обнаружено, что распределение ветровых нагрузок, найденных методом вычислительной гидрогазодинамики не совпадает с распределением ветровых нагрузок в соответствии с ДБН В.1.2-2:2006.

Практическое значение. Предложенная методика позволяет, принимая за основу стандартные ветровые нагрузки, обеспечить более надежную, долговечную и безопасную работу элементов крыши здания, испытывающих ветровые воздействия, отличающиеся от стандартных.

Результаты. Обнаруженные распределения ветровых нагрузок на стены и крышу при разных направлениях ветра. Показано, что нагрузка не носит равномерно распределенный характер, а концентрируется в особых точках конструкции здания. Особые ветровые воздействия наблюдаются в зонах козырьков крыши и карнизных свесов. В этих зонах на плоскость крыши одновременно действует положительное давление снизу и отрицательное давление сверху. Разница в давлениях создает большие отрывные усилия способные оторвать крышу от здания. Предложенная методика позволяет быстро выявлять нестандартные, применительно к ветровой нагрузке, узлы и с учетом выявленных дополнительных ветровых воздействий подбирать методы их усиления.

Ключевые слова: ветер, ветровая нагрузка, малоэтажное жилищное строительство, конструирование

Sakhno S.I., Lyulchenko Ye. V., Yanova L.O., Pischikova O.V. Analysis of wind loads on elements of low-rise buildings with a gable roof using computational fluid dynamics

Purpose. Finding vulnerabilities in the construction of buildings with a gable roof, not taken into account by the standard method of accounting for wind loads.

Research methods. For research, a solid-state mathematical model of a house with a gable roof developed. The load calculation, according to DBN, was carried out in the SCAD ++ software package, the distribution of wind loads of the solid-state model simulated in the SolidWorks software package of Dassault Systemes Corporation. The studies carried out by taking into account static wind loads at a wind speed of 25 m / s. Influences from the frontal, lateral, and diagonal winds considered.

Scientific novelty. Because of research, the finite element method has further developed to increase the reliability of the elements of buildings experiencing wind effects that differ from standard ones. Significant wind effects identified in the area of the eaves overhang that may be destroying the roof. It found that the distribution of wind loads found by the method of computational fluid dynamics does not coincide with the distribution of wind loads under DBN В.1.2-2: 2006.

Practical value. The proposed technique allows, taking as a basis standard wind loads, to provide more reliable, durable, and safe operation of the building's roof elements experiencing wind effects that differ from the standard ones.

Results. The detected distribution of wind loads on the walls and roof with different wind directions. It showed that the load not uniformly distributed but concentrated at specific points in the building structure. Special wind effects observed in the areas of the roof visors and eaves. In these areas, positive pressure from below and negative pressure from above act simultaneously on the roof plane. The difference in pressure creates large tearing forces capable of tearing the roof off the building. The proposed technique allows you to quickly identify non-standard, about the wind load, nodes, and, taking into account the identified additional wind effects, select methods for their amplification.

Key words: wind, wind load, low-rise housing construction, construction

УДК 622.14

Федоренко П.Й., Переметчик А.В., Подойніщина Т.О. Статистико-ймовірносний розподіл прогнозних характеристик залізорудних родовищ при геометризції надр

Мета. Мета роботи полягає у знаходженні закономірностей розташування найважливіших якісних показників у масиві для того, щоб визначити їх зміну у процесі розвитку гірничої розробки. Найважливішим напрямом застосування геометризції родовищ залізорудних корисних копалин є гірничо-геометричне прогнозування їх якісних показників для вирішення задач довгострокового та короткострокового планування для того, щоб налагодити з великим ступенем ефективності роботу підприємства, що видобуває залізорудні корисні копалини, в режимі усереднення та підвищити ступінь раціоналізації процесу видобутку руди та ведення гірничих робіт.

Методи дослідження. Для розв'язання нагальних задач передбачено багато методів, в тому числі, застосування теоретичних досліджень, натурні та виробничі випробування. Під час робіт застосовувались геостатистичні методи оцінки. Методика полягає у знаходженні закономірності просторового розташування показників покладу для

розв'язання задачі прогнозування властивостей родовищ корисних копалин.

Наукова новизна. За спосіб огляду маркшейдерсько-геологічної інформації, взятої за неоднорідною розвідувальною мережею пропонується застосовувати спосіб крайгінга. Розглянуто спосіб оцінювання закономірності розташування чинників родовища з нелінійним характером мінливості.

Практичне значення. Висвітлено загальні способи оцінювання геологічних показників при розрахунку якісних показників залізорудних родовищ і показано їх властивості. Подано найзручніший спосіб оцінювання в умовах Криворізьких залізорудних родовищ. Найзначущим є створення методики прогнозування просторового розміщення показників родовищ залізорудних корисних копалин.

Результати. Отримано результати, які можуть давати випадкові функції з декількома компонентами, які є стаціонарними збільшеннями. Виходячи з того, що на родовищах Кривбасу детальна геологічна розвідка проводиться, як правило, за допомогою неоднорідної мережі свердловин, крайгінг є самим оптимальним способом для оцінювання та збільшення істотності геологічної інформації. Результатом геометризації родовищ та покладів корисних копалин є знаходження прогнозного просторового розміщення якісних показників у просторі масиву гірських порід і рудних тіл.

Ключові слова: геометризація, гірничо-геометричні методи прогнозування, варіограма, крайгінг, мінливість геологічних показників, розвідувальна мережа.

Федоренко П.И., Переметчик А.В., Подойнищина Т.А. Статистико-вероятностное распределение прогнозных характеристик железорудных месторождений при геометризации недр

Цель. Цель работы заключается в нахождении закономерностей расположения важнейших качественных показателей в массиве для того, чтобы определить их изменение в процессе развития горной разработки. Важнейшим направлением применения геометризации месторождений железорудных полезных ископаемых является горно-геометрическое прогнозирование их качественных показателей для решения задач долгосрочного и краткосрочного планирования с тем, чтобы наладить с большой степенью эффективности работу предприятия, которое добывает железорудные полезные ископаемые, в режиме усреднения и повысит степень рационализации процесса добычи руды и ведения горных работ.

Методы исследования. Для решения данных задач предусмотрено много методов, в том числе, применение теоретических исследований, натурные и производственные испытания. Во время работ применялись геостатистические методы оценки. Методика заключается в нахождении закономерности пространственного расположения показателей залежи для решения задачи прогнозирования свойств месторождений полезных ископаемых.

Научная новизна. В качестве способа учета маркшейдерско-геологической информации, взятой за неоднородной разведывательной мережею предлагается применять способ крайгинга. Рассмотрен способ оценивания закономірности расположения факторов месторождения с нелінійним характером изменчивости.

Практическое значение. Отражены общие способы оценивания геологических показателей при расчете качественных показателей железорудных месторождений и показаны их свойства. Указан самый удобный способ оценивания в условиях Криворожских железорудных месторождений. Наиболее значимым является создание методики прогнозирования пространственного размещения показателей месторождений железорудных полезных ископаемых.

Результаты. Получены результаты, которые могут давать случайные функции с несколькими компонентами, которые являются стационарными увеличениями. Исходя из того, что на месторождениях Кривбасса детальная геологическая разведка проводится, как правило, с помощью неоднородной сети скважин, крайгинг является самым оптимальным способом для оценивания и увеличения значимости геологической информации. Результатом геометризации месторождений и залежей полезных ископаемых является нахождение прогнозного пространственного размещения качественных показателей в пространстве массива горных пород и рудных тел.

Ключевые слова: геометризація, горно-геометрические методы прогнозирования, вариограма, крайгинг, изменчивость геологических показателей, разведывательная сеть.

Fedorenko P.Yu., Peremetchyk A.V., Podoinitsyna T.A. Statistical-probabilistic distribution of the predicted characteristics of iron ore deposits during the geometrization of the subsoil

Purpose. The purpose of the work is to find patterns of the location of the most important quality indicators in the array in order to determine their change in the process of mining development. The most important area of application for the geometrization of iron ore deposits is geometrical forecasting of their quality indicators for solving long-term and short-term planning tasks in order to establish, with a high degree of efficiency, the work of an enterprise that extracts iron ore minerals in the averaging mode and increase the degree of rationalization ore mining and mining operations.

Research methods. Many methods are provided for solving these problems, including the application of theoretical studies, field and production tests. During the work, geostatistical estimation methods were used. The technique consists in finding patterns of spatial location of reservoir indicators to solve the problem of penetrating the properties of mineral deposits.

Scientific novelty. It is proposed to use the kriging method as a way of accounting for surveying and geological information taken as a heterogeneous exploratory measure. A method for assessing the patterns of location of factors of a field with a non-linear nature of variability is considered.

Practical value. The general methods for assessing geological indicators are reflected in the calculation of the quality indicators of iron ore deposits and their properties are shown. The most convenient method of assessment in the conditions of Kryvyi Rih iron ore deposits is indicated. The most significant is the creation of a methodology for predicting the spatial distribution of indicators of iron ore deposits.

Results. The results are obtained that can give random functions with several components, which are stationary increases. Based on the fact that detailed geological exploration at Krivbass fields is carried out, as a rule, using a heterogeneous network of wells, kriging is the most optimal way to evaluate and increase the significance of geological information. The result of the geometrization of deposits and mineral deposits is to find the predicted spatial distribution of quality indicators in the space of the rock mass and ore bodies.

Key words: geometrization, mining-geometric methods of forecasting, variogram, kriging, variability of geological indicators, reconnaissance network.

УДК 624.153.524

Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Хоруженко І.В. Математичне моделювання взаємодії складчастих фундаментів при нерівномірних деформаціях основи

Мета. Математичне моделювання за допомогою програмних комплексів на основі методу кінцевих елементів (МКЕ) дозволяє в повному обсязі вирішувати складні інженерні задачі, досліджувати процеси та явища, аналізувати і прогнозувати роботу досліджуваної системи, мати змогу адекватно порівнювати роботу моделі та натурального процесу, явища тощо. Метою було проаналізувати значення та характер осідань фундаментних конструкцій, а також дослідження напружено-деформованого стану основи, аналіз перерозподілу напружень під подошвою фундаменту за умов виникнення нерівномірних деформацій основи.

Методи дослідження. Для виконання дослідження необхідно досконало володіти інструментами спеціалізованих програмних комплексів, що використовують в своїх алгоритмах метод кінцевих елементів. Завдяки аналітичним методам ми маємо змогу дослідити роботу фундаменту при математичному моделюванні, проаналізувати результати та зробити висновки для подальших досліджень.

Наукова новизна. Актуальність даної роботи пов'язана із розв'язанням поставленої задачі. Її результатом є встановлення залежності між зовнішнім навантаженням та осіданням фундаментної конструкції двох типів при нерівномірних деформаціях основи.

Практична значимість. Дослідження дають змогу оцінити роботу структурних фундаментів різного конструктивного рішення, математичне моделювання дозволяє всесторонньо проаналізувати результати та врахувати недоліки системи при подальших дослідженнях.

Результати. Було виконано математичне моделювання в програмному комплексі Ліра-САПР двох типів фундаментів в об'ємній постановці задачі. В результаті було встановлено, що поле осідань більш рівномірне для альтернативної фундаментної системи в об'ємній картині вертикальних переміщень. Дві крайні складки прототипної конструкції фундаменту мають менші межі значень вертикальних переміщень. При моделюванні нерівномірних деформацій основи аналогічно було доведено переваги альтернативної моделі фундаменту. Загальний принцип розподілення вертикальних напружень узгоджується із місцями найбільших зовнішніх сил, при цьому дана фундаментна система не дозволяє перерозподілити напруження рівномірно під кожною із складок. Якщо порівнювати числову складову нормальних напружень, що виникли в тілі ґрунту основи, то абсолютні максимальні значення нормальних вертикальних напружень N_z в площині XOZ було отримано для прототипної моделі фундаменту на рівні $1,56 \text{ т/м}^2$, в той час як для альтернативної конструкції фундаменту це значення склало $1,42 \text{ т/м}^2$.

Ключові слова: складчастий фундамент, метод кінцевих елементів, напружено-деформований стан

Тімченко Р.А., Кришко Д.А., Хоруженко И.В. Математическое моделирование взаимодействия складчатых фундаментов при неравномерных деформациях основания

Цель. Математическое моделирование с помощью программных комплексов на основе метода конечных элементов (МКЭ) позволяет в полном объеме решать сложные инженерные задачи, исследовать процессы и явления, анализировать и прогнозировать работу исследуемой системы, иметь возможность адекватно сравнивать работу модели и натурального процесса, явления тому подобное. Целью было проанализировать значение и характер осадок фундаментных конструкций, а также исследование напряженно-деформированного состояния основания, анализ перераспределения напряжений под подошвой фундамента в условиях возникновения неравномерных деформаций основания.

Методы исследования. Для выполнения исследования необходимо в совершенстве владеть инструментами специализированных программных комплексов, использующих в своих алгоритмах метод конечных элементов. Благодаря аналитическим методам мы можем исследовать работу фундамента при математическом моделировании, проанализировать результаты и сделать выводы для дальнейших исследований.

Научная новизна. Актуальность данной работы связана с решением поставленной задачи. Ее результатом является установление зависимости между внешней нагрузкой и осадкой фундаментной конструкции двух типов при неравномерных деформациях основания.

Практическая значимость. Исследования позволяют оценить работу структурных фундаментов различного конструктивного решения, математическое моделирование позволяет всесторонне проанализировать результаты и учесть недостатки системы при дальнейших исследованиях.

Результаты. Было выполнено математическое моделирование в программном комплексе Ліра-САПР двух типов фундаментов в объемной постановке задачи. В результате было установлено, что поле осадок более равномерное для альтернативной фундаментной системы в объемной картинке вертикальных перемещений. Две крайние складки прототипной конструкции фундамента имеют меньшие пределы значений вертикальных перемещений. При моделировании неравномерных деформаций основания аналогично было доказано преимущества альтернативной модели фундамента. Общий принцип распределения вертикальных напряжений согласуется с местами наибольших внешних сил, при этом данная фундаментная система не позволяет перераспределить напряжение равномерно под каждой из складок. Если сравнивать числовую составляющую нормальных напряжений, возникших в теле ґрунта основания, то абсолютные максимальные значения нормальных вертикальных напряжений N_z в плоскости XOZ было получено для прототипной модели фундамента на уровне $1,56 \text{ т/м}^2$, в то время как для альтернативной конструкции фундамента это значение составило $1,42 \text{ т/м}^2$.

Ключевые слова: складчатый фундамент, метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние

Timchenko R.O., Krishko D.A., Khoruzhenko I.V. Mathematical modeling of the folded foundations' interaction with uneven deformations of the base

Purpose. Mathematical modeling using software systems based on the finite element method (FEM) allows us to solve complex engineering problems fully, investigate processes and phenomena, analyze and predict the operation of the system under

study, and be able to adequately compare the operation of the model and the natural process, phenomena like that. The purpose was to analyze the value and nature of the sediment of the foundation structures, as well as to study the stress-strain state of the base, analysis of the redistribution of stresses under the base of the foundation in case of uneven deformation of the base.

Research methods. For researching, it is necessary to master perfectly the tools of specialized software systems that use the finite element method in their algorithms. Due to analytical methods, we can investigate the work of the foundation in mathematical modeling, analyze the results and make conclusions for further research.

Scientific novelty. The relevance of this work is associated with the solution of the task. Its result is the relation establishment between the external load and the draft of the foundation structure of two types with uneven deformations of the base.

Practical value. Research allows evaluating the work of the structural foundations of various constructive solutions; mathematical modeling allows analyzing comprehensively the results and taking into account the shortcomings of the system in further research.

Results. Mathematical modeling was performed in the Lira-CAD software of two types of foundations in a three-dimensional statement of the problem. It was found that the sediment field is more uniform for an alternative foundation system in the three-dimensional picture of vertical movements. The two side folds of the prototype foundation design have smaller limits for vertical displacements. The advantages of an alternative foundation model were likewise proven while modeling of uneven base deformations. The general principle of the distribution of vertical stresses is consistent with the places of greatest external forces, herewith this foundation system does not allow redistributing the stress evenly under each of the folds. If we compare the numerical component of the normal stresses arising in the body of the foundation soil, then the absolute maximum values of the normal vertical stresses N_z in the XOZ plane were obtained for the prototype foundation model at the level of 1.56 t/m^2 , while for the alternative foundation design this value is - set 1.42 t/m^2 .

Key words: folded foundation, finite element method, stress-strain state

УДК [622.271:338.32-048.34]:622.012

Баранов І.В., Швець С.М., Чердніченко С.В., Польщін Д.В. Оптимізація виробничої потужності групи кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату

Мета. Метою роботи є обґрунтування методів визначення оптимальних показників відкритої розробки, з урахуванням оптимізації роботи групи кар'єрів, які дозволяють підвищити ефективність розробки залізрудних родовищ відкритим способом.

Методи дослідження. Для вирішення поставлених задач у статті було використано методи: узагальненого аналізу досягнень науки та практичного досвіду роботи гірничо-видобувних підприємств, щодо розробки родовищ корисних копалин відкритим способом групою кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату; аналітичного та графоаналітичного аналізу; економіко-математичного моделювання спільної роботи кар'єрів, як єдиної системи, або єдиного комплексу; факторного аналізу; техніко-економічного аналізу показників роботи окремих кар'єрів та гірничо-збагачувального комбінату в цілому.

Наукова новизна. В роботі запропоновано кар'єри, які розробляють залізрудні родовища та входять до складу гірничо-збагачувального комбінату, розглядати як єдиний комплекс, або єдину систему. При цьому їх технологічні показники необхідно визначати по взаємозв'язаному впливу на технічні та економічні показники роботи гірничо-збагачувального комбінату до складу якого вони входять.

Практична значимість. Запропоновано розрахунковий метод визначення продуктивності кар'єрів у складі гірничо-збагачувального комбінату, на основі якого можна визначити найкращий варіант сумісної роботи цих кар'єрів з забезпеченням таких техніко-економічних показників гірничо-збагачувального комбінату, які дозволяють підвищити ефективність розробки залізрудних родовищ. Результати досліджень можуть бути використані гірничими підприємствами та проєктними організаціями при плануванні гірничих робіт та проєктування кар'єрів.

Результати. Виконано оптимізацію роботи групи кар'єрів за критеріями мінімального коефіцієнту розкриву та мінімальної повної собівартості видобутку руди кожного кар'єру на основі якої визначено пріоритетність роботи кожного кар'єру. Встановлено, що затрати на видобуток однієї тони руди в цілому по гірничо-збагачувальному комбінату можуть бути знижені на 6 %, якщо оптимізацію роботи групи кар'єрів виконувати за критерієм мінімальної повної собівартості видобутку руди.

