

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Криворізький національний університет

ГІРНИЧИЙ ВІСНИК

Науково-технічний збірник

Заснований у 1966 році

Випуск 111

Кривий Ріг, 2023

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

Збірник індексується в науко-метричних базах даних Google Scholar, Index Copernicus, Research Bible, Academic Keys та ін., в загальнодержавній реферативній базі даних «Україніка наукова» (реферативний журнал «Джерело»).

Збірник надсилається до Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського НАН України та провідних наукових бібліотек України.

У матеріалах збірника викладено результати досліджень у галузі технічних наук. Розглянуто шляхи підвищення ефективності промислових виробництв, автоматизації, контролю та керування технологічними процесами.

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

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

Випуск № 111 рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет Вченою радою Криворізького національного університету (протокол № 11 від 25.04.2023 року).

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

Ступнік М.І., Бровко Д.В., Калініченко В.О., Федько М.Б., М.А. Грищенко, Болотніков А.В., Чирва О.І., Айгарс О.Г. Дослідження рекультиваційних перспектив відвалу № 4 Центрального гірничо-збагачувального комбінату, підпрацьованого підземними гірничими роботами	3
Луценко С.О., Жуков С.О., Григор'єв Ю.І., Федоренко С.О. Системні невідповідності за традиційного проектування залізрудних кар'єрів	11
Ковбик К.М., Калініченко В.О. Методика моделювання випуску насичених водою багатих залізних руд в умовах Криворізького залізрудного басейну	18
Кравцова Д.Ю., Зюган У.І. Статистична обробка інженерних вимірювань зі комп'ютеризацією розрахунків у табличному процесорі	22
Костянський О.М., Жуков С.О. Визначення параметрів вантажопотоків на дпш конвеєрних підйомників робочої зони глибоких залізрудних кар'єрів	27
Худик М.В., Шепель О.Л. Пилопригнічення вугільного пилу при перевантаженні вугілля у паливно-транспортних цехах ТЕС	34
Куліковська О.С. Про зарубіжний досвід геодезичних робіт	39
Переметчик А.В., Федоренко С.О., Подойніцина Т.О. Геометричне моделювання та прогнозування якості залізних руд	46
Астахов В.І., Єрьоменко О.Ю., Волков С.О. Використання критерію критичних рівнів внутрішньої потенційної енергії деформації тіла при вирішенні задач будівельної механіки	54
Савельєв С.Г., Бабасєвська О.В., Ярош Т.П., Кондратенко М.М. Аналіз прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів	60
О.Є. Латишин, Ярошенко Г.М. Дослідження стану умов праці в цехах збагачення титано-цирконієвої руди виробництва Вільногірського ГМК	67
Азарян А.А., Кративний Н.С. Гравітаційний метод оперативного контролю вмісту заліза в подрібненій гірничій масі	74
Штанько Л.О., Антонік В.І., Баранов І.В. Визначення можливостей складування окислених кварцитів при подальшій розробці крутоспадних залізрудних родовищ на прикладі кар'єру № 3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»	77
Бугай Л.А. Зниження трудоемкості механічної обробки продукції з високомарганцевих сталей	83
Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко С.М., Гапоненко І.А., Гапоненко А.А., Бобров Є.Ю. Моделювання електромагнітного акустичного перетворювача	88
Латишин О.О., Ярошенко В.О. Інженерна геологія та геотехніка в контексті забезпечення стійкості будівель, споруд та комунікацій	95
Валовой О.І., Афанасьєв В.В., Валовой М.О. Дослідження фізико-механічних характеристик хвостів СМС Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату для будівництва та відновлення залізничних колій	100
Малих Д.Ю., Єременко Г.І., Тітов Д.А. Уточнення розрахунку руйнування гірських порід свердловинними зарядами з диференційовано розподіленою ВР в їх рядах	104
Ю.Г. Горбачов, Хруцький А.О., Громадський Вік.А., Марюсик О.С. Удосконалення важкого віброживильника з метою зниження числа зависань руди у випускній виробці	110
Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Павлишак Д.З. Конструктивні рішення багатопарових легких огорожень підвищеної звукоізоляції	114
Андрущенко Г.І., Чупринов Є.В., Кассім Д.О., Григор'єва В.Г., Ляхова І.А. Синергія економіки та металургії як основа механізму ефективного функціонування сучасного підприємства повного циклу	120
Тімченко Р.О., Крішко Д.А., О.Ю. Пензєв Кручені хрестоподібні стрижні у з'єднаннях дерев'яних конструкцій	126
Савельєв С.Г., Бабасєвська О.В., Ярош Т.П., Кондратенко М.М. Оцінка методів визначення придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудування	132
Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Єременко Г.І., Яремій С.О. Застосування дистанційних методів при дослідженні впливу техногенних споруд на поверхневі та підземні води (на прикладі південного Кривбасу)	139
Моркун В.С., Моркун Н.В., Гапоненко А.А., Бобров Є.Ю. Застосування нелінійних ультразвукових методів для визначення характеристик залізрудної сировини	144
Хруцький А.О., Горбачов Ю.Г., Громадський А.С., Громадський В.А., Громадський Вік.А. Віртуальний лабораторний практикум з планування наукових досліджень	152
Долгих О.В., Долгих Л.В. Підвищення якості цифрових зйомок при дослідженні зони зрушень від шахти ім. Колачевського	158
Гацький А.К., Гацький І.А. Синтез управління мікрокліматом в камері аварійного повітропостачання	163
Анотації	170

М.І. СТУПНІК, Д.В. БРОВКО, В.О. КАЛІНІЧЕНКО, доктори техн. наук, професори,
М.Б. ФЕДЬКО, канд. техн. наук, доц., М.А. ГРИЩЕНКО, асистент
Криворізький національний університет
А.В. БОЛОТНІКОВ, канд. техн. наук, О.І. ЧИРВА, канд. техн. наук, доц.
ТОВ «Гірничопромисловий та будівельний інжиніринг»
О.Г. АЙГАРС, гол. землевпорядник, ПрАТ «ЦГЗК»

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕКУЛЬТИВАЦІЙНИХ ПЕРСПЕКТИВ ВІДВАЛУ № 4 ЦЕНТРАЛЬНОГО ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ, ПІДПРАЦЬОВАНОГО ПІДЗЕМНИМИ ГІРНИЧИМИ РОБОТАМИ

Мета дослідження полягає у визначенні фактичного стану масиву гірських порід в підшві та тілі відвалу № 4 ПрАТ «ЦГЗК», розташованого в зоні впливу гірничих робіт шахти «Ювілейна» ПрАТ «Суха Балка», та встановленні рекультиваційних перспектив даної земельної ділянки.