Ключеві слова. Кар'єр, руда, розкривні породи, коефіцієнт розкриву, продуктивність, собівартість, техніко-економічні показники.

Баранов І.В., Швець С.М., Чердніченко С.В., Польщін Д.В. Оптимизация производственной мощности группы карьеров в составе горно-обогатительного комбината

Цель. Целью работы является обоснование методов определения оптимальных показателей открытой разработки, с учетом оптимизации работы группы карьеров, которые позволяют повысить эффективность разработки железорудных месторождений открытым способом.

Методы исследования. Для решения поставленных задач в статье были использованы методы: обобщенного анализа достижений науки и практического опыта работы горнодобывающих предприятий по разработке месторождений полезных ископаемых открытым способом группой карьеров в составе горно-обогатительного комбината; аналитического и графоаналитического анализа; экономико-математического моделирования совместной работы карьеров, как единой системы, или единого комплекса; факторного анализа; технико-экономического анализа показателей работы отдельных карьеров и горно-обогатительного комбината в целом.

Научная новизна. В работе предложено карьеры, которые разрабатывают железорудные месторождения и входят в состав горно-обогатительного комбината, рассматривать как единый комплекс, или единую систему. При этом их технологические показатели необходимо определять по взаимосвязанному влиянию на технические и экономические показатели работы горно-обогатительного комбината в состав которого они входят.

Практическая значимость. Предложено расчетный метод определения производительности карьеров в составе горно-обогатительного комбината, на основе которого можно определить лучший вариант совместной работы этих карьеров с обеспечением таких технико-экономических показателей горно-обогатительного комбината, которые позволяют повысить эффективность разработки железорудных месторождений. Результаты исследований могут быть использованы горными предприятиями и проектными организациями при планировании горных работ и проектирования карьеров.

Результаты. Выполнена оптимизация работы группы карьеров по критериям минимального коэффициента вскрыши и минимальной полной себестоимости добычи руды каждого карьера на основе которой определена приоритетность работы каждого карьера. Установлено, что затраты на добычу одной тонны руды в целом по горно-обогатительному комбинату могут быть снижены на 6%, если оптимизацию работы группы карьеров выполнять по критерию минимальной полной себестоимости добычи руды.

Ключевые слова. Карьер, руда, вскрышные породы, коэффициент вскрыши, производительность, себестоимость, технико-экономические показатели.

Baranov I.V., Shvets Ye.M., Cherednichenko Ye.V., Polshchin D.V. Optimization of the production capacity of the quarries group within the mining and processing company

Purpose. The purpose of the work is to substantiate the methods of determining the optimum indicators of open development, taking into account the optimization of the work of a quarry, which allow to increase the efficiency of the development of iron ore deposits in an open way.

Research methods. In order to solve these problems, the following methods were used in the article: a generalized analysis of the achievements of science and practical experience of mining and quarrying, in the development of minerals in the open way by a group of quarries in the mining and processing industry; analytical and graphoanalytical analysis; economic and mathematical modeling of the joint work of quarries as a single system or a single complex; factor analysis; a feasibility study of the performance of individual quarries and the mining and processing industry as a whole.

Scientific novelty. The work proposes quarries, that develop iron ore deposits and are part of a mining and processing plant, considered as a single complex or a single system. At the same time, their technological indices should be determined by the interrelated influence on the technical and economic performance of the mining and processing works of which they are a part.

Practical value. The proposed method of determining the productivity of quarries in the mining complex, on the basis of which you can determine the best option for the joint work of these quarries with the provision of such technical and economic indicators of the mining and processing plant, which can improve the development of iron ore. The results of the research can be used by mining companies and organizations in mining planning and quarry designing.

Rresults. The quarrying group was optimized by the criteria of the minimum overburden and the minimum total cost of ore extraction for each quarry, which determines the priority of each quarry. It has been found that the cost of extracting one ton of ore as a whole at a mining and processing plant can be reduced by 6% if the optimization of the quarry group is performed by the criterion of the minimum total cost of ore extraction.

Key words. Quarry, ore, overburden, overburden, productivity, cost, technical and economic indicators.

УДК 532.3:622.765.061

Моркун В.С., Пікільняк А.В. Дослідження динаміки газових бульбашок у процесі флотації рудної пульпи

Мета. Метою роботи є встановлення залежності зміни форми та граничної швидкості вспливання бульбашки в залежності від чисел Рейнольдса, Мортонна і Бонда, від його початкової форми, співвідношення коефіцієнтів густини та в'язкості, залежності коефіцієнта опору від числа Рейнольдса.

Методи дослідження. У роботі використані: аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду, систематизація існуючих підходів і методів оптимізації управління процесом флотації залізної руди.

Наукова новизна. Установлено залежності зміни розмірів газової бульбашки з урахуванням зміни його форми, швидкості потоку, сили поверхневого натягу, густини й в'язкості середовища і фізичних властивостей його оболонки, що дозволяє з більшою точністю управляти газовою фазою у процесі флотації.

Практична значимість. Результати роботи використані при проектуванні та освоєнні технічного та алгоритмічного забезпечення систем автоматичного управління технологічним процесом флотації на гірничих підприємствах.

Результати. В результаті досліджень встановлено залежність швидкості вспливання бульбашки від її діаметра для розчинів з різною в'язкістю, залежність швидкості вспливання від часу для різних діаметрів бульбашок, побудовано карту режимів зміни форми бульбашки, залежність зміни граничної швидкості бульбашки від співвідношення коефіцієнтів густини рідини й бульбашки та в'язкості рідини. Основний вплив на зміну форми газової бульбашки здійснюють числа Рейнольдса і Бонда. Високі числа Рейнольдса можуть посилити деформацію форми бульбашки в вертикально-му напрямку за рахунок утворення мікропотоків рідини під бульбашкою. З іншого боку, число Бонда управляє деформацією бульбашки і його відхиленням від сферичної форми. Співвідношення коефіцієнтів густини впливає на зміну форми тільки при низьких значеннях і більш істотно впливає на швидкість спливання. Форма бульбашки і кінцева швидкість спливання в більшій мірі залежить від співвідношення коефіцієнтів в'язкості між бульбашкою і рідиною в режимі з низькою в'язкістю.

Ключові слова: флотація, діаметр газової бульбашки, газова фаза пульпи, зміна форми, розподіл за розміром.

Моркун В.С., Пікільняк А.В. Исследование динамики газовых пузырьков в процессе флотации рудной пульпы

Цель. Целью работы является установление зависимости изменения формы и предельной скорости вспливания пузырька в зависимости от чисел Рейнольдса, Мортонна и Бонда, от его начальной формы, соотношения коэффициентов плотности и вязкости, зависимости коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса.

Методы исследования. В работе использованы: анализ отечественного и зарубежного опыта, систематизация существующих подходов и методов оптимизации управления процессом флотации железной руды.

Научная новизна. Установлены зависимости изменения размеров газового пузырька с учетом изменения его формы, скорости потока, силы поверхностного натяжения, плотности и вязкости среды и физических свойств его оболочки, что позволяет с большей точностью управлять газовой фазой в процессе флотации.

Практическая значимость. Результаты работы использованы при проектировании и освоении технического и алгоритмического обеспечения систем автоматического управления технологическим процессом флотации на горных предприятиях.

Результаты. В результате исследований установлена зависимость скорости всплывания пузырька газа от его диаметра для растворов с различной вязкостью, зависимость скорости всплывания от времени для различных диаметров пузырьков, построена карта режимов изменения формы пузырька, зависимость изменения предельной скорости пузырька от соотношения коэффициентов плотности жидкости и пузырька и вязкости жидкости. Основное влияние на изменение формы газового пузырька осуществляют числа Рейнольдса и Бонда. Высокие числа Рейнольдса могут усилить деформацию формы пузырьки в вертикальном направлении за счет образования микропотоков жидкости под пузырьком. С другой стороны, число Бонда управляет деформацией пузырька и его отклонением от сферической формы. Соотношение коэффициентов плотности влияет на изменение формы только при низких значениях и более существенно влияет на скорость всплывания. Форма пузырька и конечная скорость всплывания в большей степени зависит от соотношения коэффициентов вязкости между пузырьком и жидкостью в режиме с низкой вязкостью.

Ключевые слова: флотация, диаметр газового пузырька, газовая фаза пульпы, изменение формы, распределение по размеру.

Morkun V.S., Pikilnyak A.V. The study of gas bubble dynamics in the process of flotation of ore pulp

Purpose. The purpose of the work is to establish the dependence of the change in the shape and the limiting velocity of the bubble as a function of the Reynolds, Morton, and Bond numbers, its initial shape, the ratio of the density and viscosity coefficients, and the dependence of the resistance coefficient on the Reynolds number.

Research methods. The paper used an analysis of domestic and foreign experience, a systematization of existing approaches and methods for optimizing the control of the process of iron ore flotation.

Scientific novelty. The dependences of the gas bubble size changes considering the change in its shape, flow rate, surface tension, density and viscosity of fluid and the physical properties of its shell are established, which allow control the gas phase in the flotation process with higher accuracy.

Practical value. The results of the work were used in the design and development of technical and algorithmic support for automatic control systems of the flotation process at mining enterprises.

Results. As a result of studies, the dependence of gas bubble floating speed on its diameter for solutions with different viscosity, the dependence of floating speed on the time for different diameters of the bubbles, a map of mode of the bubble shape changing, the dependence of the maximum speed of the bubble on the ratio of the coefficients of the fluid density and bubble and the viscosity of the liquid are established. The main influence on the change in the shape of the gas bubble is carried out by the Reynolds and Bond numbers. High Reynolds numbers can increase the deformation of the shape of the bubbles in the vertical direction due to the formation of microflows of the liquid under the bubble. On the other hand, the Bond number controls the deformation of the bubble and its deviation from the spherical shape. The ratio of density factors affect the change in shape only at low values and a more significant effect on the floating speed. The shape of the bubble and the final floating rate are more dependent on the ratio of the viscosity coefficients between the bubble and the liquid in the low viscosity mode.

Key words: flotation, gas bubble diameter, pulp gas phase, shape change, size distribution.

УДК [658.562:622.7.016]: 66.085.3

Азарян А. А., Трачук А. А., Швец Д. В. Опыт использования экспресс-анализатора проб железорудного сырья для контроля содержания полезного компонента в условиях горноперерабатывающих предприятий

Цель. Разработка устройства, обеспечивающего точность определения содержания железа общего на уровне химического анализа, при этом доступного и простого в эксплуатации. Вес материала анализируемых разрабатываемым устройством экспрессного контроля проб не должен превышать 100г.

Методы исследования. Для контроля содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки предлагается использовать гамма-гамма метод.

Научная новизна. Предложено устройство, точность измерений которого сопоставима с методом химического анализа, позволяющее снизить временные затраты на проведение анализа содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки.

Практическая значимость. Для определения содержания железа общего в рудах и продуктах их переработки на большинстве горнообогатительных комбинатов и шахт Украины используется химический метод. Временные затраты на подготовку проб к химическому анализу и сам анализ составляют, в зависимости от вида сырья, от 0,8 до 2,5 часов. Такое запаздывание в получении информации о качестве руды или продуктов ее переработки не позволяет оперативно управлять процессом переработки сырья с целью его оптимизации, что в результате снижает эффективность работы горнодобывающих и перерабатывающих предприятий. Предлагаемый экспресс-анализатор позволяет уменьшить временные затраты на проведение анализа содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки.

Результаты. Проведенные исследования показали, что разработанный экспресс-анализатор содержания железа общего в пробах руд и продуктах их переработки обеспечивает точность результатов анализов, не уступающую химическому методу. При этом затраты времени при использовании предложенного экспресс-анализатора на 1,5 – 2,0 часа меньше, чем на проведение химического анализа. Результаты экспериментальной работы подтвердили, что экспресс-анализатор проб пригоден для определения содержания железа в концентратах влажностью 9...12% без сушки материала проб, что позволяет сократить время получения результата анализов еще примерно на 1 час.

Ключевые слова: железорудное сырье, гамма-гамма метод, экспресс-анализатор, оперативный контроль.

Азарян А. А., Трачук А. А., Швець Д. В. Досвід використання експрес-аналізатора проб залізородної сировини для контролю вмісту корисного компонента в умовах гірничопереробних підприємств

Мета. Розробка пристрою, що забезпечує точність визначення вмісту заліза загального на рівні хімічного аналізу, при цьому доступного і простого в експлуатації. Вага матеріалу аналізованих проб розроблюваним пристроєм експресного контролю не повинна перевищувати 100г.

Методи дослідження. Для контролю вмісту заліза загального в пробах руд і продуктах їх переробки пропонується використовувати гамма-гамма метод.

Наукова новизна. Запропоновано пристрій, точність вимірювань якого порівнянна з методом хімічного аналізу, що дозволяє знизити тимчасові витрати на проведення аналізу вмісту заліза загального в пробах руд і продуктах їх переробки.

Практична значимість. Для визначення вмісту заліза загального в рудах і продуктах їх переробки на більшості гірничобогачувальних комбінатів і шахт України використовується метод хімічного аналізу. Тимчасові витрати на підготовку проб до хімічного аналізу і сам аналіз становлять, залежно від виду сировини, від 0,8 до 2,5 годин. Таке запізнювання в одержанні інформації про якість руди або продуктів її переробки не дозволяє оперативно управляти процесом переробки сировини з метою його оптимізації, що в результаті знижує ефективність роботи гірничодобувних і переробних підприємств. Пропонований експрес-аналізатор дозволяє зменшити тимчасові витрати на проведення аналізу вмісту заліза загального в пробах руд і продуктах їх переробки.

Результати. Проведені дослідження показали, що розроблений експрес-аналізатор вмісту заліза загального в пробах руд і продуктах їх переробки забезпечує точність результатів аналізів, які не поступаються хімічному методу. При цьому витрати часу при використанні запропонованого експрес-аналізатора на 1,5 - 2,0 години менше, ніж на проведення хімічного аналізу. Результати експериментальної роботи підтвердили, що експрес-аналізатор проб придатний для визначення вмісту заліза в концентратах вологістю 9 ... 12% без сушіння матеріалу проб, що дозволяє скоротити час отримання результату аналізів ще приблизно на 1 годину.

Ключові слова: залізородна сировина, гамма-гамма метод, експрес-аналізатор, оперативний контроль.

Azaryan A. A., Trachuk A. A., Shvets D. V. Experience in the use of an express analyzer of samples of iron ore raw materials for monitoring the content of a useful component in mining enterprises

Purpose. To develop a device that ensures the accuracy of determination of the total iron content at the level of chemical analysis, while affordable and easy to use. The weight of the material analyzed by the developed device to express control of samples should not exceed 100g.

Research methods. To control the total iron content in ore samples and products of their processing, it has proposed to use the gamma-gamma method.

Scientific novelty. The device has proposed whose measurement accuracy is comparable with the method of chemical analysis, which allows reducing the time spent on analysis of the total iron content in ore samples and products of their processing.

Practical value. The chemical method has used to determine the total iron content in ores and products of their processing at most mining plants and mines in Ukraine. The time spent on preparing samples for chemical analysis and the analysis itself, depending on the type of raw material, ranges from 0.8 to 2.5 hours. Such a delay in obtaining information about the quality of ore or its processing products does not allow you to quickly manage the process of processing raw materials to optimize it, which as a result reduces the efficiency of the mining and processing enterprises. The proposed express analyzer can reduce the time spent on analysis of the total iron content in ore samples and products of their processing.

Results. The studies showed that the developed express analyzer of the total iron content in ore samples and products of their processing ensures the accuracy of the analysis results, not inferior to the chemical method. At the same time, the time spent using the proposed express analyzer is 1.5 - 2.0 hours less than the chemical analysis. The results of the experimental work confirmed that the express sample analyzer is suitable for determining the iron content in concentrates with a moisture content of 9 ... 12% without drying the sample material, which reduces the time to obtain the analysis result by another 1 hour.

Key words: iron ore raw materials, gamma-gamma method, express analyzer, operational control.

УДК 622.274.3:622.224

Письменний С.В. Моделювання стійкості очисних камер при селективній розробці складноструктурних рудних покладів

Мета. Метою виконаних досліджень є визначення стійкості міжкамерного цілика при розробці складноструктурних рудних покладів системами з відкритим очисним простором, що дозволить підвищити показники вилучення рудної маси за рахунок селективного виймання корисної копалини з виймального блоку.

Методи дослідження. На практиці існує велика кількість теоретичних та лабораторних методик по визначенню конструктивних елементів системи розробки з відкритим очисним простором, які дозволяють визначити параметри ціликів та оголень для статичного об'єкту. При селективній розробці родовищ виймальний блок необхідно розглядати як динамічний об'єкт. Тому, для визначення стійкого оголення в залежності від черги відпрацювання очисної камери в межах виймального блоку необхідно визначати дію еквівалентних напружень в міжкамерному цілику за допомогою чисельних методів, або програмних комплексів створених на основі чисельного методу.

Наукова новизна. Вперше за допомогою програмного комплексу ANSYS встановлено, що при формуванні цілика в виймальному блоці між очисними камерами в залежності від напрямку відпрацювання блоку в цілику еквівалентні напруження змінюються за параболічною функцією. Так, при відпрацюванні виймального блоку з лежачого до висячого боку еквівалентні напруження описуються параболічною функцією, а при веденні очисних робіт від висячого до лежачого боку – обернено-параболічною функцією.

Практична значимість. Відпрацювання складноструктурних покладів Криворізького залізородного басейну селективним способом, системами з відкритим очисним простором, дозволить вилучати камерні запаси руди без додаткового засмічення пустими породами із збереженням міжкамерного цілика представленого безрудним чи рудним включенням.

Результати. Доведено, що відпрацювання виймального блоку селективним способом дозволить підвищити показники вилучення рудної маси. Відпрацювання блоку від висячого до лежачого боку зменшує концентрацію напружень в цілику з 30–35 МПа до 5–10 МПа, що сприяє підвищенню його стійкості в 1,5–2,0 рази. При відпрацюванні блоку від лежачого до висячого боку доцільно застосовувати підповерхово-камерну систему розробки для забезпечення стійкості цілику та очисним камерам під час вилучення руди.

Ключові слова: підземна розробка, залізна руда, напруження, стійкість, камерна система розробки, цілик.

Письменный С.В. Моделирование устойчивости очистных камер при селективной разработке сложноструктурных рудных залежей

Цель. Целью выполненных исследований является определение устойчивости междукammerного целика при разработке сложноструктурных рудных залежей системами с открытым очистным пространством, что позволит повысить показатели извлечения рудной массы за счет селективного извлечения полезного ископаемого из выемочного блока.

Методы исследования. На практике существует большое количество теоретических и лабораторных методик по определению конструктивных элементов системы разработки с открытым очистным пространством, которые позволяют определить параметры целиков и обнажений для статического объекта. При селективной разработке месторождений выемочных блок необходимо рассматривать как динамический объект. Поэтому, для определения устойчивого обнажения в зависимости от очереди отработки очистной камеры в пределах выемочного блока необходимо определять действие эквивалентных напряжений в междукammerном целике с помощью численных методов, или программных комплексов созданных на основе численного метода.

Научная новизна. Впервые с помощью программного комплекса ANSYS установлено, что при формировании целика в выемочных блоке между очистными камерами в зависимости от направления отработки блока в целике эквивалентные напряжения изменяются параболически. Так, при отработке выемочного блока с лежащего к висячему боку эквивалентные напряжения описываются параболической функцией, а при ведении очистных работ от висячего к лежащему боку - обратно-параболической функцией.

Практическая значимость. Отработка сложноструктурных залежей Криворожского железорудного бассейна селективным способом, системами с открытым очистным пространством, позволит извлекать камерные запасы руды без дополнительного засорения пустыми породами с сохранением междукammerного целика представленного безрудным или рудным включением.

Результаты. Доказано, что отработка выемочного блока селективным способом позволит повысить показатели извлечения рудной массы. Отработка блока от висячего к лежащему стороны уменьшает концентрацию напряжений в целике с 30-35 МПа до 5-10 МПа, что способствует повышению его устойчивости в 1,5-2,0 раза. При отработке блока от лежащего в висячему бока целесообразно применять подэтажного-камерную систему разработки для обеспечения устойчивости целике и очистным камерам во время изъятия руды.

Ключевые слова: подземная разработка, железная руда, напряжения, устойчивость, камерная система разработки, целик.

Pysmennyi S.V. Modeling stability of waste chambers for selective development of complex structural ore stocks

Purpose. To determine the stability of the inter-chamber whole in the development of complex ore deposits by systems with open clearing space, which allows to increase the indices of ore mass extraction due to the selective extraction of minerals from the mining block.

Research methods. In practice, there are a large number of theoretical and laboratory techniques for defining the structural elements of an open-space design system that allow the determination of whole and stripe parameters for a static object. In selective field development, the extraction unit should be considered as a dynamic object. Therefore, to determine the persistent exposure, depending on the turn of the treatment chamber within the removal block, it is necessary to determine the effect of equivalent stresses in the inter-chamber whole using numerical methods or software systems created on the basis of the numerical method.

Scientific novelty. For the first time, using the ANSYS software system, it is established that when forming a whole in the extraction block between the treatment chambers, depending on the direction of the unit's discharge, the equivalent voltages change in parabolic function. Thus, when working out the removal block from the lying to the hanging side, the equivalent stresses are described by a parabolic function, and when conducting cleaning works from the hanging to the lying side - by the inverse-parabolic function.

Practical value. The development of complex structures of the Kryvyi Rih iron ore basin in a selective way, with systems with open cleaning space, will allow to extract chamber ore reserves without additional clogging with empty rocks, while preserving the inter-chamber whole represented by the ore or ore inclusions.

Results. It is proved that mining of the extraction block in a selective way will increase the extraction of ore mass. Working the block from the hanging to the lying side reduces the concentration of stresses as a whole from 30-35 МПа to 5-10 МПа, which helps to increase its resistance by 1.5-2.0 times. When drilling the block from the lying to the hanging side, it is advisable to use an underfloor-chamber development system to ensure the stability of the whole and the cleaning chambers during ore extraction.

Key words: underground development, iron ore, stress, stability, chamber development system, whole

УДК 691.328

Валовой О.І., Попруга Д.В., Афанасьев В.В., Чорна К.В., Грицаенко О.М. Міцність балок з металевим і склопластиково-металевим армуванням розтягнутої зони

Мета. Визначити та порівняти міцність дослідних зразків балок армованих металевим і гібридним склопластиково-металевим армуванням у розтягнутій зоні. Визначити передумови використання склопластикової арматури в якості робочої в згинальних бетонних елементах.

Методи дослідження. Експериментальне випробування натурних дослідних зразків у лабораторних умовах. Аналітичне дослідження і порівняння отриманих результатів.

Наукова новизна. Визначені необхідні умови для використання склопластикової арматури в поєднанні з металевим у згинальних бетонних елементах. Встановлено необхідний переріз площі склопластикової і металеві арматури для ефективного підвищення міцності дослідних зразків.

Практична значимість. Отримані результати дозволяють розширити спектр використання склопластикової композитної арматури у будівельних конструкціях, що працюють на згин. Незначна вага, висока міцність, протикорозійні та діелектричні властивості композитної склопластикової арматури дозволяють підвищити міцність і покращити фізико-механічні властивості згинальних бетонних конструкцій армованих подібними матеріалами.

Результати. Аналізуючи міцність згинальних бетонних елементів з металевим і склопластиково-металевим армуванням розтягнутої зони встановлено: при гібридному армуванні розтягнутої зони згинальних бетонних елементів робочою склопластиковою арматурою 2Ø12 АКС 800 і металеві Ø12 А400С, з загальною площею, що менше площі металеві робочі арматури 3Ø12 А400С контрольної серії на 2,78%, можна досягти підвищення межі міцності балок на 3,51%; при гібридному армуванні розтягнутої зони згинальних бетонних елементів робочою склопластиковою арматурою 2Ø14 АКС 800 і металеві Ø12 А400С, з загальною площею, що перевищує площу металеві робочі арматури 3Ø12 А400С контрольної серії на 10,85%, можна досягти підвищення межі міцності балок на 11,23%.

Збільшення площі робочі арматури за рахунок склопластику на 26,96% призводить до підвищення міцності балок на 16,79%. Збільшення площі на 44,76% призводить до підвищення міцності балок на 25,49%.

Ключові слова: склопластикова арматура, міцність, руйнування, розтягнута зона, робоча арматура, діаметр, композитний матеріал, дослідна балка.

Валовой А.И., Попруга Д.В., Афанасьев В.В., Чорна К.В., Грицаенко А.Н. Прочность балок с металлическим и стеклопластиково-металлическим армированием растянутой зоны

Цель. Определить и сравнить прочность опытных образцов балок армированных металлическим и гибридным стеклопластиково-металлическим армированием в растянутой зоне. Определить предпосылки использования стеклопластиковой арматуры в качестве рабочей в изгибаемых бетонных элементах.

Методы исследования. Экспериментальное испытание натуральных опытных образцов в лабораторных условиях. Аналитическое исследование и сравнение полученных результатов.

Научная новизна. Определены необходимые условия для использования стеклопластиковой арматуры в сочетании с металлической в изгибаемых бетонных элементах. Определено необходимое сечение площади стеклопластиковой и металлической арматуры для эффективного повышения прочности опытных образцов.

Практическая значимость. Полученные результаты позволяют расширить спектр использования стеклопластиковой композитной арматуры в строительных конструкциях, работающих на изгиб. Незначительный вес, высокая прочность, антикоррозионные и диэлектрические свойства композитной стеклопластиковой арматуры позволят повысить прочность и улучшить физико-механические свойства изгибаемых бетонных конструкций, армированных подобными материалами.

Результаты. Анализируя прочность изгибаемых бетонных элементов с металлическим и стеклопластиково-металлическим армированием растянутой зоны установлено: при гибридном армировании растянутой зоны изгибаемых бетонных элементов рабочей стеклопластиковой арматурой 2Ø12 АКС 800 и металлической Ø12 А400С, с общей площадью превышающей площадь металлической рабочей арматуры 3Ø12 А400С контрольной серии на 2,78%, можно добиться повышения предела прочности балок на 3,51%; при гибридном армировании растянутой зоны изгибаемых бетонных элементов рабочей стеклопластиковой арматурой 2Ø14 АКС 800 и металлической Ø12 А400С, с общей площадью превышающей площадь металлической рабочей арматуры 3Ø12 А400С контрольной серии на 10,85%, можно добиться повышения предела прочности балок на 11,23%.

Увеличение площади рабочей арматуры за счет стеклопластика на 26,96% приводит к повышению прочности балок на 16,79%. Увеличение площади на 44,76% приводит к повышению прочности балок на 25,49%.

Ключевые слова: стеклопластиковая арматура, прочность, разрушение, растянутая зона, рабочая арматура, диаметр, композитный материал, исследуемая балка.

Valovoi O.I., Popruha D.V., Afanasiev V.V., Chorna K.V., Grytsaenko O.M. Strength of beams with metal and fiber glass-metal reinforcement in tensile zone

Purpose. To determine and compare the strength of test beams reinforced with metal and hybrid fiberglass-metal reinforcement in the tensile zone; to determine the prerequisites for the using of fiberglass armature as the working armature in the bending concrete elements.

Research methods. The following methods are used: experimental testing of full-scale prototypes in laboratory conditions; analytical research and comparison of the obtained results.

Scientific novelty. It is determined the necessary conditions for the use of fiberglass armature in combination with metal armature in bending concrete elements. The necessary cross-section of the area of fiberglass and metal armature is established to increase effectively the strength of the test samples.

Practical value. The obtained results will allow expanding the range of the fiberglass composite armature using in the bending structures. Light weight, high strength, anti-corrosion and dielectric properties of composite fiberglass reinforcement will allow to increase the strength and improve the physical and mechanical properties of bending concrete structures reinforced with this kind of materials.

Results. Analyzing the strength of bending concrete elements with metal and fiberglass-metal armature of the tensile zone it is established that: when hybrid reinforced, it is possible to achieve an increase in the tensile strength of beams by 3.51%. The tensile zone of bending concrete elements is reinforced with working fiberglass rods 2Ø12 АКС 800 and metal rods Ø12 А400С, with a total area less than the area of metal working armature 3 Ø12 А400С of the control series by 2.78%; when hybrid reinforced, it is possible to achieve an increase in the tensile strength of beams by 11.23%. The tensile zone of

bending concrete elements is reinforced with working fiberglass rods $2\varnothing 14$ АКС 800 and metal rods $\varnothing 12$ А400С, with a total area exceeding the area of metal working reinforcement $3\varnothing 12$ А400С of the control series by 10.85%.

The increasing of the area of the working reinforcement due to fiberglass by 26.96% results in an increase in the strength of beams by 16.79%. The increasing of the area by 44.76% results in an increase in the strength of beams by 25.49%.

Key words: fiberglass reinforcement, strength, fracture, tensile zone, working armature, diameter, composite material, test beam.

УДК 691.3

Сахно С.І., Люльченко Є.В., Білашенко К.С., Домнічев А.О. Дослідження застосовності нелінійних математичних моделей міцності бетону для моделювання руйнування бетонних призм

Мета. Виявлення математичної моделі нелінійної поведінки бетону, що в найбільшій мірі відтворює поведінку лабораторних зразків призм при руйнуванні.

Методи досліджень. Дослідження є порівнянням результатів експериментальної частини, що проводилась в лабораторії Криворізького національного університету та результатів математичного моделювання руйнування бетону. Математичне моделювання деформацій та руйнування бетонних призм виконувалось в програмній системі Discovery AIM for student.

Наукова новизна. В результаті досліджень отримав подальший розвиток метод математичного моделювання нелінійного руйнування бетону. Виявлені закономірності розподілення еластичних та пластичних деформацій в бетонних призмах. Отримано дослідницький матеріал для корегування особливих параметрів моделей Друккера-Прагера та Менетрея-Вілема

Практичне значення. Визначення класів бетону згідно державних будівельних норм виконується шляхом випробувань бетонних призм. Той факт, що математичні моделі Друккера-Прагера та Менетрея-Вілема досить точно відтворюють поведінку реального бетону лабораторних зразків призм, дозволяє застосовувати дані моделі для розрахунків та досліджень складних бетонних та залізобетонних конструкцій. Лінійні математичні моделі бетону можуть бути застосовані лише для розрахунку конструкцій, напруження в яких не перевищує межі пружності.

Результати. Виявлено та проаналізовано залежності розподілення напружень та деформацій від навантажень для лінійної та нелінійних моделей руйнування бетону Друккера-Прагера та Менетрея-Вілема. Проведено порівняння отриманих результатів з результатами лабораторних випробувань. Показано, що обидві нелінійні моделі досить точно описують процес деформацій та руйнування бетонної призми, але модель Друккера-Прагера має більший рівень відповідності. Модель Менетрея-Вілема моделює більш жорстку та крихку поведінку бетону. Деформації моделі Менетрея-Вілема нижчі ніж в моделі Друккера-Прагера. В моделі Друккера-Прагера розташування ізоліній пластичних деформацій перед руйнуванням бетону більше відповідають характеру руйнування лабораторних моделей.

Ключові слова: бетон, метод скінчених елементів, деформації, міцність, руйнування бетону, модель Менетрея-Вілема, модель Друккера-Прагера.

Сахно С.И., Люльченко Е.В., Биляшенко К.С., Домничева А.А. Исследование применимости нелинейных математических моделей прочности бетона для моделирования разрушения бетонных призм

Цель. Выявление математической модели нелинейного поведения бетона, в наибольшей степени воспроизводящих поведение лабораторных образцов призм при разрушении.

Методы исследований. Исследование является сравнением результатов экспериментальной части, которая проводилась в лаборатории Криворожского национального университета и результатов математического моделирования разрушения бетона. Математическое моделирование деформаций и разрушения бетонных призм выполнялось в программном комплексе Discovery AIM for student.

Научная новизна. В результате исследований получил дальнейшее развитие метод математического моделирования нелинейного разрушения бетона. Выявлены закономерности распределения эластичных и пластических деформаций в бетонных призмах. Получен исследовательский материал для корректировки особых параметров моделей Друккера-Прагера и Менетрея-Вилема.

Практическое значение. Определение классов бетона согласно государственным строительным нормам выполняется путем испытаний бетонных призм. Тот факт, что математические модели Друккера-Прагера и Менетрея-Вилема достаточно точно воспроизводят поведение реального бетона лабораторных образцов призм, позволяет применять данные модели для расчетов и исследований сложных бетонных и железобетонных конструкций. Линейные математические модели бетона могут быть применены только для расчета конструкций, напряжения в которых не превышает предела упругости.

Результаты. Выявлены и проанализированы зависимости распределения напряжений и деформаций от нагрузок для линейной и нелинейных моделей разрушения бетона Друккера-Прагера и Менетрея-Вилема. Проведено сравнение полученных результатов с результатами лабораторных испытаний. Показано, что обе нелинейные модели достаточно точно описывают процесс деформаций и разрушения бетонной призмы, но модель Друккера-Прагера имеет больший уровень соответствия. Модель Менетрея-Вилема моделирует более жесткое и хрупкое поведение бетона. Деформации модели Менетрея-Вилема ниже, чем в модели Друккера-Прагера. В модели Друккера-Прагера расположения изолиний пластических деформаций перед разрушением бетона более соответствуют характеру разрушения лабораторных моделей.

Ключевые слова: бетон, метод конечных элементов, деформации, прочность, разрушения бетона, модель Менетрея-Вилема, модель Друккера-Прагера.

Sakhno S.I., Lyulchenko Ye.V., Bilashenko K.S., Domnichev A.O. Investigation of the applicability of nonlinear mathematical models of concrete strength for modeling the destruction of concrete prisms

Purpose. The identification of a mathematical model of the nonlinear behavior of concrete that reproduces to the greatest extent the action of laboratory samples of prisms during destruction.

Research methods. The study is a comparison of the results of the experimental part, which carried out in the laboratory of Kryvyi Rih National University and the consequences of mathematical modeling of concrete destruction. Numerical modeling of deformation and fracture of concrete prisms performed in the Discovery AIM for a student software package.

Scientific novelty. Because of research, the method of mathematical modeling of nonlinear destruction of concrete further developed. The regularities of the distribution of elastic and plastic deformations in concrete prisms revealed. Research material obtained to adjust the select parameters of the Drucker-Prager and Menetrey-Willam models.

Practical value. Classification of concrete according to state building codes is carried out by testing concrete prisms. The fact that the mathematical models of Drucker-Prager and Menetrey-Willam accurately reproduce the behavior of real concrete laboratory samples of prisms allows us to use these models for calculations and studies of complex concrete and reinforced concrete structures. Linear mathematical models of concrete can only be used to calculate structures in which the stress does not exceed the elastic limit.

Results. The dependences of the distribution of stresses and strains on the loads for linear and nonlinear models of concrete destruction by Drucker-Prager and Menetrey-Willam revealed and analyzed. The results obtained compared with the results of laboratory tests. It is shown that both nonlinear models accurately describe the process of deformation and fracture of the concrete prism, but the Drucker-Prager model has a higher level of correspondence. The Menetrey-Willam model simulates the more rigid and brittle behavior of concrete. Deformations of the Menetrey-Willam model are lower than in the Drucker-Prager model. In the Drucker-Prager model, the location of the plastic strain isolines before concrete failure is more consistent with the nature of the destruction of laboratory models.

Key words: concrete, finite element method, deformation, strength, concrete failure, Menetrey-Willam model, Drucker-Prager model.

УДК [624.046.5:622.012]:536.75

Бровко Д.В., Хворост В.В., Кононенко В.В. Построение системы мониторинга надежности элементов зданий и сооружений поверхностного комплекса шахт на базе оценки энтропии

Цель. Построение научно обоснованной методологии диагностики технического состояния, оценки надежности и степени физического износа для зданий и сооружений шахтного комплекса с использованием математического аппарата и вероятностно-статистических методов технической диагностики и методов теории информации.

Методы исследования. Использование общенаучных методов исследования: статистических, теории вероятностей, теории информации, моделирования, формализации, анализа (в том числе ретроспективного) – при построении решения на уровне отдельных конструктивных элементов; основных принципов организации систем и системного анализа – при построении модели диагностирования.

Научная новизна. Научная новизна предложенного в работе метода – адекватное описание оценки и анализа надежности выполнения работ при обследовании и реконструкции промышленных объектов шахт с учетом представления результатов выполнения работ в виде статистических данных с учетом математического моделирования возможных дефектов.

Практическая значимость. Состоит в реализации метода анализа в практической обследовательской деятельности, что придаст уверенность эксперту при определении технического состояния объекта, позволит обоснованно определить комплекс мероприятий, и эффективно планировать эксплуатационные расходы и затраты на приведение объекта в исправное состояние. Предложенная методика диагностирования может быть использована при создании современных нормативных документов по оценке состояний, надежности и физического износа рассматриваемых зданий на основе единого вероятностного подхода.

Результаты. Предложенная методика определения надежности эксплуатируемых зданий и сооружений поверхности может быть использована на практике для оценки вида технического состояния и безопасного остаточного ресурса.