Методами дослідження є візуальне обстеження ярусів та відкосів відвалу і прилеглої території, аерофотознімання об'єктів, аналіз стану підземного виробленого простору та геофізичні дослідження, геомеханічні розрахунки та математичне моделювання стійкості гірських порід методом кінцевих елементів.

Наукова новизна дослідження полягає у встановленні впливу підземних гірничих робіт на стан денної поверхні та прогнозуванні розвитку процесу зрушення гірських порід та деформації земної поверхні, підпрацьованих підземними гірничими роботами.

Практичне значення: встановлено фактичний стан земельної ділянки відвалу № 4, підпрацьованої гірничими роботами шахти «Ювілейна», та визначені перспективи її рекультивації.

Результати. Встановлені фактичні границі зон зсуву земної поверхні, утворення тріщин, терас, воронок та провалів. Встановлено, що при веденні поточних гірничих робіт на шахті «Ювілейна» вихід воронок на денну поверхню в районі розміщення відвалу № 4 є неможливим внаслідок затухання цього процесу у масиві гірських порід. Отримані при математичному моделюванні процесу деформації гірського масиву під впливом підземних гірничих робіт дані свідчать, що ця ділянка знаходиться у зоні некритичних деформацій, які не загрожують масовим обваленням масиву. Разом з тим дані геофізичних досліджень показали на окремих ділянках протікання у масиві порід активних геодинамічних процесів, що свідчить про наявність порожнин на раніше відпрацьованих горизонтах. Враховуючи їх значно меншу глибину розташування існує потенційна небезпека, що при впливі поточних гірничих робіт (особливо масових вибухів) з часом це може призвести до їх самообвалення з утворенням на деяких ділянках провалів або воронок. За результатами досліджень виконано прогнозування розвитку процесу зрушення гірських порід та земної поверхні і здійснено зонування земельної ділянки відвалу за ступенем безпеки виконання робіт з його рекультивації.

Ключові слова: підземна розробка, гірські породи, порожнини, мульда зрушення, геодинамічні процеси, напружено-деформований стан, деформація поверхні, воронкоутворення, маркшейдерські спостереження, геофізичні дослідження.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Видобування природно багатих залізних руд на шахтах Кривбасу здійснюють системами розробки з обваленням руди і вміщуючих порід. Це призводить до порушень денної поверхні, які можуть бути як у вигляді плавних осідань і терасо утворень, так і у вигляді провалів і воронок, що знаходяться у зоні можливого воронкоутворення (так званої «зони обвалення»), де знаходження людей і ведення будь-яких робіт суворо заборонено.

При цьому слід враховувати, що воронкоутворення імовірісніше за своєю природою, процес зрушення масиву гірських порід є тривалим, а реальна картина стану поверхні є кращою від прогнозованого рівня її деформації. Тобто фактичний стан поверхні не відображає потенційну небезпеку, яка криється за розвитком цих процесів у часі та їх суттєвим відставанням, оскільки вихід реальної зони обвалення на свої проєктні контури займає, як правило, десятки років. Але внаслідок впливу зовнішніх факторів, особливо динамічного характеру, цей процес може пришвидшуватись до миттєвого його розвитку. Прикладом цього може слугувати техногенна катастрофа 13 червня 2010 року на шахті ім. Орджонікідзе (нині шахта ім. Колачевського) Центрального ГЗК, де під час виконання планових підривних робіт на горизонті -447 м відбулося раптове обвалення денної поверхні на площі близько 16 га, внаслідок чого утворилося провалля глибиною від 10 до 80 м.

Таким чином, безпечне використання підроблених підземними гірничими роботами територій неможливо без налагодженого контролю за процесом деформування масиву гірських порід і земної поверхні. Одними із основних методів його здійснення є маркшейдерські та геофізичні спостереження. Їх використання забезпечує визначення параметрів деформування земної поверхні та розташованих на ній об'єктів (будівель, споруд, ЛЕП тощо), які попадають в зону впливу підземних гірничих робіт з отриманням кількісної інформації про виникнення і розвиток деформаційних процесів у часі та просторі.

Починаючи з середини ХХ-го століття в Криворізькому залізничному басейні все більшого розповсюдження набуває використання підроблених підземними гірничими роботами територій для розміщення на них кар'єрів та відвалів (ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», ПрАТ «ІнГЗК», ПрАТ «ЦГЗК», ПрАТ «ПівнГЗК» та інші), для забезпечення безпечного використання яких крім маркшейдерських інструментальних та візуальних спостережень впроваджуються різні методи моніторингу: за допомогою глибинних реперів, фотограмметричного знімання, електрометричні, гравіметричні, георадіолокаційні, звукометричні та біолокаційні спостереження. Більшість з них пройшла апробацію на гірничих підприємствах Кривбасу і використовуються маркшейдерськими службами шахт і гірничо-збагачувальних комбінатів басейну для спостережень за станом підземного виробленого простору та за стійкістю бортів кар'єрів і відвалів, у тому числі при проведенні повторної та сумісної розробки залізничних родовищ.

Сутність проблеми полягає у тому, що земельна ділянка, надана для розміщення відвалу № 4 ПрАТ «ЦГЗК», на якому досліджується можливість його рекультивациі, розташована у межах гірничого відводу шахти «Ювілейна» ПрАТ «Суша Балка», а саме у висячому боці покладів багатих залізних руд, які протягом багатьох десятиліть відпрацьовуються підземним способом. Ця земельна ділянка практично повністю розміщена у зоні активних деформаційних процесів, внаслідок чого на ній заборонені рекультивацийні роботи з через небезпеку їх виконання. У той же час екологічний відділ міськвиконкому наполягає на проведенні вищезазначених робіт на безпечних ділянках.

Для визначення фактичного стану масиву гірських порід в підшві та тілі відвалу № 4 ПрАТ «ЦГЗК» та встановлення можливості безпечного виконання робіт з рекультивациі цієї земельної ділянки згідно чинних нормативних документів [1-4] був реалізований комплекс досліджень, результати яких наведені у даній статті.

Аналіз досліджень і публікацій. В Криворізькому басейні протягом майже ста років здійснюються регулярні спостереження за зсувами гірських порід та земної поверхні, які в різні часи виконували відповідні спеціалізовані організації: Центральне науково-дослідне маркшейдерське бюро (ЦНДМБ), Криворізький опорний пункт Всесоюзного науково-дослідного маркшейдерського інституту (ВНДМІ), Криворізьке відділення Всесоюзного науково-дослідного та проектно-маркшейдерського інституту (ВІОГЕМ), Державне науково-виробниче підприємство по маркшейдерським, екологічним, геомеханічним та гідротехнічним дослідженням (ДНВП «МЕГД»), Центральна виробничо-дослідна маркшейдерська лабораторія (ЦВДМЛ) та інші. На основі цих робіт були розроблені та затверджені «Правила охорони споруд і природних об'єктів від шкідливого впливу підземних гірничих робіт у Криворізькому залізничному басейні» [3]. Вказівки щодо дослідження процесу зрушення гірських порід та земної поверхні при розробці родовищ корисних копалин приведені у роботах [5-8]. Розробці методів для контролю та заходів для безпечного ведення відкритих гірничих робіт на кар'єрах № 1 та № 2 ЦГЗК у зонах впливу підземних рудників Кривбасу присвячені дослідження, приведені у роботах [9,10]. Дослідження зрушення гірських порід та земної поверхні з використанням геофізичних методів, які проводились переважно на гірничодобувних підприємствах Кривбасу й на підставі яких встановлені певні закономірності даного процесу та їх залежність від конкретних гірничо-геологічних умов, приведені у роботах [11,12]. У роботі [13] приведені результати багаторічних досліджень процесу деформування гірських порід та земної поверхні в полі шахти «Ювілейна» ПрАТ «Суша Балка», за якими було проведено районування підпрацьованих територій на предмет їх використання у народному господарстві. Результати досліджень імовірності утворення воронки та провалів в кар'єрах ПрАТ «ЦГЗК», які пов'язані з підземними гірничими роботами, та заходи безпеки при веденні робіт над порожнинами, які виявлені у гірському масиві, викладені у роботі [14]. Результати виконаних маркшейдерських інструментальних спостережень за розвитком процесу зсуву поверхні та станом об'єктів, що охороняються, при підземній розроб-

ці залізних руд шахтами ПрАТ «Суха Балка» [15] дали змогу відслідкувати його динаміку та вплив на стан земної поверхні, визначити межі зон зсувів, тріщин, терас, воронок та провалів.

Постановка завдання. Дослідження можливості безпечного виконання робіт з рекультивації земельної ділянки відвалу № 4 ПрАТ «ЦГЗК» передбачали наступні роботи:

збір, систематизація та аналіз вихідних даних про фактичне положення підземних гірничих робіт в зоні відвалу №4 ПрАТ «ЦГЗК» та інженерно-геологічну будову масиву гірських порід в підшві відвалу;

вивчення фактичного стану зони обвалення порід висячого боку в межах розташування земельної ділянки, на якій розташовано відвал № 4 та геофізичні дослідження різними методами стану масиву гірських порід в основі відвалу;

визначення потенційної небезпеки виходу воронок на денну поверхню в зоні відвалу № 4 у випадку руйнування підземних порожнин;

інженерно-геодезичні дослідження і геомеханічні розрахунки стійкості бортів і ярусів відвалу № 4 та підземних порожнин із встановленням мультиспіввідношення зрушення та зони можливого воронокотворення й визначення проектних параметрів зони обвалення порід висячого боку родовища залізних руд шахти «Ювілейна» у цілому та на найближчу перспективу;

безпекове зонування території земельної ділянки відвалу з опрацюванням рекомендацій і заходів по безпечному виконанню рекультиваційних робіт.

Викладення матеріалу та результати. Вивчення гірничо-геологічної будови гірського масиву, на якому розташована земельна ділянка відвалу № 4 показало, що породи перекриваючої Гданцівської і основної рудоносної Саксаганської світи залягають у нормальній стратиграфічній послідовності із загальним західним падінням. Породи сланцевих і залізистих горизонтів чергуються поміж собою й представлені різними видами сланців, мартитовими, гетит-гематитовими і магнетитовими кварцитами, які мають коефіцієнт міцності від 9-10 до 14-16 балів за шкалою проф. М.М. Протоджанова. Основним тектонічним порушенням є Західний розлом, який в районі родовища шахти «Ювілейна» представлений Тарапаківським насувом, що розвивається значно західніше й істотного впливу ні на структуру, ні на рудоносність не має. Наразі гірничі роботи на даній шахті з видобутку багатих залізних руд здійснюються у поверсі 1420-1340 м із застосуванням переважно технології підповерхового обвалення.