Получены расчётные значения как энтропии (H) так и дивергенции Кульбака-Лейблера для оценки "живучести" элементов конструкции показали, что с ростом воздействия коррозии значение первой (H) растут, а второй величины уменьшаются, что свидетельствует об износе элементов конструкции так и системы в целом.

Ключевые слова: объекты поверхности шахт, надежность, дивергенция Кульбака-Лейблера, живучесть, распределение, напряжения, предел прочности

Бровко Д.В., Хворост В.В., Кононенко В.В. Побудова системи моніторингу надійності елементів будівель і споруд поверхневого комплексу шахт на базі оцінки ентропії

Мета. Побудова науково обґрунтованої методології діагностики технічного стану, оцінки надійності та ступеня фізичного зносу для будівель і споруд шахтного комплексу з використанням математичного апарату і ймовірностно-статистичних методів технічної діагностики і методів теорії інформації.

Методи дослідження. Використання загальнонаукових методів дослідження: статистичних, теорії ймовірностей, теорії інформації, моделювання, формалізації, аналізу (в тому числі ретроспективного) - при побудові рішення на рівні окремих конструктивних елементів; основних принципів організації систем і системного аналізу - при побудові моделі діагностування.

Наукова новизна. Наукова новизна запропонованого в роботі методу - адекватний опис оцінки та аналізу надійності виконання робіт при обмеженні і реконструкції промислових об'єктів шахт з урахуванням представлення результатів виконання робіт у вигляді статистичних даних з урахуванням математичного моделювання можливих дефектів.

Практична значимість. Складається в реалізації методу аналізу в практичній обслуговувальній діяльності, що додасть упевненість експерту при визначенні технічного стану об'єкта, дозволить обґрунтовано визначити комплекс заходів, і ефективно планувати експлуатаційні витрати і витрати на приведення об'єкта в справний стан. Запропонована методика діагностування може бути використана при створенні сучасних нормативних документів з оцінки станів, надійності і фізичного зносу розглянутих будівель на основі єдиного ймовірнісного підходу.

Результати. Запропонована методика визначення надійності експлуатованих будівель і споруд поверхні може бути використана на практиці для оцінки виду технічного стану та безпечного залишкового ресурсу.

Отримано розрахункові значення як ентропії (H) так і дивергенції Кульбака-Лейблера для оцінки "живучості" елементів конструкції показали, що з ростом впливу корозії значення першої (H) ростуть, а другої величини () зменшуються, що свідчить про знос елементів конструкції так і системи в цілому.

Ключові слова: об'єкти поверхні шахт, надійність, дивергенція Кульбака-Лейблера, живучість, розподіл, напруга, межа міцності

Brovko D.V., Khvorost V.V., Kononenko V.V. Reliability monitoring system of mine surface structural elements based on entropy

Purpose. To provide a scientific-based methodology for diagnosing the technical state, the reliability and wear of buildings and structures of the mine complex by employing mathematical apparatus and diagnostics probabilistic-statistical methods, information theory methods as well.

Research methods. The research provides for the following general methods: statistical, probability theory, information theory, modeling, formalization, analysis (including retrospective), when creating a solution to individual structural elements; the basic principles of system organization and system analysis, when building a diagnostic model.

Scientific novelty. The method enables to adequately describe the assessment and analysis of inspection and reconstruction of industrial mines, taking into account the results of work as statistical data on mathematical modeling of possible defects.

Practical value. Implementation of the analysis method in practical research activities provides assurance to the expert in determining the technical state of the facility, specifying a set of measures, and planning operational and refurbishment costs. The diagnostic method based on a single probabilistic approach can be used as an updated regulatory document to assess the state, reliability and physical deterioration of the buildings.

Results. The methodology for finding the reliability of operated buildings and surface structures can be used in practical assessment of technical condition and safe residual life.

The calculated values of both the entropy (H) and the Kullback-Leibler divergence for assessing the "survivability" of structural elements indicated that with an increase in the corrosion effect, the value of the first (H) grows and the second value () decreases, confirming the wear of structural elements and the system.

Key words: mine surface objects, reliability, Kullback- Leibler divergence, survivability, distribution, stress, ultimate strength.

УДК 622.73:622.7.016

Швец Д. В. Синтез математичної моделі технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням її хіміко-мінералогічних характеристик на рудозбагачувальних фабриках

Мета. Розробка математичної моделі технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках з метою подальшого синтезу системи управління технологічного процесу подрібнення.

Методи дослідження. Проведено системний аналіз технологічного процесу подрібнення рудозбагачувальних фабрик, визначено вектори керованих та некерованих вхідних змінних, вектор вихідних змінних та вектор збурень. Здійснено декомпозицію технологічного процесу подрібнення. Проведено структурний синтез моделі технологічного процесу подрібнення.

Наукова новизна. Запропоновано математичну модель технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням наявності інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках.

Практичне значення. Проведений системний аналіз технологічного процесу подрібнення на рудозбагачувальних фабриках дозволив визначити склад векторів некерованих вхідних змінних (вміст загального та магнітного заліза в залізорудній сировині, її міцність, вологість, середня крупність після дроблення за вмістом класу -20мм), керованих вхідних змінних (витрати залізорудної сировини в млин, витрати води в млин), вихідних змінних (гранулометричний склад на зливі класифікатора, щільність пульпи на зливі класифікатора, вміст заліза в промпродукті, втрати заліза в хвості збагачення, вихід заліза, видобуток заліза) та неконтрольованих збурень (зношення футерування млина, зношення шарів в млині, витрати електроенергії). Розроблено математичну модель технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням наявності інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках. Напрямок подальших досліджень полягає в синтезі системи управління технологічним процесом подрібнення залізорудної сировини.

Результати. Розроблено математичну модель технологічного процесу подрібнення залізорудної сировини з урахуванням наявності інформації про її хіміко-мінералогічні характеристики на рудозбагачувальних фабриках. Напрямок подальших досліджень полягає в синтезі системи управління технологічним процесом подрібнення залізорудної сировини.

Ключові слова: залізорудна сировина, математична модель, технологічний процес подрібнення, хіміко-мінералогічні характеристики, ядернофізичні методи, магнітометричні методи.

Швец Д. В. Синтез математической модели технологического процесса измельчения железорудного сырья с учетом его химико-минералогических характеристик на рудообогатительных фабриках

Цель. Разработка математической модели технологического процесса измельчения железорудного сырья с учетом информации о ее химико-минералогических характеристиках на рудообогатительных фабриках с целью дальнейшего синтеза системы управления технологическим процессом измельчения.

Методы исследования. Проведен системный анализ технологического процесса измельчения рудообогатительных фабрик, определены векторы управляемых и неуправляемых входных переменных, вектор выходных переменных и вектор возмущений. Осуществлена декомпозиция технологического процесса измельчения. Проведен структурный синтез модели технологического процесса измельчения.

Научная новизна. Предложена математическая модель технологического процесса измельчения железорудного сырья с учетом наличия информации о ее химико-минералогических характеристиках на рудообогатительных фабриках.

Практическое значение. Проведенный системный анализ технологического процесса измельчения на рудообогатительных фабриках позволил определить состав векторов неуправляемых входных переменных (содержание общего и магнитного железа в железорудном сырье, его прочность, влажность, средняя крупность после дробления по содержанию класса -20мм), управляемых входных переменных (расход железорудного сырья в мельницу, расход воды в мельницу), выходных переменных (гранулометрический состав пульпы на сливе классификатора, плотность пульпы на сливе классификатора, содержание общего железа в промпродукте, потери железа в хвосты обогащения, выход железа, извлечение железа) и неконтролируемых возмущений (износ футеровки мельницы, износ шаров в мельнице, расход электроэнергии). Разработанная структура технологического процесса измельчения представляет собой «мягкую» математическую модель, структурно устойчивую при случайных возмущениях переменных. Полученная математическая модель имеет возможность добавления новых переменных и устранения, при возникновении необходимости, старых переменных, обеспечивает возможность в процессе использования модели подключения новых приборов и устройств, которые будут предоставлять дополнительную информацию о состоянии технологического процесса измельчения.

Результаты. Разработана математическая модель технологического процесса измельчения железорудного сырья с учетом наличия информации о ее химико-минералогических характеристиках на рудообогатительных фабриках. Направление дальнейших исследований заключается в синтезе системы управления технологическим процессом измельчения железорудного сырья.

Ключевые слова: железорудное сырье, математическая модель, технологический процесс измельчения, химико-минералогические характеристики, ядернофизические методы, магнитометрические методы.

Shvets D.V. Synthesis of the mathematical model of the iron ore grinding technological process taking into account its chemical and mineralogical characteristics in ore processing plants

Purpose. Development of the mathematical model of the iron ore grinding technological process, taking into account information about its chemical and mineralogical characteristics at ore-processing factories for further synthesis of the control system of the grinding technological process.

Research methods. A systematic analysis of the technological process of grinding ore factories has been carried out, the vectors of controllable and uncontrollable input variables, the vector of output variables, and the perturbation vector were determined. Decomposition of the technological process of grinding has been carried out. Structural synthesis of the model of the technological process of grinding has been carried out.

Scientific novelty. The mathematical model of iron ore grinding technological process has been offered, taking into account the availability of information on its chemical and mineralogical characteristics at ore-processing plants.

Practical value. A systematic analysis of the technological process of ore grinding that had been carried out allowed to determine the composition of vectors of uncontrollable input variables (a content of total and magnetic iron in raw iron ore, its strength, humidity, average coarseness after grinding by size fraction content – 20mm), controllable input variables (ore mill raw iron ore consumption, ore mill water consumption), output variables (granulometric composition of pulp from classifier overflow, pulp density of pump from classifier overflow, total iron content in middling product, iron loss in refinement tailings, iron output, iron extraction) and uncontrollable perturbations (mill liner wear and tear, grinding balls wear and tear, power consumption). The developed structure of the grinding technological process is a "soft" mathematical model that is structurally stable under random disturbances of variables. The obtained mathematical model enables addition of new variables and elimination of old variables, provides the opportunity of connecting new devices that will provide additional information about the state of the grinding process.

Results. The mathematical model of iron ore grinding technological process has been developed, taking into account the availability of information on its chemical and mineralogical characteristics at ore-processing plants. The direction of further research is to synthesize a control system for the iron ore grinding technological process.

Key words: iron ore, mathematical model, grinding technological process, chemical and mineralogical characteristics, nuclear-physical methods, magnetometric methods.

УДК 658.38:621.1

Наливайко В.Г., Мовчан О.Г., Лосьев К.В. Влияние установления очередности профилактических ремонтов по замене аварийных участков трубопроводов и определение основных травмоопасных специальностей предприятий теплоснабжения

Цель. Целью данной работы является разработка методов и способов повышения безопасности труда при эксплуатации и ремонтах теплотрасс. Также необходимо выявить наиболее травмоопасные специальности работников предприятий теплоснабжения, уменьшив аварийную производственную нагрузку на них. Уменьшение аварийных работ может быть достигнуто путем проведения профилактических работ на теплотрассах, сокращая при этом количество опасных работ.

Методы исследования. Исследования проводились с использованием математико-статистического метода экспертных оценок. Данный метод позволяет оперативно выявить наиболее проблемные и затратные работы предприятий теплоснабжения возникающие как в процессе эксплуатации оборудования и теплотрасс так и с внезапными аварийными ситуациями. Таким образом можно определить перечень профилактических работ которые должны быть выполнены в первую очередь.

Научная новизна. Исследования с использованием математико-статистического метода экспертных оценок позволят оперативно определить проблемы при организации профилактических ремонтов на предприятиях теплоснабжения.

Практическая значимость. Полученные выводы по результатам исследований позволят разработать рекомендации по уменьшению количества аварийных работ на теплотрассах. Определив наиболее травмоопасные специальности предприятий теплоснабжения необходимо уменьшить производственную нагрузку связанную с аварийными работами через проведение профилактических работ на наиболее потенциально опасных аварийных участках.

Розробаные рекомендації на основе математико-статистического метода экспертных оценок позволяют улучшить производство организационных работ по ликвидации аварийных участков теплотрасс и снизить количество аварийных работ, что в свою очередь, уменьшит заболеваемость работников предприятий теплоснабжения и повысит безопасность труда особенно в осенне-зимний период года, а также сократит экономические потери от ликвидации аварийных ситуаций и лечения заболевших работников теплогенерирующих предприятий.

Результаты. Как показал анализ проведенных исследований наиболее значимыми в определении очередности проведения работ на предприятиях, являются прогнозирование аварийных участков теплотрасс и совершенствование организационных ремонтных работ на теплотрассах. На основании профилактических графиков ремонтных работ можно составить первоочередность замены труб аварийных участков, что намного облегчит планирование ремонтных работ по замене аварийных участков трубопроводов. Наиболее травмоопасными специальностями являются газосварщик и электросварщик. Условия их работы эксперты определяют как опасные и вредные.

Ключевые слова: экспертная оценка, математико-статистический метод экспертных оценок, баллы оценки.

Наливайко В.Г., Мовчан О.Г., Лосьев К.В. Вплив встановлення черговості профілактичних ремонтів по заміні аварійних ділянок трубопроводів і встановлення основних травмонебезпечних спеціальностей підприємств теплопостачання

Мета. Метою даної роботи є розробка способів підвищення безпеки праці при експлуатації і ремонтах тепломереж. Також необхідно виявити найбільш травмонебезпечні спеціальності працівників підприємств теплопостачання, зменшивши аварійне виробниче навантаження на них. Зменшення аварійних робіт може бути досягнуто шляхом проведення профілактичних робіт на тепломережах, скорочуючи при цьому кількість небезпечних робіт.

Методи дослідження. Дослідження проводилися з використанням математико-статистичного методу експертних оцінок. Даний метод дозволяє оперативно виявити найбільш проблемні та витратні роботи підприємств теплопостачання котрі виникають як в процесі експлуатації обладнання і теплотрас так і з раптовими аварійними ситуаціями. Таким чином можна визначити перелік профілактичних робіт які повинні бути виконані в першу чергу.

Наукова новизна. Дослідження з використанням математико-статистичного методу експертних оцінок дозволять швидко визначити проблеми при організації профілактичних ремонтів на підприємствах теплопостачання.

Практична значимість. Отримані висновки за результатами досліджень дозволять розробити рекомендації, щодо зменшення кількості аварійних робіт на теплотрассах. Визначивши найбільш травмонебезпечні спеціальності підприємств теплопостачання необхідно зменшити виробниче навантаження пов'язане з аварійними роботами через проведення профілактичних робіт на найбільш потенційно небезпечних аварійних ділянках.

Розроблені рекомендації на основі математико-статистичного методу експертних оцінок дозволять поліпшити виробництво організаційних робіт по ліквідації аварійних ділянок тепломереж і знизити кількість аварійних робіт, що в свою чергу, зменшить захворюваність працівників підприємств теплопостачання та підвищить безпеку праці особливо в осінньо-зимовий період року, а також скоротить економічні втрати від ліквідації аварійних ситуацій і лікування хворих працівників теплогенеруючих підприємств.

Результати. Як показав аналіз проведених досліджень найбільш значущими у визначенні черговості проведення робіт на підприємствах є прогнозування аварійних ділянок тепломереж і вдосконалення організаційних ремонтних робіт на теплотрассах. На підставі профілактичних графіків ремонтних робіт можна скласти першочерговість заміни труб аварійних ділянок, що набагато полегшить планування ремонтних робіт по заміні аварійних ділянок трубопроводів. Найбільш травмонебезпечними спеціальностями є газосварник та електросварник. Умови їх роботи експерти визначають як небезпечні і шкідливі.

Ключові слова: експертна оцінка, математико-статистичний метод експертних оцінок, бали оцінки.

Nalivaiko V.G., Movchan O.G., Losiev K.V. Influence setting the order of preventive repair for replacement of emergency sections of pipelines and identification of the main injury-hazardous specialties of heat supply enterprises.

Purpose To develop the ways for improving of safe work during the operation and repair of heating mains. It is also necessary to identify the most traumatic occupations of workers in heat supply enterprises, reducing the emergency workload on them. The reduction of emergency works can be achieved by carrying out preventive works on heating mains, while reducing the number of dangerous jobs.

Research methods. The research was carried out using the mathematical-statistical method of expert assessments. This method allows you to identify quickly the most problematic and costly work of the enterprises of heat supply arising both in the process of operation of the equipment and heating mains and with sudden emergency situations. Thus, it is possible to determine the list of preventive works that must be performed in the first place.

Scientific novelty. Studies using the mathematical and statistical method of expert assessments will quickly identify problems in the organization of preventive repairs at heat supply enterprises.

Practical value. The obtained conclusions on the results of the research allow to develop recommendations for reducing the number of emergency works on heating mains. Having determined the most traumatic specialties of heat supply enterprises, it is necessary to reduce the production load associated with emergency work through the provision of preventive maintenance at the most potentially dangerous emergency sites. The developed recommendations based on the mathematical and statistical method of expert assessments will improve the production of organizational works for the liquidation of emergency sections of heating mains and reduce the number of emergency works, which in turn will reduce the incidence of workers in heat supply enterprises and increase labor safety, especially in the autumn-winter period of the year. It also will reduce economic losses from liquidation of emergency situations and treatment of sick workers of heat-generating enterprises.

Results. As the analysis of conducted studies showed the most significant in determining of the work order at enterprises, are the forecasting of emergency sections of heating mains and improving organizational repairs on heating mains. On the basis of preventive maintenance schedules, it is possible to prioritize the replacement of pipes in emergency areas, which will greatly facilitate the planning of repair works to replace emergency sections of pipelines. The most traumatic specialties are a gas welder and an electric welder. The conditions of their work experts define as dangerous and harmful.

Key words: expert evaluation, mathematical and statistical method of expert assessments, scores.

УДК 550.832.9

Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А., Паранюк Д. І. Методи оптимізації процесу буріння свердловин

Метою є підвищення ефективності процесу керування бурінням свердловин в умовах змінення фізико-механічних і хіміко-мінералогічних характеристик гірської породи, що буриться. Основним завданням є обґрунтування критерію та розроблення методів оптимізації процесу буріння свердловин в умовах змінення характеристик різновидів гірських порід у процесі буріння.

Методи дослідження. У роботі використано такі методи: аналіз вітчизняної і світової літератури з теми дослідження; методи аналітичного синтезу математичних моделей, методи математичної статистики і теорії імовірності для оброблення результатів експериментів; методи комп'ютерного моделювання; методи чисельного моделювання.