В процесі дослідження фактичного стану зони обвалення порід висячого боку в межах розташування земельної ділянки, на якій розташовано відвал № 4, був здійснений комплекс візуально-інструментальних спостережень, суть яких полягала у фіксації видимих проявів порушень стійкості відкосів гірничих виробок, характеру тріщинуватості масиву та стану поверхні, водопояв під впливом підземних гірничих робіт на шахті «Ювілейна», сейсмічних наслідків від проведення масових вибухів у кар'єрі № 1 ПрАТ «ЦГЗК» та пересування залізничних потягів коліями Укрзалізниці і ПрАТ «Суха Балка».

Проведені геофізичні дослідження ділянки розміщення відвалу № 4 методами електророзвідки (ВЕЗ), георадіолокації та гравіметрії. Для цього були створені дві профільні лінії (рис. 1), на яких за допомогою інструментальної геодезичної зйомки закріплені опорні точки.

Обстеження передвідвальної території на захід від відвалу дало можливість виявити на земній поверхні терасу, розташовану в м.о. 123...176 та ЛСП +832...+1080 м. Вона розміщується на центральній ділянці зони зсуву, для якої є характерним розширення її меж при пониженні гірничих робіт. При цьому в районі реперів 13 та 14 профільної лінії "IV", закладеної маркшейдерською службою ПрАТ «Суха Балка», висота тераси становить біля 1,5 м. Її загальна довжина на сьогодні перевищує 600 м. Східний відкіс нижнього ярусу відвалу розташовується безпосередньо в зоні воронок і провалів. На ньому на кількох ділянках мають місце зсуви, які є порівняно свіжими: на них практично відсутня рослинність (трава, кущі тощо). Такі зсуви виявлені на ділянках, розміщених в м.о. 90...105 і ЛСП +350...+400 м та в м.о.110...130 і ЛСП +350...+400 м. На ярусах з висотними позначками 107-156 м були виявлені окремі ділянки, на яких відбулося сповзання порід відкосу в результаті просідання масиву відвалу. На з'їзді між висотними позначками 100-115 м (м.о. 25...30 та ЛСП +580...+600 м) виявлено три просідання поверхні відвалу глибиною 1,5–2 м та діаметром 3–5 м. На ярусі відвалу з висотною позначкою +144 м виявлено воронку, яка розділила даний ярус на дві частини. Воронка розміщується в

м.о. 146...157 та ЛСП +530...+700 м. Воронка дещо менших розмірів розташована на ярусі з висотною позначкою 128 м (м.о. 165...178 та ЛСП +750...+790 м).



Рис. 1. Схема розташування профільних ліній 1-1 і 2-2 на території земельної ділянки відвалу № 4

За результатами проведених геофізичних досліджень встановлено, що в південній частині підніжжя відвалу № 4 в маркшейдерських осях 40-100 територія відвалу характеризується інтенсивним розушільненням порід на глибину. За даними ВЕЗ товща розбита на окремі блоки. В центральній частині першої профільної лінії (28-40 ПК) на глибині 60-80 м сформувалась ділянка з відносно стабілізованим рухом порід. У її крайових частинах відмічається інтенсивне розушільнення порід з активним їх переміщенням. Цей висновок підтверджений показниками зміни гравітаційного поля: в межах пікетів 6-8 спостерігалися підвищені значення ΔG . Наявність активного зволоження порід за даними ВЕЗ можна також відмітити в інтервалі між пікетами 8-28. За даними георадіолокаційних досліджень в цій же зоні також фіксується зволоження порід.

Аналіз характеру руху гірського масиву в межах профільної лінії № 1 свідчить про підвищену мобільність ділянок у крайових частинах профілю, де утворюються розриви, відбувається накопичення і розвантаження напруженого стану масиву, що призводить до вертикальних переміщень: підняття або опускання блоків. В центральній частині даного профілю ці процеси є менш активними.

Геофізичні дослідження в межах другого профілю північної частини підніжжя відвалу № 4 в м.о. 280-200 також фіксують розушільнення порід на глибину. Однак дані ВЕЗ показали, що товща квазірівномірно розбита на окремі блоки, схожі за своєю формою та розмірами. Показники зміни гравітаційного поля в межах пікетів 11-19 свідчили про підвищення значення ΔG .

Активне зволоження порід за даними ВЕЗ зафіксоване в інтервалі між м.о. 160-200. Георадіолокаційні дослідження у цій зоні також фіксують зволоження порід. Характер руху гірського масиву вказаних осей свідчить про інтенсивну відкриту тріщинуватість у межах визначеного інтервалу зволоження порід. Наявність відкритої тріщинуватості провокує постійний рух блоків у межах виділеної ділянки. Виходячи з зазначеного, дана ділянка також характеризується активним утворенням розривів масиву з постійним розвантаженням його напруженого стану, що призводить до вертикальних переміщень блоків.

Аналіз маркшейдерської інформації, опрацьованої спільно з технічними службами ПрАТ «Суха Балка», показав, що при розробці на шахті «Ювілейна» переважно відокремлених рудних покладів (гнізд) у поверсі 1420-1340 м утворилося близько двох десятків порожнин. Вивченням динаміки формування та існування порожнин встановлено, що станом на 01.04.2022 року переважну їх більшість було ліквідовано. Залишилась лише одна порожнина, утворена при

відпрацюванні покладу «Гніздо 1-2» у блоці 130+10-134V об'ємом 66,7 тис. м³, яка була локалізована. Дослідження потенційної небезпеки виходу воронки на денну поверхню у випадку руйнування цієї порожнини приводять до висновку, що подальший розвиток гірничих робіт на шахті «Ювілейна» не призведе до виходу воронок на денну поверхню при обваленні порожнин, утворених при відпрацюванні відокремлених рудних покладів, оскільки процес розвитку склепін затухне не досягнувши поверхні шляхом їх самообвалення у масиві гірських порід за рахунок заповнення порожнин розпушеними обваленими вміщуючими породами.

Дослідження процесів деформації гірського масиву і денної поверхні у межах земельної ділянки відвалу № 4 було здійснене шляхом математичного моделювання методом кінцевих елементів. На основі геологічної інформації за допомогою спеціалізованої комп'ютерної програми Ansis 2021-P2 були створені кінцево-елементні моделі, що були прив'язані до маркшейдерських осей 128, 150 та 186. Вказані осі знаходяться в центральній частині мульди зрушення порід висячого боку, де деформаційні процеси є найбільш інтенсивними. Розміри кожної моделі охоплюють гірський масив на глибину 1500 м від денної поверхні та від 0 до 1400 відміток базисних ліній ЛСП навхрест простягання родовища.

Основні фізико-механічні властивості гірських порід, закладені у структуру кінцево-елементних моделей, приведені у табл. 1.

На першому етапі розглядалася повна відробка покладів залізних руд у поверсі 1420-1340 м, де наразі здійснюють їх видобуток на ш. «Ювілейна».

Таблиця 1

Основні фізико-механічні властивості гірських порід

Параметр	Один. виміру	Руда	Вміщуючі породи (індекси горизонтів)						Обвалені породи
			PR_{Isx}^{Is}	PR_{Isx}^{6-7f}	PR_{Isx}^{7s}	PR_{Isx}^{6-7f}	PR_{Igd_2}	наноси	
Коефіцієнт міцності	бали	4-6	9-10	12-14	11-13	14-16	9-10	1-2	0,3
Питома вага	кг/м ³	3600	2800	3200	3250	3430	3100	2300	2400
Межа міцності на стискання	МПа	40	90	105	95	120	85	10	5
Межа міцності на розтягнення	МПа	4,0	7,0	8,0	7,2	9,0	6,5	1,0	0,2
Модуль Юнга	МПа	25000	55000	52000	60000	65000	52000	10000	3000
Коефіцієнт Пуассона	—	0,28	0,26	0,22	0,25	0,23	0,21	0,32	0,35

Примітка: PR_{Isx}^{Is} – сланці кварц-хлоритові, біотит-хлоритові, кварц-хлорит серицитові; PR_{Isx}^{6-7f} – кварцити мартитові; PR_{Isx}^{7s} – кварцити гетит-гематитові; PR_{Isx}^{6-7f} – кварцити магнетитові; PR_{Igd_2} – сланці графіт-кварц-біотитові, кварц-серицит-біотитові.

На рис. 2 наведено результати обчислень зі значеннями вертикальних зміщень поверхні у контрольних точках масиву в 186 маркшейдерській осі, які для зручності подальшої обробки та аналізу отриманих даних були прив'язані до відповідних базисних ліній. Зведені результати визначення вертикальних зміщень по вищезазначеним маркшейдерським осям приведені у табл. 2.

Для верифікації абсолютних значень отриманих величин були використані дані контрольних спостережень за розвитком зсуву поверхні [15], виконані групою спеціальних маркшейдерських досліджень ПрАТ «Суша Балка» у 2021 році. Для спостереження за денною поверхнею у висячому боці залізрудних покладів, відпрацювання яких здійснює шахта «Ювілейна», закладені 7 профільних ліній, кожна з яких налічує від десятка до майже півсотні реперів. Закладання перших реперів датовано 1973-1974 роками, останніх – 2018 роком, тобто на різних ділянках деформаційні процеси відслідковується від 5 до 50 років. Співставлення даних показало, що динаміка осідання денної поверхні навхрест простягання мульди зрушення є такою ж, як і за результатами моделювання, що вказує на адекватність загальної картини отриманих характеристик поведінки масиву гірських порід у моделі та в натурних умовах, а різниця у абсолютних значеннях деформацій знаходиться у межах похибки їх обчислень.

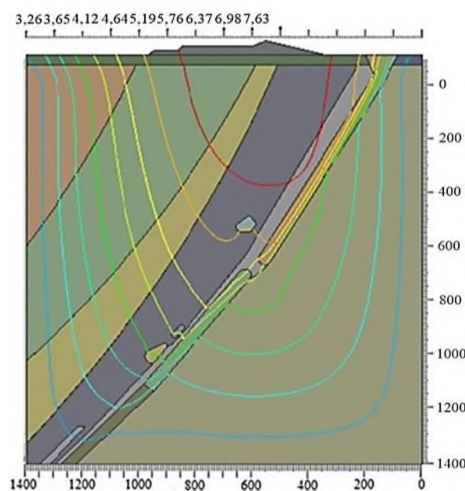


Рис. 2. Результати розрахунку деформацій денної поверхні з числовими значеннями вертикальних зміщень в контрольних точках масиву в 186 м.о. при відпрацюванні покладів залізних руд до глибини 1420 м

Таблиця 2

Вертикальні зміщення (осідання) денної поверхні при відпрацюванні запасів руди у поверсі 1420-1340 м на ш. «Ювілейна», м

ЛСП Маркш. осі	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
128	4,62	4,20	3,83	3,51	3,24	2,96	2,53	2,18	1,85
150	6,71	6,25	5,80	5,37	4,92	4,38	3,86	3,32	2,71
186	7,63	6,98	6,37	5,76	5,19	4,64	4,12	3,65	3,26

На другому етапі моделювання з метою отримання прогнозних даних стосовно величин деформації денної поверхні розглядалася повна відробка покладів залізних руд на шахті «Ювілейна» у наступному поверсі 1500-1420 м. У табл. 3 приведені результати визначення вертикальних зміщень другого етапу моделювання по маркшейдерським осям 128, 150 та 186.