Наукова новизна полягає у тому, що для оптимізації процесу буріння свердловин запропоновано метод, який відрізняється від відомих тим, що визначення різновидів гірських порід здійснюють із застосуванням адаптивної нейро-нечіткої моделі, навчання якої здійснюють на основі результатів каротажу із застосуванням ультразвукових, ядерно-фізичних та магнітометричних тестових вимірювань та з урахуванням оперативних параметрів силової установки у процесі буріння.

Практичне значення полягає у розробленні рекомендацій до визначення переліку параметрів, які необхідно врахувати у процесі оптимізації процесу буріння свердловин в умовах різних типів геолого-мінералогічної структури гірської породи. Зокрема, при бінарній структурі швидкість буріння і крутий момент є достатніми вхідними параметрами для ефективної оцінки, точність ідентифікації при цьому становить до 95%. Водночас, використання зазначених показників для оптимізації процесів буріння породи у залізрудних родовищах є недостатнім, оскільки точність розпізнавання різновидів моделлю із 2 входами не перевищує 55%. Тому доцільнішим є застосування 8 входів, що дозволяє досягти точності 91%.

Результати. Для опису складних процесів руйнування гірських порід у перевантажених локальних областях у процесі буріння доцільно застосувати безрозмірний енергетичний критерій маятникових хвиль і геомеханічного квазірезонансу, що дозволяє надати кількісну оцінку оптимального енергетичного діапазону, що спрямовується бурильної установкою до бурового інструменту. Водночас, при розрахунку енергетичного критерію об'ємного руйнування гірської у процесі буріння необхідна інформація як про характеристики гірських порід, що буряться, так і параметри функціонування бурової установки.

Ключові слова: оптимізація, буріння свердловин, каротаж, різновиди руди, нейро-нечітка модель.

Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А., Паранюк Д. І. Методы оптимизации процесса бурения скважин

Целью является повышение эффективности процесса управления бурением скважин в условиях изменения физико-механических и химико-минералогических характеристик горной породы, которая бурится. Основной задачей является обоснование критерия и разработка методов оптимизации процесса бурения скважин в условиях изменения характеристик разновидностей горных пород в процессе бурения.

Методы исследования. В работе использованы следующие методы: анализ отечественной и мировой литературы по теме исследования; методы аналитического синтеза математических моделей, методы математической статистики и теории вероятности для обработки результатов экспериментов; методы компьютерного моделирования; методы численного моделирования.

Научная новизна заключается в том, что для оптимизации процесса бурения скважин предложен метод, который отличается от известных тем, что определение разновидностей горных пород осуществляют с применением адаптивной нейро-нечеткой модели, обучение которой осуществляют на основе результатов каротажа с применением ультразвуковых, ядерно-физических и магнитометрическая тестовых измерений и с учетом оперативных параметров силового установки в процессе бурения.

Практическое значение состоит в разработке рекомендаций к определению перечня параметров, которые необходимо учитывать в процессе оптимизации процесса бурения скважин в условиях различных типов геолого-минералогической структуры горной породы. В частности, при бинарной структуре скорости бурения и крутящий момент являются достаточными входными параметрами для эффективной оценки, точность идентификации при этом составляет до 95%. В то же время, использование указанных показателей для оптимизации процессов бурения породы в железорудных месторождениях недостаточно, поскольку точность распознавания разновидностей модели с 2 входами не превышает 55%. Поэтому целесообразнее применение 8 входов, что позволяет достичь точности 91%.

Результаты. Для описания сложных процессов разрушения горных пород в перегруженных локальных областях в процессе бурения целесообразно применить безразмерный энергетический критерий маятниковых волн и геомеханического квазірезонанса, что позволяет получить количественную оценку оптимального энергетического диапазона, направляемой бурильной установкой в буровой инструмент. В то же время, при расчете энергетического критерия объемного разрушения горной в процессе бурения необходимая информация как о характеристиках горных пород, которые бурятся, так и о параметрах функционирования буровой установки.

Ключевые слова: оптимизация, бурение скважин, каротаж, разновидности руды, нейро-нечеткая модель.

Morkun V.S., Morkun N.V., Tron V.V., Haponenko A.A., Haponenko I.A., Paranyuk D. I. Methods of optimization of the well drilling process

Purpose. To increase the efficiency of the control process for drilling wells in the face of changing physical-mechanical and chemical-mineralogical characteristics of the rock being drilled. The main task is to substantiate the criterion and develop methods for optimizing the process of drilling wells under conditions of changing characteristics of rock varieties during drilling.

Research methods. The following methods were used in the work: analysis of domestic and world literature on the topic of research; methods of analytical synthesis of mathematical models, methods of mathematical statistics and probability theory for processing experimental results; computer simulation methods; methods of numerical modeling.

Scientific novelty is that to optimize the process of drilling wells, a method is proposed that differs from the well-known ones in that the types of rocks are determined using an adaptive neuro-fuzzy model, the training of which is based on the results of logging using ultrasonic, nuclear-physical and magnetometric test measurements and taking into account the operational parameters of the power plant during drilling.

Practical value consists in developing recommendations for determining a list of parameters that must be taken into account in the process of optimizing the drilling process under various types of geological and mineralogical rock structure. In particular, with a binary structure, the drilling speed and torque are sufficient input parameters for an effective assessment, and the identification accuracy is up to 95%. At the same time, the use of these indicators to optimize rock drilling processes in iron ore deposits is not enough, since the recognition accuracy of varieties of a model with 2 inputs does not exceed 55%. Therefore, it is more appropriate to use 8 inputs, which allows to achieve an accuracy of 91%.

Results. To describe the complex processes of rock destruction in congested local areas during drilling, it is advisable to apply the dimensionless energy criterion of pendulum waves and geomechanical quasi-resonance, which allows us to obtain a quantitative estimate of the optimal energy range sent by the drilling rig to the drilling tool. At the same time, when calculating the energy criterion for rock volumetric destruction during drilling, the necessary information is both about the characteristics of the rocks that are being drilled, and about the parameters of the functioning of the drilling rig.

Key words: optimization, well drilling, logging, ore varieties, neuro-fuzzy model.

УДК 622.271.3

Несмашный Е.А., Ткаченко Г.И., Герасимова Е.В. Разработка физико-математической модели скатывания кусков горной породы с породных откосов

Цель. Разработка физико-математической модели для определения вероятного радиуса разлета кусков породы падающих с верхних горизонтов глубоких карьеров ПАО «ЦГОК», позволяющей оценить их величину, спрогнозировать кинетику процесса при различных геометрических параметрах уступов.

Методы исследования. Комплексный метод исследований: обобщены и проанализированы предыдущие научно-практические работы в данной области; применены фундаментальные законы физики и механики, аналитические и численные методы геомеханики; использовались компьютерные технологии и ранее разработанные авторами вычислительные программы для расчета, обработки и анализа полученных результатов. Выполнен анализ работ по геомеханическому состоянию бортов карьера №4 ПАО «ЦГОК» и отвалов, которые проводились КП «Академический дом» Академии горных наук Украины.

Научная новизна. Результаты могут быть полезны для дальнейших исследований в области геомеханических процессов на глубоких карьерах Кривбасса, с целью предупреждения и уменьшения негативных явлений, связанных с нарушениями устойчивости бортов карьеров и отвалов. Повысить безопасность открытых горных работ.

Практическое значение. Полученные результаты расчетов позволяют определить вероятный радиус разлета кусков породы, падающих с верхних горизонтов карьера №4 ПАО «ЦГОК», оценить их величину при таких ожидаемых процессах: скатывания или скольжения кусков породы по плоской поверхности породного склона; скатывания или скольжения кусков породы по поверхности породного склона сложного профиля; скатывания или скольжения кусков породы по поверхности породного склона сложного профиля с последующим свободным падением; - скатывания кусков породы по поверхности породного склона сложного профиля с последующим свободным падением и неупругом, нецентральной ударе о поверхность склона нижележащих групп уступов.

Результаты. Установлено, что при существующих геометрических параметрах бортов и групп уступов карьера №4 ПАО «ЦГОК», при вероятном падении кусков породы с верхних горизонтов на горизонты транспортных берм, значения радиуса их разлета можно ожидать пределах от 1,5 до 27,2 м, в зависимости от высоты откоса и его профиля, угла наклона и ожидаемых значений коэффициентов трения качения и скольжения кусков породы по поверхности откосов.

Ключевые слова: физико-математическая модель, горные породы, уступ, откос, скольжение, скатывание, радиус разлета

Несмашный С.О., Ткаченко Г.И., Герасимова К.В. Розроблення фізико-математичної моделі скочування бутів гірської породи з породних відкосів

Мета. У статті моделюються кінетичні та енергетичні процеси падіння уламків гірничих порід з вище лежачих горизонтів на транспортні берми кар'єру № 4 ПАО «ЦГЗК». Обчислюється ймовірний радіус розльоту уламків гірської породи при їх падінні з породного укосу висотою понад 30 м з метою подальшого запобігання шкоди від цих процесів і підвищення безпеки відкритих гірничих робіт.

Методи дослідження. Комплексний метод досліджень, що включає: аналіз науково дослідних робіт по геомеханічному обґрунтуванню стійких параметрів уступів бортів та відвалів кар'єру № 4 ПАО «ЦГЗК»; інженерно-геологічні вишукування, використання фундаментальних законів фізики, механіки та комп'ютерні технології і обчислювальні програми, які розроблені авторами, для виконання аналітичних розрахунків, оброблення, аналізу результатів досліджень

Наукова новизна. Результати дозволяють науково обґрунтувати ймовірні негативні процеси від скочування або падіння уламків гірничої породи, які відриваючись від поверхні схилів, скочуються до нижніх горизонтів, набуваючи значної швидкості, а значить і кінетичної енергії. Розроблена фізико-математична модель може бути корисною для подальшого розвитку теоретичних положень щодо геомеханіки відкритих гірничих робіт з метою підвищення ефективності й безпеки на кар'єрах Кривбасу.

Практичне значення. Розроблена фізико-математична модель для визначення ймовірного радіусу розльоту уламків гірничої породи падаючих з верхніх горизонтів кар'єра №4 ПРАТ «ЦГЗК» дозволяє оцінити їх величину при таких

очікуваних процесів: - скочуванні або ковзанні по поверхнях простого або складного профілю з наступним вільним падінням; - скочуванні по поверхні породного схилу складного профілю з наступним вільним падінням і непружноту, нецентральному ударі об поверхні нижчих транспортних берм або груп уступів.

Результати. Встановлено, що при існуючих геометричних параметрах бортів і груп уступів кар'єра №4 ПАТ «ЦГЗК», при ймовірному падінні шматків породи з верхніх горизонтів на обрії транспортних берм, значення радіуса їх розльоту можна очікувати межах від 1,5 до 27,2 м, в залежності від висоти укосу і його профілю, кута нахилу і очікуваних значень коефіцієнтів тертя кочення і ковзання шматків породи по поверхні укосів.

Ключові слова: відкриті гірничі роботи, падіння породних уламків, коефіцієнти тертя кочення і ковзання; радіус розльоту

Nesmachny E.A, Tkachenko G.I, Gerasimova K. V. Development of a physical and mathematical model of rolling rock pieces from rock slopes

Purpose. Development of a physical and mathematical model for determining the probable radius of expansion of pieces of rock falling from the upper horizons of deep quarries of PJSC "Central GOK", which makes it possible to estimate their value, to predict the kinetics of the process at various geometric parameters of the ledges.

Research methods. Integrated research method: generalized and analyzed previous scientific and practical work in this area; applied fundamental laws of physics and mechanics, analytical and numerical methods of geomechanics; used computer technologies and computational programs previously developed by the authors for calculating, processing and analyzing the results obtained. The analysis of works on the geomechanical state of the sides of open pit No. 4 of PJSC "Central GOK" and dumps, which were carried out by the KP "Academic House" of the Academy of Mining Sciences of Ukraine, was carried out.

Scientific novelty. The results can be useful for further research in the field of geomechanical processes in deep open pits in Kryvbas, in order to prevent and reduce negative phenomena associated with disturbances in the stability of the sides of open pits and dumps. Improve the safety of open pit mining.

Practical value. The obtained calculation results allow us to determine the probable radius of expansion of rock pieces falling from the upper horizons of open pit No. 4 of PJSC "Central GOK", to estimate their value in the following expected processes: rolling or sliding of rock pieces along the flat surface of the rock slope; rolling or sliding of rock pieces along the surface of a rock slope of a complex profile; rolling or sliding of rock pieces along the surface of a rock slope of a complex profile, followed by a free fall; - rolling of rock pieces along the surface of a rock slope of a complex profile, followed by free fall and inelastic, noncentral impact on the surface of the slope of the underlying groups of ledges.

Results. It was found that with the existing geometric parameters of the sides and groups of benches of open pit No. 4 of PJSC CGOK, with the probable fall of rock pieces from the upper horizons onto the horizons of transport berms, the values of the radius of their expansion can be expected in the range from 1.5 to 27.2 m, depending on the height of the slope and its profile, the angle of inclination and the expected values of the coefficients of rolling friction and sliding of rock pieces along the surface of the slopes.

Key words: physical and mathematical model, rocks, ledge, slope, sliding, rolling, radius of expansion

УДК 691.32

Астахова Н. В. Дослідження впливу активації на властивості наповнювача з залізовмісних мінеральних комплексів
Метою дослідження є отримання малоцементного бетону, що має високу швидкість формування фізико-механічних властивостей, шляхом модифікації його структури активованими залізовмісними цеолітами мінеральними комплексами, які представляють собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂» різного ступеня дисперсності і залізолікатним лужним колоїдним розчином.

Методи дослідження математичного моделювання для дослідження процесів формування структури та фізико-механічних властивостей бетонів, а також стандартні і спеціальні методи дослідження для визначення властивостей наповнювача з залізовмісних мінеральних комплексів та статистичний аналіз для обробки результатів експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що теоретично доведена і експериментально підтверджена можливість модифікації структури бетону шляхом введення до його складу активованих залізовмісних цеолітами мінеральних комплексів, які представляють собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂» різного ступеня дисперсності, і залізолікатного лужного колоїдного розчину, що призводить до збільшення ступеня і швидкості гідратації цементу, а також до підвищення його активності.

Практична значимість результатів полягає в отриманні наповнювача зі збільшеною гідралічною активністю, який представляє собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂» різного ступеня дисперсності, активованого силікатами лужного металу, що дозволяє економити цемент та розширює сировинну базу будівельних матеріалів.

Результати. В статті проаналізовані результати дослідження наповнювача з залізовмісних мінеральних комплексів. В якості критерію активуючого впливу наповнювача на властивості цементного каменю використовувалась його гідралічна активність, яка є однією з найважливіших характеристик якості мінеральних добавок, а також склад новоутворень, які були отримані в процесі його активації.

Встановлено, що активація мінеральних комплексів, які представляють собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CO₂» силікатами лужного металу призводить до збільшення їх гідралічної активності за рахунок утворення на їх поверхні мінералів групи цеолітів на основі заліза, що сприяє зв'язуванню гідроксиду кальція.

Ключові слова: наповнювач, активація, гідралічна активність, залізовмісні гірські породи, відходи гірничозбагачувальних комбінатів, силікати натрію, залістисті цеоліти, водоутримуюча здатність.

Астахова Н. В. Исследование влияния активации на свойства наполнителя из железосодержащих минеральных комплексов

Целью исследования является получение малоцементного бетона, обладающего высокой скоростью формирования физико-механических свойств, путем модификации его структуры активированными железистыми цеолитами мине-

ральними комплексами, представляючими собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂» різної ступені дисперсності і залізо-силікатним щелочним коллоїдним розчином.

Методи дослідження математичного моделювання для дослідження процесів формування структури і фізико-механічних властивостей бетонів, а також стандартні і спеціальні методи дослідження для визначення властивостей наповнювача із залізо-содержащих мінеральних комплексів і статистичний аналіз для обробки результатів експерименту.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що теоретично доведено і експериментально підтверджено можливість модифікації структури бетону за рахунок введення в його склад активованих залізо-содержащих цеолітами мінеральних комплексів, представляючих собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂» різної ступені дисперсності, і залізо-силікатного щелочного коллоїдного розчину, що призводить до збільшення ступені і швидкості гідратації цементу, а також підвищенню його активності.

Практичне значення результатів полягає в отриманні наповнювача, що володіє підвищеною гідравлічною активністю, який представляє собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂» різної ступені дисперсності, активованого силікатами щелочного металу, що розширює сировинну базу будівельних матеріалів.

Результати. В статті аналізуються результати дослідження наповнювача із залізо-содержащих мінеральних комплексів.

В якості критерію активуючого впливу наповнювача на властивості цементного каменю використовувалась його гідравлічна активність, яка є однією з найважливіших характеристик якості мінеральних добавок, а також склад новоутворених, які були отримані в процесі його активації.

Встановлено, що активація мінеральних комплексів, які представляють собою систему «FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CO₂», силікатами щелочного металу призводить до збільшення їх гідравлічної активності за рахунок утворення на їх поверхні мінералів групи цеолітів на основі заліза, що сприяє зв'язуванню гідроксиду кальцію.

Ключові слова: наповнювач, активація, гідравлічна активність, залізо-содержащие гірські породи, відходи горнообогатительних комбінатів, силікати натрію, залізо-содержащие цеоліти, водозберігаюча здатність.

Astakhova N.V. Activation impacts on iron-containing mineral compound filler properties

Purpose. To obtain low cement castable with high-speed formation of physical and mechanical properties through modification of its structure by mineral compounds activated by ferruginous zeolites and the iron-silicate alkaline colloidal grout. The compounds are the system “FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂” of various dispersion degrees.

Research methods. To study structure formation and physical and mechanical properties of concretes, the following methods are applied: the mathematical model method, standard and special research methods for determining properties of the iron-containing mineral compound filler, the statistical analysis for processing the experiment results.

Scientific novelty. The theoretical substantiation and experimental validation of the possibility to modify the structure of concrete by adding mineral compounds (which are the system “FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂” of various dispersion degrees and activated by ferruginous zeolites) and the iron-silicate alkaline colloidal grout. The modification results in the increased degree and speed of cement hydration and raise in its activity.

The practical value of the results consists in obtaining the filler (which is the system “FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂” of various dispersion degrees) of the increased hydraulicity and activated by alkaline silicates. This extends the raw material base for building materials.

Results of the investigation into the iron-containing mineral compound filler.

Hydraulicity, which is one of the most important features of mineral admixtures, and the composition of newgrowths obtained during activation are the criteria of the activating impact of the filler on the cement brick.

It is determined that activation of mineral compounds represented by the system “FeO – Fe₂O₃ – SiO₂ – CaO – CO₂” by alkaline silicates results in the increased hydraulicity due to formation of the iron-based zeolite minerals on their surface that contributes to lime hydrate fixation.