Таблиця 3

Вертикальні зміщення (осідання) денної поверхні при відпрацюванні запасів руди у поверсі 1500-1420 м на ш. «Ювілейна», м

ЛСП Маркш. осі	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400
128	4,85	4,43	4,02	3,68	3,39	3,10	2,65	2,28	1,95
150	6,99	6,49	6,01	5,56	5,09	4,53	3,99	3,43	2,84
186	7,98	7,30	6,64	5,97	5,38	4,81	4,27	3,78	3,37

Порівнюючи дані другого етапу моделювання з попередніми констатуємо зростання абсолютних значень вертикальних зміщень, в залежності від місця розташування контрольних точок, на 10-35 см. Враховуючи що із збільшенням глибини робіт зростають й обсяги підпрацьованого гірського масиву, а також той фактор, що це займе приблизно 12-15 років, такий загальний рівень опускання поверхні є цілком реальним.

Отримані при математичному моделюванні процесу деформації гірського масиву під впливом підземних гірничих робіт на шахті «Ювілейна» дані свідчать, що вищезазначена земельна ділянка знаходиться головним чином у зоні некритичних деформацій денної поверхні, які не загрожують масовим обваленням гірського масиву, підпрацьованого гірничими роботами цієї шахти.

Разом з тим аналізом гірничо-геологічної документації встановлено, що на вище розташованих відпрацьованих горизонтах можуть бути порожнини, на існування яких вказують активні геодинамічні процеси, що протікають у гірському масиві, та дані проведених геофізичних спостережень. Судячи з їх орієнтовних (за результатами опрацювання геологічної документації) розмірів, та враховуючи їх значно меншу глибину розташування від денної поверхні (від 200-300 до 500 м), існує потенційна небезпека їх самообвалення, спровокованих поточними гірничими роботами, особливо масовими вибухами, та з плином часу.

Геомеханічні розрахунки стійкості бортів та ярусів відвалу № 4 здійснені на основі інженерно-геодезичних досліджень та даних з фізико-механічних властивостей гірських порід у підошві та тілі відвалу № 4. За основу для розрахунку стійкості бортів та ярусів відвалу № 4 ПрАТ «ЦГЗК» взято положення гірничих робіт станом на грудень 2022 року, отримане за результатами проведеної аерофотозйомки. Використовувалися вертикальні розрізи з фактичного положення гірничих робіт, геологічні розрізи залягання порід та фізико-механічні властивості порід відвалу і його основи, які знаходяться в районі призми можливого зрушення. Ці розрахунки також були проведені з використанням методу кінцевих елементів з використанням побудованих 2-D та 3-D моделей відвалу.

Дослідження були виконані по декільком розрізам. Вибір розташування розрізів обумовлений необхідністю охопити розрахунками всі борти відвалу з одного боку та розумною достатністю їх обсягу з іншого. Розрахунки стійкості бортів та ярусів відвалу з урахуванням залягання порід і нанесеними найбільш небезпечними поверхнями зрушення, а також розрахованими коефіцієнтами запасу стійкості (КЗС) наведені на рис. 3.

В узагальненому вигляді результати виконаних розрахунків наведено в табл. 4.

За результатами геомеханічних розрахунків стійкості відвалу № 4 з використанням 2-D моделей значення коефіцієнту запасу стійкості знаходиться у межах 1,17–2,07 для характеристик

міцності порід основи в природному стані та $K3C=1,13-1,44$ для обводненого стану порід основи відвалу. Значення $K3C$, яке є меншим від нормативного (1,30), отримане для ділянки відвалу, яку характеризує розріз 7. За результатами розрахунків з використанням 3-D моделей значення $K3C$ знаходиться в межах 1,25 – 2,32 для характеристик міцності порід основи відвалу в природному стані. Значення $K3C=1,25$, який є менше нормативного, отримане для ділянки відвалу в секторі 5. На інших ділянках відвалу ступінь запасу стійкості відповідає нормативним значенням.

Отримані результати досліджень масиву різними методами дали можливість здійснити зонування території земельної ділянки відвалу № 4 у контексті можливого виконання робіт з рекультивації за ступенем небезпеки виконання робіт.

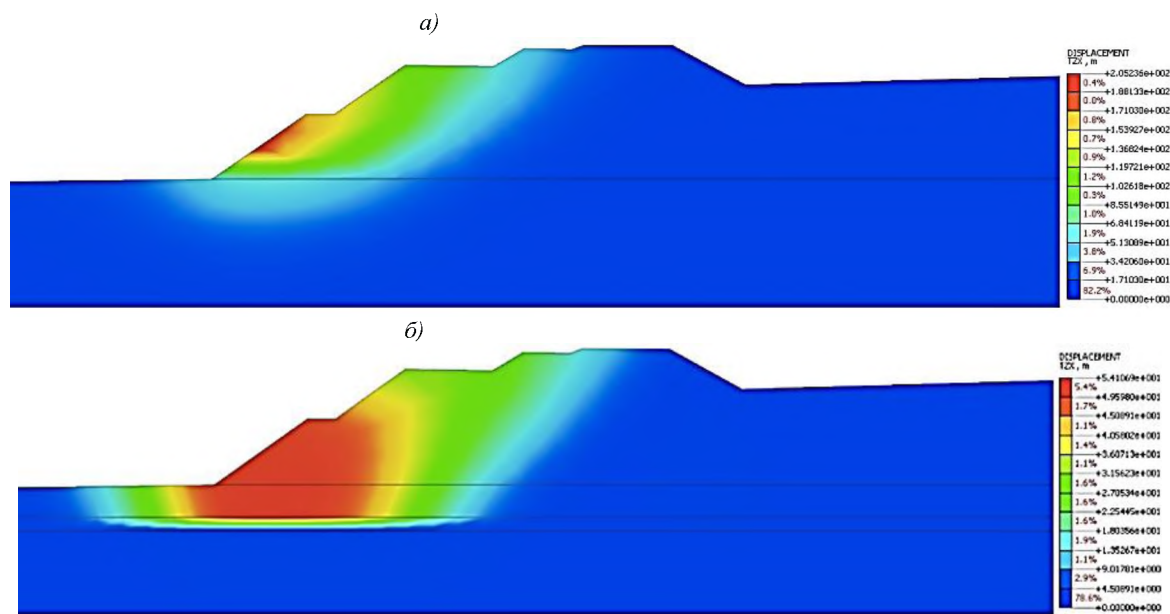


Рис. 3. Розрахунок стійкості відвалу по розрізу 1: *а* - породи основи у природному стані ($K3C = 2,07$); *б* - з моделюванням обводнення порід в основі відвалу ($K3C = 1,44$)

Розрахунок стійкості відвалу № 4 методом кінцевих елементів з використанням 2-D моделей

Таблиця 4

№ розрізу	Стан основи відвалу	Горизонт, м	Висота, м	Кут нахилу, град.	Коефіцієнт запасу стійкості ($K3C$)*
1	природний	+130/+110	20	31	2,07
	обводнений				1,44
2	природний	+115/+95	20	35	1,67
	обводнений				1,33
3	природний	+142/+120	22	40	1,36
	обводнений				1,28
4	природний	+132/+110	22	40	1,35
	обводнений				1,20
5	природний	+130/+105	25	34	1,33
	обводнений				1,15
6	природний	+152/+118	34	28	1,30
	обводнений	+152/+85	47	21	1,19
7	природний	+132/+98	34	33	1,17
	обводнений	+125/+92	33	33	1,13
8, поверхня 1	природний	+108/+70	38	27	1,34
	обводнений				1,30
8, поверхня 2	природний	+125/+70	55	14	1,93
	обводнений				1,38

* коефіцієнт запасу стійкості розрахований при моделюванні основи відвалу у природному та обводненому стані при куті внутрішнього тертя, відповідно 18° і $6-10^\circ$, та зчепленні 0,04 МПа і 0,01 МПа

Перша, небезпечна зона розташована у центральній частині мульди зрушення, де вельми ймовірний вихід воронок на денну поверхню і де проведення рекультиваційних робіт не є можливим принаймні у найближчі 5-10 років, оскільки на цій території спостерігаються активні геомеханічні процеси, які не дозволяють організувати роботи з дотриманням необхідного рівня безпеки їх виконання. Ця зона простягається у вигляді смуги від 100 до 200 м.о.: у межах м.о. 100-140 земельна ділянка відвалу № 4 повністю потрапляє у цю зону; в м.о. 140-200 з одного боку вона межує із земельним відводом ПрАТ «Суша Балка», з іншого боку вона простягається від 140 до 165 м.о. – до ЛСП 800 + 110 м, й далі по діагоналі до ЛСП 600 + 130 м у 200 м.о.

Друга, потенційно небезпечна зона розташована на декількох ділянках: в м.о. 20-100 у вигляді прямокутного трикутника, довга сторона якого межує із земельним відводом ПрАТ «Суша Балка», а діагональ простягається від границі земельної ділянки відвалу № 4 в м.о. 20 до ЛСП 600 + 100 м в м.о. 75 й далі по межі земельного відводу до 100 м.о.; поза межами небезпечної зони в м.о. 140-200 й далі від 200 до 260 м.о. також у вигляді прямокутного трикутника, довга сторона якого межує із земельним відводом ПрАТ «Суша Балка», а діагональ простягається від ЛСП 600 + 130 м в м.о. 200 до межі ділянки земельного відводу у м.о. 260.

У межах даної зони ймовірний вихід воронок на денну поверхню або її суттєві деформації у вигляді просідання, внаслідок чого проведення рекультиваційних робіт можливе тільки після підтвердження затухання активних геомеханічних процесів вторинного воронкоутворення в гірському масиві, яке повинно бути зафіксоване висновками динамічних геофізичних та маркшейдерських спостережень на ділянці, що досліджується.

Третя, умовно безпечна зона розташована на двох ділянках: у південному торці мульди зрушення порід висячого боку за межами потенційно небезпечної зони у межах м.о. 10-75, та у північному торці мульди у межах м.о. 200-274 поза межами потенційно небезпечної зони та зони можливого воронкоутворення. Проведення робіт з рекультивації у цій зоні можливе за умови проведення постійного моніторингу активності геомеханічних процесів на цих ділянках.

На рис. 4 зображено зонування території земельної ділянки відвалу № 4 за ступенем небезпеки.