Key words: filler, activation, hydraulicity, iron-containing rocks, mining and concentrating plant waste, sodium silicates, ferruginous zeolites, water-holding capacity.

УДК 621.74:621.744.5.044:621.747.06

Плотніков В.В., Бабаєвська О.В. Застосування електричного впливу для очищення литва та в суміжних технологічних процесах

Метою виконаної роботи є вивчення та аналіз відомих на сьогодні способів застосування електрогідравлічного ефекту в технології ливарного виробництва і суміжних галузях промисловості, визначення глибини досліджуваності теоретичних аспектів процесу електрогідравлічного очищення литва й пошук резервів удосконалення відповідних технологій.

Методи дослідження. Метод теоретичного аналізу даних наукових публікацій, патентної документації з досліджуваної проблеми; метод синтезу й інтеграції результатів аналізу; метод інтерпретації.

Наукова новизна полягає в доведенні доцільності й визначенні напрямку подальшого розвитку теорії й технології електрогідравлічного очищення виливків.

Практична значимість роботи полягає в тому, що результати дослідження можуть бути використані для досягнення економічного ефекту від електрогідравлічного очищення як чорного, так і кольорового литва, а також для підвищення екологічної безпеки ливарного виробництва. Окрім того результати дослідження можуть слугувати основою для розробки подібних технологій у суміжних галузях промисловості.

Результати. На сьогоднішній день відома безліч способів використання електричного струму для очищення матеріалів від забруднень, у тому числі литих виробів від формувальних сумішей. Однак більшість із них так і не знайшли широкого застосування в промислових масштабах.

В той же час, ґрунтуючись на аналізі існуючих процесів і установок для очищення, можна зробити висновок про доцільність і перспективність використання електрогідравлічного очищення різних матеріалів як у ливарному виробництві, так і в суміжних галузях промисловості, зокрема для очищення кузовів транспортних засобів, ущільненні ливарних, будівельних, скульптурних й інших форм, регенерації формувальних земель тощо.

Незважаючи на достатню вивченість теорії й технології електрогідравлічного ефекту, є низка маловивчених питань, поглиблене дослідження яких дозволить не лише ефективніше використовувати зазначене явище в ливарному виробництві, але й розробити принципово нові методи й пристрої для очищення виробів.

Ключові слова: виливок, очищення литва, електрогідравлічна установка, імпульсний струм, формувальна суміш.

Плотников В.В., Бабаевская О.В. Применение электрического воздействия для очистки литья и в смежных технологических процессах

Целью выполняемой работы является изучение и анализ известных сегодня способов применения электрогидравлического эффекта в технологии литейного производства и смежных отраслях промышленности, определения глубины исследованности теоретических аспектов процесса электрогидравлической очистки литья и поиск резервов усовершенствования соответствующих технологий.

Методы исследования. Метод теоретического анализа данных научных публикаций, патентной документации по исследуемой проблеме; метод синтеза и интеграции результатов анализа; метод интерпретации.

Научная новизна заключается в доказательстве целесообразности и определении направления дальнейшего развития теории и технологии электрогидравлической очистки отливок.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты исследования могут быть использованы для достижения экономического эффекта от электрогидравлической очистки как черного, так и цветного литья, а также для повышения экологической безопасности литейного производства. Кроме того, результаты исследования могут служить основанием для разработки подобных технологий в смежных отраслях промышленности.

Результаты. На сегодняшний день известно множество способов использования электрического тока для очистки материалов от загрязнений, в том числе литых изделий от формирующих смесей. Однако большинство из них так и не нашли широкого применения в промышленных масштабах.

В то же время, основываясь на анализе существующих процессов и установок для очистки, можно сделать вывод о целесообразности и перспективности использования электрогидравлической очистки различных материалов как в литейном производстве, так и в смежных отраслях промышленности, в частности для очистки кузовов транспортных средств, уплотнения литейных, строительных, скульптурных и других форм, регенерации формирующих земель и т.д. Несмотря на достаточную изученность теории и технологии электрогидравлического эффекта, имеется ряд малоизученных вопросов, углубленное исследование которых позволит не только эффективнее исследовать указанное явление в литейном производстве, но и разработать принципиально новые методы и устройства для очистки изделий.

Ключевые слова: отливка, очистка литья, электрогидравлическая установка, импульсный ток, формовочная смесь

Plotnikov V.V., Babaievska O.V. The use of electrical effects for cleaning castings and related processes

Purpose. To study and analyze of known methods of applying the electro-hydraulic effect in foundry technology and related industries, determine the depth of research on the theoretical aspects of the process of electro-hydraulic cleaning of castings and finding reserves for improving the relevant technologies.

Research methods were used as the method of theoretical analysis of the data of scientific publications, patent documentation on the problem under study; method of synthesis and integration of analysis results; interpretation method.

Scientific novelty consists in proving the feasibility and determining the direction of further development of the theory and technology of electro-hydraulic cleaning of castings.

Practical value. The results of the study can be used to achieve the economic effect of electro-hydraulic cleaning of both black and color castings, as well as to improve the environmental safety of the foundry.

Results. To date, there are many ways to use electric current to clean materials from contaminants, including cast products from molding compounds. However, most of them have not found widespread use on an industrial scale.

At the same time, based on an analysis of existing plants and cleaning processes, it can be concluded that it is advisable and promising to use electro-hydraulic cleaning of various materials both in foundry and in related industries.

Despite the sufficient knowledge of the theory and technology of the electro-hydraulic effect, there are a number of little-studied issues, an in-depth study of which will allow not only more efficient use of this phenomenon in foundry, but also develop fundamentally new methods and devices for cleaning products.

Key words: casting, casting cleaning, electro-hydraulic installation, pulse current, molding sand.

УДК 622.013.364

Грищенко М.А. Відпрацювання природно багатих залізних рудних покладів на глибоких горизонтах з недостатніми кутами залягання в умовах високого гірського тиску

Відпрацювання покладів природно багатих залізних руд в умовах високого гірського тиску на глибоких горизонтах є однією з основних проблем теперішнього часу та близького майбутнього. Втрати руди пов'язані з формуванням еліпсоїди випуску яка в свою чергу намагається отримати форму циліндру, тим самим до воронки випуску руди які знаходяться на лежачому боці не стягуються. Тим самим при недостатніх кутах втрати можуть сягати майже половини всього запасу.

Мета. Метою роботи є аналіз існуючих технологій, дослідження та розробка ефективної технології випуску відбитої рудної маси з лежачого боку в якій за умов слабо-похилих кутів втрати будуть мінімальними.

Методи дослідження. Питання випуску досліджувалося на лабораторних моделях було проведено ряд дослідів з урахуванням масштабу на еквівалентних матеріалах. Проведено техніко-економічний аналіз випуску відбитої рудної маси, розглянуті фактори які безпосередньо впливають на ефективність очисних робіт в трикутнику лежачого боку.

Наукова новизна. Проведеними лабораторними дослідженнями була встановлена залежність, що при веденні очистних робіт під перекриттям непошкодженого рудного масиву випуск пошаровим похилим потоком не формує еліпсоїди випуску.

Практична значимість. В проведеній роботі пропонується створення технології підготовки блоку для формування відбійки та випуску корисної копалини пошаровим похилим потоком, який в свою чергу дасть максимальне вилучення корисної копалини без втрат в трикутнику лежачого боку.

Результати. В даній роботі на лабораторній моделі було проведено і порівняно ряд дослідів для визначення залежності кількості втрат руди залежно від кута падіння рудного покладу, та запропоновано нову технологію відпрацювання рудних покладів з просуванням очистного вибою з лежачого боку на висячий в якій кут залягання майже не має впливу на якість вилучення.

Ключові слова: похилий потік, під перекриттям, втрати, засмічення, підземна розробка, мертва зона, еліпсоїда випуску.

Грищенко М.А. Отработка природно богатых железных залежей на глубоких горизонтах с недостаточными углами залегания в условиях высокого горного давления

Отработка залежей природно богатых железных руд в условиях высокого горного давления на глубоких горизонтах есть одной из основных проблем настоящего времени и ближайшего будущего. Потери руды связаны с формированием эллипсоида выпуска, которая в свою очередь стремится приобрести форму цилиндра, тем самым к воронке выпуска руды, которые находятся на лежащем боку не стягиваются. Тем самым при недостаточных углах потери могут составлять почти половину всего запаса.

Цель. Целью работ представлен анализ существующих технологий, исследование и разработка эффективной технологии выпуска отбитой рудной массы с лежачего бока в которой при условиях слабонаклонного угла потери будут минимальными.

Методы исследования. Вопрос выпуска исследовался на лабораторных моделях, было проведено ряд исследований с учетом масштаба на эквивалентных материалах. Проведено технико-экономический анализ выпуска отбитой рудной массы, рассмотрены факторы, которые непосредственно влияют на эффективность очистных работ в треугольнике лежачего бока.

Научная новизна. Проведенными лабораторными испытаниями была установлена зависимость, что при ведении очистных работ под прикрытием ненарушенного рудного массива выпуск слоевым наклонным потоком не формирует эллипсоиду выпуска.

Практическая значимость. В проведенной работе предлагается создание технологии подготовки блока для формирования отбійки и выпуска полезного ископаемого слоевым наклонным потоком, который в свою очередь даст максимальное извлечение полезного ископаемого без потери в треугольнике лежачего бока.

Результаты. В данной работе на лабораторной модели было проведено і сравнено ряд испытаний для определения зависимости количества потерь руды в зависимости от угла падения рудной залежи, и предложено новую технологию отработки рудных месторождений с продвижением очистного забоя с лежачего на висячий бок в которой угол залежи практически не имеет влияние на качество извлечения.

Ключевые слова: наклонный поток, под прикрытием, потери, засорение, подземная разработка, мертвая зона, эллипсоида выпуска.

Hryshchenko M.A. Processing of naturally rich iron deposits at deep horizons with insufficient deposit angles under high rock pressure

The development of deposits of naturally rich iron ores under high rock pressure at deep horizons is one of the main problems of the present and the near future. Losses of ore are associated with the formation of an ellipsoid of release, which in turn tends to take the form of a cylinder, thereby not pulling together to the funnel of the release of ore that are on the lying side. Thus, with insufficient angles, losses can amount to almost half of the entire stock.

Purpose. The aim of the work is an analysis of existing technologies, research and development of an effective technology for the release of broken ore mass from a lying side in which, under conditions of a slightly inclined angle, losses will be minimal.

Research methods. The issue was investigated on laboratory models; a number of studies were conducted taking into account the scale on equivalent materials. A feasibility study of the release of broken ore mass is carried out, factors that directly affect the efficiency of the treatment robot in the lying side triangle are considered.

Scientific novelty. By laboratory tests, was found that when conducting treatment operations under the cover of an undisturbed ore mass, the output in a layered inclined flow does not form an ellipsoid of release.

Practical value. It is proposed to create a technology for preparing a block for the formation of a breakdown and release of minerals by a layered inclined flow, which in turn destroys the maximum extraction of minerals without loss in the lying side triangle.

Results. A series of tests was carried out to determine the dependence of the amount of ore losses depending on the angle of incidence of the ore deposit, and a new technology for mining ore deposits with the advancement of the working face from the lying to the hanging side in which the angle of the deposit has practically no effect on extraction quality.

Key words: inclined flow, under cover, losses, clogging, underground mining, death area, ellipsoid release.

УДК 622.788

Савельєв С.Г., Кондратенко М.М., Бабасвська О.В. Оцінка методики визначення впливу висоти шару аглошихти на його структурну міцність

Відзначена важлива роль збільшення висоти спікаемого шару залізородної шихти для поліпшення техніко-економічних показників агломераційного виробництва. Обґрунтована головна причина підвищення механічної міцності агломерату у цьому випадку, яка полягає у збільшенні кількості перенесеного тепла верхньої нагрітої частини шару до нижче розташованих шарів. Це призводить до підвищення температури в зоні формування агломерату, що

викликає збільшення кількості розплаву в цій зоні, підвищує ступінь завершення в ній фізико-хімічних перетворень. З іншого боку, збільшення висоти шару спікаємої шихти викликає підвищення його газодинамічного опору з відповідним зниженням швидкості фільтрації газу та продуктивності агломераційної машини по спеку. Враховуючи існування критичного рівня підвищення висоти спікаемого шару, починаючи з якого відбувається непропорційне збільшення його газодинамічного опору, обумовлене погіршенням структури шихти внаслідок руйнування гранул нижнього шару, важливо мати методику визначення критичної висоти шару.

Метою роботи є дослідження можливості застосування теорії контактних напружень до вирішення питання впливу висоти шару агломераційної шихти на його структурну міцність.

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

Наукова новизна. На основі проведених розрахунків встановлено, що теорія пружності та пластичної деформації при пружному зминанні не може бути застосована для дослідження деформації гранул згрудкованої агломераційної шихти під дією ваги верхніх шарів, оскільки у цьому випадку має місце невідповідність умовам застосування цієї теорії.

Практична значимість роботи полягає у необхідності розробки та застосуванні при оцінці впливу висоти шару аглошихти на його структурну міцність методів, які не базуються на теорії контактних напружень.

Результати роботи свідчать про те, що застосування теорії контактних напружень для визначення навантажень в насипному шарі гранул згрудкованої шихти на стрічці агломераційної машини та граничної висоти цього шару не коректно.

Ключові слова: агломерат, міцність, пружність, шар шихти, контакт, висота шару

Савельев С.Г., Кондратенко М.Н., Бабаевская О.В. Оценка методики определения влияния высоты слоя аглошихты на его структурную прочность

Отмечена важная роль увеличения высоты спекаемого слоя железорудной шихты для улучшения технико-экономических показателей агломерационного производства. Обоснована главная причина повышения механической прочности агломерата в этом случае, которая заключается в увеличении количества перенесенного тепла нагретой верхней части слоя к ниже расположенным слоям. Это приводит к повышению температуры в зоне формирования агломерата, что вызывает увеличение количества расплава в этой зоне, повышает степень завершения в ней физико-химических превращений. С другой стороны, увеличение высоты слоя спекаемой шихты вызывает повышение его газодинамического сопротивления с соответствующим снижением скорости фильтрации газа и производительности агломерационной машины по спеку. Учитывая существование критического уровня повышения высоты спекаемого слоя, начиная с которого происходит непропорциональное увеличение его газодинамического сопротивления, обусловленное ухудшением структуры шихты вследствие разрушения гранул нижнего слоя, важно иметь методику определения критической высоты слоя.

Целью работы является исследование возможности применения теории контактных напряжений к решению вопроса влияния высоты слоя агломерационной шихты на его структурную прочность.

Методы научного исследования. В работе использованы общелогические методы научного исследования – анализ и синтез, аналогия, обобщение.

Научная новизна. На основе проведенных расчетов установлено, что теория упругости и пластической деформации при упругом сжатии не может быть применена для исследования деформации гранул окомкованной агломерационной шихты под действием веса верхних слоев, поскольку в этом случае имеет место несоответствие условиям применения этой теории.

Практическая значимость работы заключается в необходимости разработки и применении при оценке влияния высоты слоя аглошихты на его структурную прочность методов, которые не базируются на теории контактных напряжений.

Результаты работы свидетельствуют о том, что применение теории контактных напряжений для определения нагрузок в насипном слое гранул окомкованной шихты на ленте агломерационной машины и предельной высоты этого слоя не коректно.

Ключевые слова: агломерат, прочность, упругость, слой шихты, контакт, высота слоя

Savilev S.G., Kondratenko M.N., Babaevska O.V. Evaluation of the method for determining the influence of the height of the sinter layer on its structural strength

The important role of increasing the height of the sintered layer of iron ore charge for improving the technical and economic indicators of sintering production is noted. The main reason for increasing the mechanical strength of the agglomerate in this case is proved, which consists in increasing the amount of transferred heat of the heated upper part of the layer to the lower layers. This leads to an increase in the temperature in the agglomerate formation zone, which causes an increase in the amount of melt in this zone, increases the degree of completion of physical and chemical transformations in it. On the other hand, an increase in the height of the charge layer causes an increase in its gas-dynamic resistance with a corresponding decrease in the gas filtration rate and the performance of the sintering machine by heat. Given the existence of a critical level of increased height sintering layer, starting from which there a disproportionate increase in flow resistance is caused by the degradation of the charge due to the destruction of the granules of the lower layer, it is important to have a method for determining the critical height of the layer.

Purpose of this work is to study the possibility of applying the theory of contact stresses to the solution of the problem of the influence of the height of the agglomeration charge layer on its structural strength.

Research methods. The paper uses the methods of scientific research-analysis and synthesis, analogy, generalization.

Scientific novelty. Based on the calculations, it is established that the theory of elasticity and plastic deformation in elastic creasing can not be applied to study the deformation of granules of the agglomeration charge under the influence of the weight of the upper layers, since in this case there is a discrepancy between the conditions for applying this theory.

Practical value is the need to develop and apply methods that are not based on the theory of contact stresses when evaluating the influence of the height of the sinter layer on its structural strength.

Results show that the application of the theory of contact stresses to determine the loads in the bulk layer of granules of the crushed charge on the belt of the agglomeration machine and the maximum height of this layer is not correct.

Key words: sinter, strength, elasticity, layer of the charge, contact, height of the layer

УДК 621.542: 621.61

Горбачов Ю.Г., Хруцький А.О., Громадський А.С., Ліфенцов О.С. Умови забезпечення безударного режиму роботи пневматичних вібраційних приводів діафрагмового типу

Мета. Метою роботи є усунення негативних наслідків ударних навантажень на елементи пневматичних вібраційних приводів гірничих машин за рахунок застосування безударних режимів роботи. Важливість проблеми інтенсифікації процесів випуску гірничої маси та продуктів її переробки з будь-яких ємностей в умовах гірничих та гірничозбагачувальних підприємств обумовлюється частими зависаннями та сводоутвореннями матеріалу. Застосування вібраційних засобів боротьби з цими явищами в блоках, рудозвальних висхідних виробках, бункерах дозволяє суттєво знизити їх кількість. Використання вібраційних приводів безударного типу є дуже перспективним і для процесу доставки гірничої маси у межах очисного блоку. Усе це підтверджує актуальності теми дослідження.

Методи дослідження. В результаті аналізу науково-технічної інформації сформульовано вимоги до таких пристроїв. За допомогою методу порівняльного аналізу визначено переваги віброзбудників пневматичного типу та перспективи їх використання в розглянутих умовах експлуатації. На підставі динамічного аналізу процесу роботи зроблено висновок про необхідність реалізації безударного режиму таких конструкцій для забезпечення високого рівня надійності та довговічності. Проаналізовано недоліки розглянутої раніше конструкції інерційного пневматичного віброзбудника з масивним поршнем. Зроблено висновок про її недостатній енергетичний рівень внаслідок обмежених можливостей шахтної пневмомережі.

Наукова новизна. Полягає у розробці ідеї підвищення енергетичних можливостей безударних конструкцій пневматичних віброзбудників шляхом використання конструктивних схем діафрагмового типу з поршневым та дисковим пульсаторами.

Практична значимість. Практична реалізація ідеї дозволить при тих самих параметрах шахтної пневмомережі отримати у декілька разів більші значення змушеного зусилля приводів, причому без підвищення їх маси та погіршення умов обслуговування.

Результати. Отримано залежності для визначення конструктивних параметрів безударних пневматичних вібраційних приводів діафрагмового типу з поршневым та дисковим пульсаторами.

Ключові слова: пневматичний вібраційний привод, безударний режим роботи, надійність і довговічність віброприводів.

Горбачев Ю.Г., Хруцкий А.О., Громадский А.С., Лифенцов О.С. Условия обеспечения безударного режима работы пневматических вибрационных приводов диафрагменного типа

Цель. Целью работы является устранение негативных последствий ударных нагрузок на элементы пневматических вибрационных приводов горных машин за счет применения безударных режимов работы. Важность проблемы интенсификации процессов выпуска горной массы и продуктов ее переработки из различных емкостей в условиях горных и горнообогатительных предприятий обуславливается частыми зависаниями и сводообразованиями материала. Применение вибрационных средств борьбы с этими явлениями в блоках, рудосвалочных восстающих, бункерах позволяет существенно снизить их количество. Использование вибрационных приводов безударного типа является очень перспективным и для процесса доставки горной массы в пределах очистного блока. Все это подтверждает актуальность темы исследования.

Методы исследования. В результате анализа научно-технической информации сформулированы требования к таким устройствам. С помощью метода сравнительного анализа определены преимущества вибровозбудителей пневматического типа и перспективы их использования в рассматриваемых условиях эксплуатации. На основании динамического анализа процесса работы сделан вывод о необходимости реализации безударного режима таких конструкций для обеспечения высокого уровня их надежности и долговечности. Проанализированы недостатки рассмотренной ранее конструкции инерционного пневматического вибровозбудителя с массивным поршнем. Сделан вывод о его недостаточном энергетическом уровне вследствие ограниченных возможностей шахтной пневмосети.

Научная новизна. Заключается в разработке идеи повышения энергетических возможностей безударных конструкций пневматических вибровозбудителей путем использования конструктивных схем диафрагменного типа с поршневым и дисковым пульсаторами.

Практическая значимость. Практическая реализация идеи позволит при тех же параметрах шахтной пневмосети получить в несколько раз большее значение вынуждающего усилия приводов, причем без повышения их массы и ухудшения условий обслуживания.

Результаты. Получены зависимости для определения конструктивных параметров безударных пневматических вибрационных приводов диафрагменного типа с поршневым и дисковым пульсаторами.

Ключевые слова: пневматический вибрационный привод, безударный режим работы, надежность и долговечность виброприводов.

Horbachov Yu.G., Khrutskiy A.O., Hromadskiy A.S., Lifientsov A.S. Conditions for shock-free operation mode of diaphragm-type pneumatic vibrating drives

Purpose. To eliminate the negative consequences of shock loads on the elements of pneumatic vibrating drives of mining machines through the use of shock-free operating modes. The importance of the problem of intensifying the production of rock mass and its processing products through various capacities in the conditions of mining and ore-dressing enterprises arises from frequent cases of material overhanging and arching. The use of vibrating tools of combating these phenomena in blocks, extraction chutes, bunkers can significantly reduce their number. The use of shock-free vibrating drives is also very

promising for the process of rock mass delivery within the treatment block. All of the above mentioned confirms the relevance of the research topic.

Research methods. The requirements for such devices are formulated as a result of the scientific and technical information analysis. Using the comparative analysis method, the advantages of vibration exciters of pneumatic type and the prospects for their use in the considered operating conditions are determined. Based on the dynamic analysis of the work process, it is concluded that it is necessary to implement the shock-free operation mode for the mechanisms in order to ensure a high level of their reliability and durability. The disadvantages of the previously considered design of an inertial pneumatic exciter with a solid piston are analyzed. The conclusion is made about its insufficient energy level due to the limited capabilities of the mine pneumatic network.

Scientific novelty. The scientific novelty lies in developing the idea of ceasing the energy capabilities of shock-free designs of pneumatic vibrators by using diaphragm-type structural designs with piston and disk pulsators.

Practical value. The practical implementation of the idea will make it possible, with the same parameters of the mine pneumatic network, to obtain several times the value of the forced drives exertion, without increasing their mass and worsening service conditions.

Results. Dependencies are obtained for determining the design parameters of shock-free diaphragm-type pneumatic vibrating drives with piston and disk pulsators.

Key words: pneumatic vibrating drive, shock-free operation mode, reliability and durability of vibrating drives.

УДК 622.271.4

Хруцький А.О., Громадський Вік.А., Чумак Ю.І., Сулімовський М.Д. Дослідження параметрів кар'єрних екскаваторів типу ЕКГ

Мета. Підвищення ефективності проєктованих екскаваторів за рахунок уточнення емпіричних формул для наближеного попереднього розрахунку основних параметрів екскаваторів з урахуванням функціональних критеріїв якості.

Методи досліджень включають узагальнення досвіду проєктування механічних кар'єрних екскаваторів великої потужності, експериментальних досліджень, математичне моделювання та аналіз параметрів процесу копання.

Наукова новизна. Уточнено методику попереднього розрахунку основних параметрів екскаваторів на основі емпіричних ступеневих залежностей виду $y = a \cdot E_K^b$ урахуванням параметрів розширеного модельного ряду екскаваторів з місткістю ковша від 4 м^3 до 30 м^3 , і функціональних критеріїв якості.

Практична значимість. Отримано розрахункові залежності наступних параметрів: маса екскаватору, маса ковша, розміри ковша (ширина, довжина, висота), радіус черпання, максимальна висота розвантаження, довжина стріли, максимальна висота черпання, висота напірного валу (висота забою), довжина рукояті, висота п'яти стріли, відстань від осі п'яти до осі обертання екскаватора, потужність мережевого двигуна, тривалість робочого циклу, діаметр головних блоків екскаватора, хід рукояті екскаватора, швидкість підйому ковша, швидкість напора.

Результати. Проаналізовано типорозмірний ряд сучасних базових моделей механічних кар'єрних екскаваторів типу «пряма лопата» з місткістю ковша від 4 м^3 до 30 м^3 для розробки м'яких, щільних і підірваних скельних порід, що випускаються серійно та можуть бути використані у залізрудних кар'єрах. Уточнено коефіцієнти пропорційності відомих емпіричних формул для наближеного попереднього розрахунку основних параметрів екскаваторів з урахуванням критеріїв якості. Визначено шляхи підвищення якості екскаваторів на основі запропонованих критеріїв. Встановлено, що екскаватор буде тим ефективніший, чим він матиме більшу продуктивність при розробці найбільш важких з точки зору екскавації порід, тривалість циклу екскавації повинна бути мінімальною за рахунок зменшення кута повороту платформи, тобто розташування транспортних засобів ближче до забою та зменшення тривалості зачерпування, потрібно зменшувати власну масу екскаватору, збільшувати найбільшу висоту копання та найбільший радіус копання.

Ключові слова. кар'єрний екскаватор, робоче обладнання, процес зачерпування, розрахункові залежності, функційний критерій

Хруцкий А.А., Громадский Вик.А., Чумак Ю.И., Сулимовский М.Д. Исследование параметров карьерных экскаваторов типа ЭКГ

Цель. Повышение эффективности проектируемых экскаваторов за счет уточнения эмпирических формул для приближенного предварительного расчета основных параметров экскаваторов с учетом функциональных критериев качества.

Методы исследований включают обобщение опыта проектирования механических карьерных экскаваторов большой мощности, экспериментальных исследований, математическое моделирование и анализ параметров процесса копания.

Научная новизна. Уточнена методика предварительного расчета основных параметров экскаваторов на основе эмпирических степенных зависимостей вида $y = a \cdot E_K^b$ с учетом параметров расширенного модельного ряда экскаваторов с вместимостью ковша от 4 м^3 до 30 м^3 и функциональных критериев качества.

Практическая значимость. Получены расчетные зависимости следующих параметров: масса экскаватора, масса ковша, размеры ковша (ширина, длина, высота), радиус черпания, максимальная высота разгрузки, длина стрелы, максимальная высота черпания, высота напорного вала (высота забоя), длина рукоятки, высота пяти стрелы, расстояние от оси пяти до оси вращения экскаватора, мощность сетевого двигателя, продолжительность рабочего цикла, диаметр главных блоков экскаватора, ход рукоятки экскаватора, скорость подъема ковша, скорость напора.

Результаты. Проанализирован типоразмерный ряд современных базовых моделей механических карьерных экскаваторов типа «прямая лопата» с емкостью от 4 м^3 до 30 м^3 для разработки мягких, плотных и взорванных скальных пород, выпускаемых серийно и могут быть использованы в железорудных карьерах. Уточнены коэффициенты пропорциональности известных эмпирических формул для приближенного предварительного расчета основных параметров экскаваторов с учетом критериев качества. Определены пути повышения качества экскаваторов на основе предлагаемых критериев. Установлено, что экскаватор будет тем эффективнее, чем он будет иметь большую производительность при разработке наиболее тяжелых с точки зрения экскавации пород, продолжительность цикла экскавации

должна быть минимальной за счет уменьшения угла поворота платформы, то есть расположение транспортных средств ближе к забою и уменьшение продолжительности зачерпывания, нужно уменьшать собственную массу экскаватора, увеличивать наибольшую высоту копания и наибольший радиус копания.

Ключевые слова. карьерный экскаватор, рабочее оборудование, процесс зачерпывания, расчетные зависимости, функциональные критерии

Khrutsky A.O., Gromadsky Vik.A., Chumak Y.I., Sulimovsky M.D. Study of quarry ekg type excavator parameters

Purpose. To improve the efficiency of designed excavators by adjusting the empirical formulas for an approximate preliminary calculation of the main parameters of excavators, considering functional quality criteria.

Research methods summarize the design experience of powerful mechanical excavators, experimental studies, mathematical modeling and analysis of digging process parameters.

Scientific novelty. Based on the empirical power dependencies of the form $y = a \cdot E_K^b$, a preliminary calculation method of the excavator's basic parameters, which takes into account the parameters of the extended model series of excavators with a bucket capacity from 4m^3 to 30m^3 , and the functional quality criteria has been derived.

Practical value. The following parameters calculating dependencies were obtained: excavator mass; bucket weight; dimensions of the bucket (width, length, height); scooping radius; maximum unloading height; boom length; maximum scooping height; height of a pressure shaft (face height); handle length; boom heel height; a distance from the heel axis to the rotation axis of the excavator; network engine power; working cycle duration; excavator main blocks diameter; excavator handle stroke; bucket lifting speed; pressure velocity.

Results. The standard size range of modern basic models of mechanical excavators of straight shovel type with a capacity from 4 to 30 m³ for the soft, dense and blown rocks excavation which are commercially available and can be used in iron ore quarries, was analyzed. The proportionality coefficients of the known empirical formulas for an approximate preliminary calculation of the excavator's basic parameters taking into account the quality criteria have been adjusted. The ways of improving the excavator's quality based on the proposed criteria were determined. It was found that the excavator is more efficient when the productivity while mining the most difficult in terms of excavation rocks is higher, whereas, the duration of the excavation cycle is lowered by means of the reduction of the platform rotation angle. In particular, the vehicles have to be placed closer to the mining face and the duration of scraping should be minimized. Moreover, it is necessary to reduce the excavator's own weight, to increase the maximum digging height and the maximum digging radius.

Key words: quarry excavator, working equipment, scooping process, calculation dependencies, functional criteria

УДК 628.147.23:622.453

Гурін А.О., Шаповалов В.А. Спосіб очистки відкладень на стінках повітропроводів

Мета. Метою даної роботи є підвищення надійності та ефективності роботи систем аспірації та вентиляції шляхом очистки відкладень на стінках повітропроводів. Повітропровідні системи є невід'ємною частиною інфраструктури підприємств різних галузей, які мають розвинену мережу трубопроводів систем аспірації і вентиляції. Умови забезпечення надійної та ефективної роботи цих систем визначається, переважно, станом їх внутрішніх поверхонь трубопроводів і устаткування. Процеси корозії і утворення відкладень на внутрішніх поверхнях трубопроводів незворотні і часто призводять до порушення технологічного процесу і параметрів роботи обладнання, а в окремих випадках – до обриву повітропроводу та його падіння на обладнання або людей. Навіть найдосконаліші початкові технічні характеристики обладнання систем аспірації або вентиляції вказують лише на технічні можливості роботи системи. Надійна та ефективна робота систем аспірації і вентиляції може бути забезпечена після впровадження способу очистки відкладень на стінках повітропроводів, за допомогою якого легкого і швидкого очищуються поверхні і усуваються причини порушення параметрів роботи цих систем.

Методи дослідження. Під час вивчення, систематизації та узагальнення способів очистки трубопроводів використано аналіз досліджень і публікацій, аналіз вітчизняного і закордонного досвіду, цільове натурне обстеження повітропроводів систем аспірації та вентиляції, проведені експериментальні дослідження.

Наукова новизна. Експериментально доведена можливість застосування ударних повітряних хвиль, утворених електричними розрядами від джерел високовольтної напруги, для руйнування і відділення іржі та відкладень від стінок повітропроводів.

Практична значимість. Використання запропонованого способу очистки відкладень на стінках повітропроводів підвищує надійність і ефективність роботи систем аспірації та вентиляції в різних промислових галузях, а також збільшує технологічні можливості, оскільки дозволяє проводити очищення трубопроводів складної конфігурації.

Результати. Знайдено рішення поширеної проблеми сучасного промислового виробництва і запропоновано спосіб очистки відкладень на стінках повітропроводів систем аспірації і вентиляції.

Ключові слова: трубопроводи, корозія, відкладення, очистка.

Гурин А.А., Шаповалов В.А. Способ очистки отложений на стенках воздухопроводов

Цель. Целью данной работы является повышение надежности и эффективности работы систем аспирации и вентиляции, за счет очистки отложений на стенках воздухопроводов. Воздухопроводные системы является неотъемлемой частью инфраструктуры предприятий различных отраслей, которые имеют развитую сеть трубопроводов систем аспирации и вентиляции. Условия обеспечения надежной и эффективной работы этих систем определяются, в основном, состоянием внутренних поверхностей трубопроводов и оборудования. Процессы коррозии и образования отложений на внутренних поверхностях трубопроводов необратимы и часто приводят к нарушению технологического процесса и параметров работы оборудования, а в отдельных случаях - к обрыву воздухопровода и его обрушению на оборудование или людей. Высокие технические характеристики оборудования систем аспирации или вентиляции указывают только на технические возможности работы системы. Надежная и эффективная работа систем аспирации и вентиляции может быть обеспечена после внедрения способа очистки отложений на стенках воздухопроводов, с помощью которого легкого и быстрого очищаются поверхности и устраняются причины нарушения параметров работы этих систем.

Методы исследования. При изучении, систематизации и обобщения способов очистки трубопроводов использованы анализ исследований и публикаций, анализ отечественного и зарубежного опыта, целевое натурное обследование воздухопроводов систем аспирации и вентиляции, проведены экспериментальные исследования.

Научная новизна. Экспериментально доказана возможность применения ударных воздушных волн, образованных электрическими разрядами от источников высоковольтного напряжения, для разрушения и отделения ржавчины и отложений от стенок воздухопроводов.

Практическая значимость. Использование предлагаемого способа очистки отложений на стенках воздухопроводов повышает надежность и эффективность работы систем аспирации и вентиляции, применяемых в различных промышленных отраслях, а также увеличивает технологические возможности, поскольку позволяет проводить очистку трубопроводов сложной конфигурации.

Результаты. Найдено решение распространенной проблемы современного промышленного производства и предложен способ очистки отложений на стенках воздухопроводов систем аспирации и вентиляции.

Ключевые слова: трубопроводы, коррозия, отложения, очистка.

Gurin A.O., Shapovalov V.A. A method of cleaning deposits on the walls of air ducts

Purpose. The aim of this work is to increase the reliability and efficiency of the aspiration and ventilation systems by cleaning the deposits on the walls of the air ducts. Air ducting systems are an integral part of the infrastructure of enterprises in various industries that have a developed network of piping for aspiration and ventilation systems. The conditions for ensuring the reliable and efficient operation of these systems are determined in the ground state of their internal surfaces of pipelines and equipment. The processes of corrosion and the formation of deposits on the internal surfaces of pipelines are irreversible and often lead to violation of the technological process and parameters of the equipment, and in some cases – the duct breaks and collapses onto equipment or people. Even the most advanced initial specifications of aspiration or ventilation equipment indicate only the technical capabilities of the system. Reliable and efficient operation of the aspiration and ventilation systems can be ensured after the introduction of a method of cleaning the deposits on the walls of the air ducts, by means of which easy and fast cleaning of the surfaces and eliminating the causes of violations of the work parameters of these systems.

Research methods. During the study, systematization and generalization of the methods of pipeline cleaning, the analysis of studies and publications, the analysis of domestic and foreign experience, targeted and field testing of air ducts of aspiration and ventilation systems, experimental studies.

Scientific novelty. The possibility of using shock air waves formed by electrical discharges from high-voltage sources for the destruction and separation of rust and deposits from the walls of air ducts has been experimentally proved.

Practical value. The use of the proposed method of cleaning the deposits on the walls of the air ducts increases the reliability and efficiency of aspiration and ventilation system used in various industrial sectors, also increases technological capabilities, since it allows cleaning pipelines of complex configuration.

Results. The solution of widespread problem of modern industrial production was found and the method for cleaning of deposits on the walls of air ducts of aspiration and ventilation systems is offered.

Key words: pipelines, corrosion, sedimentation, cleaning.

УДК 624.012.45

Валовой О.І., Астахов В.І., Афанасьев В.В., Валовой М.О., Єременко О.Ю. Використання відходів гірничорудної промисловості у промисловому, цивільному та транспортному будівництві

Мета. На сьогодні в Україні промисловими відходами відчужується до 5 тис. га. земельних ділянок. Це є серйозною небезпекою для екологічного стану регіонів України і особливо Кривбасу. Відходи збагачених залізних руд займають перше місце серед відходів гірничодобувної промисловості і їх обсяг зі збільшенням видобутку корисних копалин буде зростати. У роботі висвітлено інформацію по дослідженню відходів гірничорудної промисловості Кривбасу і подальшому їх використанню в промисловому цивільному та транспортному будівництві.

Методи дослідження. При збагаченні залізистих кварцитів методом мокрої магнітної сепарації виділяється велика кількість дрібнодисперсних відходів. Вони являють собою суспензію твердих частинок у воді і підрозділяються на відходи поточного виходу, які після збагачення руди не викинуті в відстійники, і хвости, що направляються гідротранспортом в сховища, де відбувається осадження твердих частинок. Для більш ефективного використання хвостів збагачення залізної руди їх фракціонують. Технологічна схема збагачення відходів зі хвостосховищ передбачає як перспективне обладнання так і те, що серійно випускається промисловістю.

Наукова новизна. Перспективним є обладнання з ударно-балістичною технологією, що розроблена на будівельному факультеті КНУ.

Практична значимість. За підсумками аналізу досліджень основних фізико-механічних характеристик бетонів на дрібних відходах Г'ОК, можна відзначити, що стосовно міцності і деформативних властивостей, зазначені бетони не поступалися, а за деякими параметрами і перевершують традиційні бетони на кварцовому піску. Напрацювання результатів дослідження бетонів на заповнювачах з відходів Г'ЗК були використані, як основа для всебічних досліджень роботи залізобетонних конструкцій, як при короткочасному так і тривалому дії навантаження.

Результати. В результаті досліджень бетону на відходах збагачення залізних руд виявлено ряд характерних особливостей фізико-механічних властивостей (підвищена міцність, знижена деформативність), які слід враховувати при розробці розрахункового апарату для залізобетонних конструкцій на зазначених бетонах. Дослідження показує можливість широкого застосування відходів збагачення залізних руд для виготовлення звичайних і попередньо напружених залізобетонних конструкцій.

Ключові слова: відходи Г'ЗК, бетон, залізобетонні конструкції, випробування.

Валовой А.И., Астахов В.И., Афанасьев В.В., Валовой М.А., Еременко А.Ю. Использование отходов горнорудной промышленности в промышленном, гражданском и транспортном строительстве

Цель. На сегодня в Украине промышленными отходами отчуждается до 5 тыс. га. земельных участков. Это представляет серьезную опасность для экологического состояния регионов Украины и особенно Кривбасса. Отходы

обогащенных железных руд занимают первое место среди отходов горнодобывающей промышленности и их объем с увеличением добычи полезных ископаемых будет расти. В работе освещена информация по исследованию отходов горнорудной промышленности Кривбасса и дальнейшему их использованию в промышленном, гражданском и транспортном строительстве.

Методы исследования. При обогащении железистых кварцитов методом мокрой магнитной сепарации выделяется большое количество мелкодисперсных отходов. Они представляют собой суспензию твердых частиц в воде и подразделяются на отходы текущего выхода, которые после обогащения руды не выброшены в отстойники, и хвосты, направляемых гидротранспортом в хранилища, где происходит осаждение твердых частиц. Для более эффективного использования хвостов обогащения железной руды их фракционируют. Технологическая схема обогащения отходов из хвостохранилищ предусматривает как перспективное оборудование, так и то, что серийно выпускается промышленностью.

Научная новизна. Перспективным является оборудование с ударно-баллистической технологией, разработанной на строительном факультете КНУ.

Практическая значимость. По итогам анализа исследований основных физико-механических характеристик бетонов на мелких отходах ГОК, можно отметить, что в отношении прочности и деформативных свойств, указанные бетоны не уступали, а по некоторым параметрам и превосходят традиционные бетоны на кварцевом песке.

Наработки результатов исследования бетонов на заполнителях из отходов ГОК были использованы, как основа для всесторонних исследований работы железобетонных конструкций, как при кратковременном, так и длительном действии нагрузки.

Результаты. В результате исследований бетона на отходах обогащения железных руд выявлен ряд характерных особенностей физико-механических свойств (повышенная прочность, пониженная деформативность), которые следует учитывать при разработке расчетного аппарата для железобетонных конструкций на указанных бетонах. Исследование показывает возможность широкого применения отходов обогащения железных руд для изготовления обычных и предварительно напряженных железобетонных конструкций.

Ключевые слова: отходы ГОК, бетон, железобетонные конструкции, испытания.

Valovoi O.I., Astahov V.I., Valovoi M.O., Afanasiev V.V., Eremenko O.Yu. Using of iron ore mining wastes in industrial, civil and transport engineering

Purpose. Today in Ukraine up to 5 thousand hectares of land are disposed for industrial wastes. This causes the serious threat to the ecological state of the regions of Ukraine and especially Kryvbas. Iron ore wastes are ranked first among the mining wastes. The mineral production increase causes the expansion of the volume of the mining wastes. The work presents the research data of wastes of the Kryvbas iron ore mining industry and their further use in industrial, civil and transport engineering.

Research methods. While concentrating ferruginous quartzites by the wet magnetic separation method, a large amount of fine wastes is released. The latter are a suspension of solids in water. They are divided into the current outlet wastes and tailings. The current outlet wastes are not discharged into the settling basins after the iron ore beneficiation. The tailings are sent by hydro transport to the ponds for the settling of the solids. For the efficient and effective use of iron ore tailings, the tailings are fractionated. The technological scheme of beneficiation of the wastes from tailing ponds envisages both promising equipment and commercially available equipment.

Scientific novelty. The equipment on shock-ballistic technology developed at the Civil Engineering Faculty of KNU is considered promising.

Practical value. According to the analysis performed for the studies of the basic physical and mechanical characteristics of the concretes on fine wastes of MBC, it can be noted that in terms of strength and deformation properties, these concretes were not inferior, and in some respects they out-perform the traditional concretes on quartz sand. The concretes manufactured with the aggregates obtained from the MBC wastes were studied and the results were used as a basis for comprehensive studies of the work of the reinforced concrete structures, both for the short-term and long-term loads.

Results. As a result of studies, a number of characteristic features of physical and mechanical properties have been identified. They are: increased strength and reduced deformability. When developing a calculating apparatus for reinforced concrete structures on these concretes, the following features should be taken into account. The study shows the possibility of widespread use of iron ore beneficiary wastes for the production of conventional and prestressed ferro-concrete structures.

Key words: MBC wastes, concrete, reinforced concrete structures, tests.

УДК 622.775

Олійник Т.А., Ніколаєнко П.К. Вплив типу дроблення окислених залізистих кварцитів на подальше їх розкриття при подрібненні в кульовому млині

Мета. Метою даних досліджень є, порівняння показників збагачення окислених залізистих кварцитів дроблених в валковій дробарці та ролер-пресі, при наступному їх кульовому подрібненні, та визначення особливостей руйнування зростків отриманих в валках високого тиску. Задачею є ознайомлення науково-технічних працівників з особливостями впливу дроблення окислених залізистих кварцитів в ролер-пресі на розкриття зростків мінералів при їх подальшому кульовому подрібненні. Лабораторні дослідження з застосуванням устаткування для дроблення та збагачення.

Наукова цінність. Встановлено оптимальний розмір зростків рудного та нерудного компонентів окислених залізистих кварцитів, в якому найповніше проявляється ефект розміцнення міжкристалічних зв'язків між зернами, закладений в них у процесі руйнування в ролер-пресі.

Практичне значення. Визначено показники збагачення окислених залізистих кварцитів дроблених в валковій дробарці та ролер-пресі, та встановлено що застосування останнього дозволяє: підвищити якість кінцевого концентрату на 1,78% (з 63,7 до 65,48%) та вилучення заліза загального на 5,88% (з 70,49 до 76,37%); знизити вміст кварцу в концентраті на 1,82% (з 7,19 до 5,37%) та його вилучення на 1,04% (з 6,01 до 4,97%); знизити вміст заліза загального в хвостах на 2,22% (з 17,26 до 15,04%) при одночасному підвищенні вмісту в них кварцу на 3,6% (з 72,74 до 76,36%).

Результати. Використання в технології збагачення окислених залізистих кварцитів, для дроблення вихідної руди ролер-пресу, у порівнянні з валковою дробаркою, забезпечує більш селективне руйнування руди та ефективну підготовку поверхонь зростків для наступного їх розкриття при подальшому подрібненні в кульових млинах. В результаті цього зникають втрати рудних мінералів в хвости, в процесі збагачення, при більш повному видаленні в них частинок пористої породи (кварцу).

Ключові слова: руда, гематит, залізо, дроблення, ролер-прес, зростки, розкриття, збагачення

Олейник Т.А., Николаенко П.К. Влияние типа дробления окисленных железистых кварцитов для последующего их раскрытия при измельчении в шаровой мельнице

Цель. Целью данных исследований является сравнение показателей обогащения окисленных железистых кварцитов дробленых в валковой дробилке и роллер-прессе, при последующем их шаровом измельчении и определение особенностей разрушения сростков полученных в валках высокого давления. Задачей является ознакомление научно-технических работников с особенностями влияния дробления окисленных железистых кварцитов в роллер - прессе на раскрытие сростков минералов при их дальнейшем шаровом измельчении. Лабораторные исследования с применением оборудования для дробления и обогащения.

Научная ценность. Установлен оптимальный размер сростков рудного и нерудного компонентов окисленных железистых кварцитов, в котором наиболее полно проявляется эффект разупрочнения межкристаллических связей между зернами, заложенный в них в процессе разрушения в роллер-прессе.

Практическое значение. Определены показатели обогащения окисленных железистых кварцитов дробленых в валковой дробилке и роллер-прессе, и установлено что применение последнего позволяет: повысить качество конечного концентрата на 1,78% (с 63,7 до 65,48%) и извлечение железа общего на 5,88% (с 70,49 до 76,37%); снизить содержание кварца в концентрате на 1,82% (с 7,19 до 5,37%) и его извлечение на 1,04% (с 6,01 до 4,97%); снизить содержание железа общего в хвостах на 2,22% (с 17,26 до 15,04%) при одновременном повышении содержания в них кварца на 3,6% (с 72,74 до 76,36%).

Результаты. Использование в технологии обогащения окисленных железистых кварцитов для дробления исходной руды роллер-пресса, в сравнении с валковой дробилкой, обеспечивает более селективное разрушение руды и эффективную подготовку поверхностей сростков для последующего их раскрытия при дальнейшем измельчении в шаровых мельницах. В результате этого снижаются потери рудных минералов в хвосты, в процессе обогащения, при более полном удалению в них частиц пустой породы (кварца).

Ключевые слова: руда, гематит, железо, дробления, роллер-пресс, сростки, раскрытие, обогащение

Oliinyk T.A., Nikolaienko P.K. Influence of type of crushing of oxidized iron quartzites for the following them disclosure during grinding in a ball mill

Purpose. The purpose of these studies is to compare the enrichment indices of oxidized ferruginous quartzites crushed in a roll crusher and a roller press, followed by their ball grinding and to determine the characteristics of the destruction of the aggregates obtained in high pressure rolls. The task is to familiarize scientific and technical workers with the peculiarities of the effect of crushing of oxidized ferruginous quartzites in a roller press on the disclosure of mineral splices during their further ball reduction. Laboratory studies using equipment for crushing and enrichment.

Scientific novelty. The optimal size of intergrowths of ore and non-metallic components of oxidized ferruginous quartzites has been established, in which the effect of softening of intercrystalline bonds between grains, embedded in them in the process of destruction in a roller press, is most fully manifested.

Practical value. The enrichment parameters of oxidized ferruginous quartzites crushed in a roll crusher and a roller press were determined, and it was found that the use of the latter allows: to increase the quality of the final concentrate by 1.78% (from 63.7 to 65.48%) and the total iron recovery by 5.88% (from 70.49 to 76.37%); reduce the quartz content in the concentrate by 1.82% (from 7.19 to 5.37%) and its extraction by 1.04% (from 6.01 to 4.97%); reduce the total iron content in the tailings by 2.22% (from 17.26 to 15.04%) while increasing the quartz content in them by 3.6% (from 72.74 to 76.36%).

Results. The use of an oxidized ferruginous quartzite in the technology for crushing the initial ore of a roller press, in comparison with a roller crusher, provides more selective destruction of ore and an effective preparation of intergrowth surfaces for their subsequent opening during further grinding in ball mills. As a result, the loss of ore minerals in the tailings is reduced, in the course of enrichment, with more complete removal of gangue particles (quartz) in them.

Key words: ore, hematite, iron, crushing, roller press, splices, disclosure, enrichment.

УДК 693

Шимко В.А., Онькова Г.В. Сучасний розвиток індустріальних методів зведення малоповерхового житла різних категорій

Мета. Метою даної роботи є розглянути сучасні та більш індустріальні методи та організаційно-технологічні рішення при зведенні малоповерхових житлових будинків, малоповерхових міні-готелів та модульних містечок.

Методи дослідження. Для досягнення сформульованої мети застосовано теоретичні методи: аналіз та узагальнення наукової літератури та робіт з тематики у сфері малоповерхового будівництва в Україні.

Наукова новизна. Проблема, що піднімається в роботі, обґрунтована стрімким розвитком індустріального малоповерхового будівництва, потребою в доступному житлі в замських зонах великих і малих міст України, необхідністю зведення в короткий термін будинків різного призначення, житлових містечок для військовослужбовців і жителів районів, що перебувають в особливих і екстремальних умовах. Саме у розв'язанні цієї задачі, встановленні сучасної класифікації будівельних технологій, визначенні більш ефективних методів зведення малоповерхових житлових будинків різних категорій й полягає наукова новизна даної роботи.

Практична значимість. Практична реалізація полягає в тому, що через перенаселення великих міст і непомірної вартості міського житла в цей час іде активне формування позитивного іміджу замського проживання. Основні надії покладаються на розвиток сфери котеджного домобудівництва й відповідної інфраструктури вдалині від великих міст. Крім того в Україні з кожним роком все більше розвиваються міжнародні транспортні зв'язки й міжнародний

туризм, необхідність прискореного й широкого обміну науковою інформацією й передовим досвідом шляхом проведення міжнародних конференцій і нарад, організація міжнародних фестивалів, виставок тощо.

Результати. Очікувані результати визначають: використання сучасних індустріальних та організаційно-технологічних рішень при зведенні малоповерхового житла різних категорій в даний час дозволяють суттєво підвищити темпи будівництва, знизити трудові витрати, а також використання вдосконалених технологічних процесів призводить до скорочення термінів будівництва; раціональні способи зведення комплексу малоповерхових будівель; наведено аналіз технологічних операцій при монтажі трансформованих малоповерхових житлових будинків з використанням сендвіч-панелей.

Ключові слова: малоповерхове житло, каркасні будинки, швидкобудуючі будівлі, технологічні параметри зведення, збірно-розбірні або модульні будинки, контейнерні будівлі, технології 3D-друку у будівництві.

Шимко В.А., Онькова Г.В. Современное развитие индустриальных методов возведения малоэтажного жилища разных категорий

Цель. Целью данной работы является рассмотреть современные и более индустриальные методы и организационно-технологические решения при возведении малоэтажных жилых домов, малоэтажных мини-отелей и модульных городков.

Методы исследования. Для достижения сформулированной цели применены теоретические методы: анализ и обобщение научной литературы и работ по тематике в сфере малоэтажного строительства в Украине.

Научная новизна. Проблема, которая поднимается в работе, обоснована стремительным развитием индустриального малоэтажного строительства, потребности в доступном жилье в загородных зонах больших и малых городов Украины, необходимостью возведения в короткий срок зданий различного назначения, жилых городков для военно-служащих и жителей районов, находящихся в особых и экстремальных условиях. Именно в решении этой задачи, установление современной классификации строительных технологий, определении более эффективных методов возведения малоэтажных жилых домов различных категорий и заключается научная новизна данной работы.

Практическая значимость. Практическая реализация заключается в том, что из-за перенаселения больших городов и непомерной стоимости городского жилья в настоящее время идет активное формирование положительного имиджа загородного проживания. Основные надежды возлагаются на развитие сферы коттеджного домостроения и соответствующей инфраструктуры вдали от больших городов. Кроме того, в Украине с каждым годом все больше развиваются международные транспортные связи, международный туризм, необходимость ускоренного и широкого обмена научной информацией и передовым опытом путем проведения международных конференций и совещаний, организация международных фестивалей, выставок и тому подобное.

Результаты. Ожидаемые результаты определяют: использование современных индустриальных и организационно-технологических решений при строительстве малоэтажного жилья различных категорий в настоящее время позволяют существенно повысить темпы строительства, снизить трудовые затраты, а также использования усовершенствованных технологических процессов приводит к сокращению сроков строительства; рациональные способы возведения комплекса малоэтажных зданий; приведен анализ технологических операций при монтаже трансформируемых малоэтажных жилых домов с использованием сендвич-панелей.

Ключевые слова: малоэтажное жилье, каркасные дома, быстровозводимые здания, технологические параметры сведения, сборно-разборные или модульные дома, контейнерные здания, технологии 3D-печати в строительстве.

Shymko V.A., Onkova H.V. Modern development of industrial methods of erection of low-rise housing of different categories

Purpose. The purpose of this work is to review modern and more industrial methods and organizational and technological solutions for the construction of low-rise apartment buildings, low-rise mini-hotels and modular towns.

Research methods. To achieve the stated purpose, theoretical methods were applied: analysis and generalization of scientific literature and works on subjects in the field of low-rise construction in Ukraine.

Scientific novelty. The problem that arises in the work is justified by the rapid development of industrial low-rise construction, the need for affordable housing in suburban areas of large and small cities of Ukraine, the need to erect for a short time buildings for various purposes, residential towns for military personnel and residents of districts in special and extreme conditions. It is in solving this problem, the establishment of a modern classification of building technologies, that more effective methods for the construction of low-rise residential buildings of various categories are determined and the scientific novelty of this work lies.

Practical value. The practical implementation is that due to the overpopulation of large cities and the exorbitant cost of urban housing, at this time is actively forming a positive image of suburban living. The main hope lies in the development of the cottages and the related infrastructure away from major cities. In addition, international transport links and international tourism, the need for accelerated and wide exchange of scientific information and best practices through the organization of international conferences and meetings, the organization of international festivals, exhibitions, etc., are increasing every year in Ukraine.

Results. Expected results determine: the use of modern industrial and organizational-technological solutions for the construction of low-rise housing of different categories now allow to significantly increase the pace of construction, reduce labor costs, as well as the use of advanced technological processes leads to reduced construction time; rational ways of erecting a complex of low-rise buildings; an analysis of technological operations in the installation of transformed low-rise residential buildings using sandwich panels is given.

Key words: low-rise housing, prefabricated buildings, prefabricated buildings, technological erection parameters, prefabricated or modular buildings, container buildings, transformed buildings, 3D printing technologies in building.