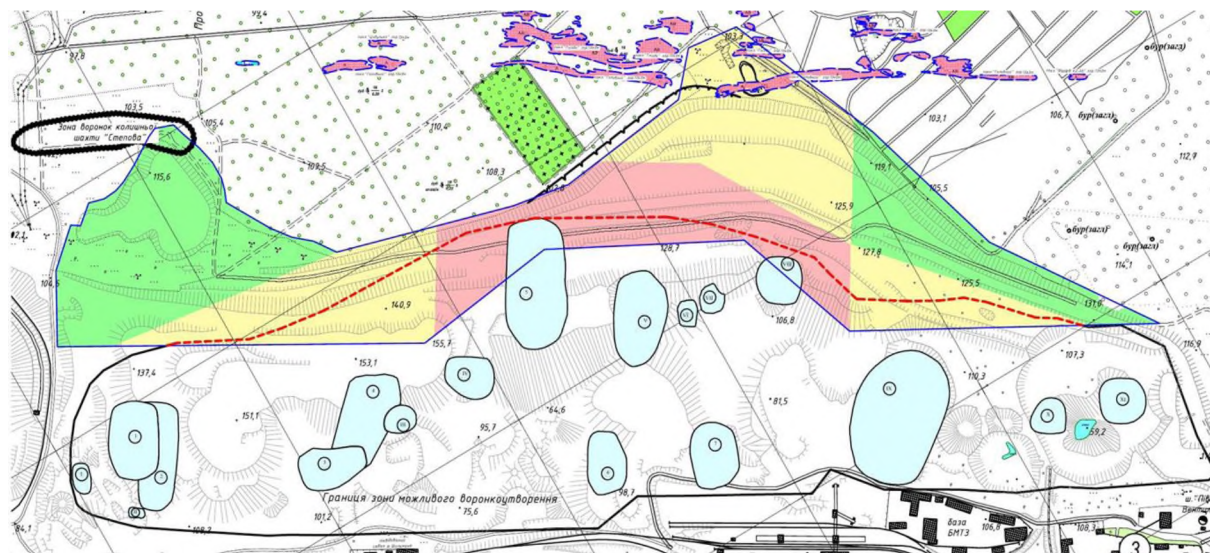


Рис. 4. Зонування території відвалу № 4: ■ - перша зона, ■ - друга зона, ■ - третя зона; --- границя ділянки земельного відводу ПрАТ «ЦГЗК»; - - зона можливого воронкоутворення, яка потребує встановлення попереджувальних знаків

Відповідно до виконаного зонування були опрацьовані рекомендації та заходи по безпечному виконанню робіт з рекультивації відвалу № 4.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Виконаний комплекс досліджень дав змогу встановити фактичний стан масиву гірських порід, на якому розташована земельна ділянка відвалу № 4 ПрАТ «ЦГЗК», та спрогнозувати подальший розвиток мульди зрушення від ведення підземних гірничих робіт на шахті «Ювілейна» ПрАТ «Суша Балка» і вплив даного процесу на стан денної поверхні. Відповідно до цього було здійснене безпекове зонування зе-

мельної ділянки відвалу № 4 та запропоновані рекомендації та заходи по безпечному виконанню робіт з рекультивції даної земельної ділянки. Враховуючи наявну необхідність проведення робіт з рекультивції та забезпечення їх безпеки, рекомендується здійснення моніторингу активності геомеханічних процесів на ділянці з метою фіксації активності геомеханічних процесів за допомогою наявних геофізичних та інструментально-маркшейдерських методів.

Список літератури

1. Гірничий закон України: - м. Київ 6 жовтня 1999 р. № 1127-IV-XIV. ВВР, 1999, № 50, ст. 433.
2. Закон України про охорону навколишнього природного середовища: Відомості Верховної Ради України, 1991, № 41, ст. 546.
3. НПАОН 13.1-1.01-75. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ в Криворожском железорудном бассейне. - Ленинград : ВНИМИ, 1975. - 68 с.
4. НПАОП 0.00-1.24-10. Правила охорони праці під час розробки родовищ корисних копалин відкритим способом. [На заміну НПАОП 0.00-1.33-94; чинні від 23.03.2018]. - Харків: Індустрія, 2020. - 104 с.
5. Инструкция по наблюдениям за деформациями бортов, откосов уступов и отвалов на карьерах и разработке мероприятий по обеспечению их устойчивости. - Л. Ленинград: ВНИМИ, 1971. - 187 с.
6. Методические указания по наблюдениям за деформациями бортов разрезов и отвалов, интерпретации их результатов и прогнозу устойчивости. - Ленинград : ВНИМИ, 1987. - 177 с.
7. НПАОН 74.2-5.01-21. Правила виконання маркшейдерських робіт під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин. [На заміну НПАОН 74.2-5.01-85, НПАОН 74.2-5.03-85, НПАОН 74.2-5.06-85; чинні від 27.07.2021]. Вид. офіц. - Харків: Індустрія, 2021. - 260 с.
8. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. - Москва: Недра, 1988. - 112 с.
9. Исследование и разработка методов, обеспечивающих безопасное ведение горных работ в условиях карьеров № 1 и № 2 ЦГОКа: Отчет по НИР / КГРИ, рук. Сосик Д.И. - Кривой Рог, 1982. - 89 с.
10. Разработка мероприятий по безопасной отработке карьера № 1 и № 2 ЦГОКа до глубины 300-500 м в зонах влияния подземных разработок рудников им. К. Либкнехта, им. Коминтерна, им. Фрунзе и им. XX партсъезда: Отчет по НИР / КГРИ, рук. Сазонов В.А. - Кривой Рог, 1978. - 58 с.
11. Сазонов В.А., Сосик Д.И. Геофизика в маркшейдерском деле. - Москва: Недра, 1989. - 120 с.
12. Сдвижение горных пород и земной поверхности при разработке рудных залежей Криворожского бассейна / К.К. Байчук, А.Л. Малахов, В.Н. Романенко, А.В. Сазонов // В кн. IX международный конгресс по маркшейдерскому делу, Чешская республика, 18-22 июня 1994 г. Том-доклады. - Прага, 1994. - С. 542-544.
13. Исследование и прогноз характера процесса сдвижения с районированием подрабатываемых территорий при отработке глубоких горизонтов шахт Кривбасса на предмет использования в народном хозяйстве. Отчет о НИР / ГНПП "МЭГТИ", рук. Сазонов А.В. - Кривой Рог, 1995. - 94 с.
14. Кучер Б.Ф., Моисеев Б.Ф., Сазонов А.В. Образование воронок-провалов в карьере ПАО «ЦГОК» // Гірничий вісник, № 95 (1), КНУ, 2012. - С. 39-43.
15. Контрольні спостереження за розвитком процесу зсуву поверхні та станом об'єктів, що охороняються, при підземній розробці залізних руд шахтами ПрАТ «СУХА БАЛКА» у 2021 році: Звіт групи спеціальних маркшейдерських досліджень ПрАТ «Суха Балка». - Кривий Ріг, 2021. - 180 с.

Рукопис подано до редакції 01.03.2023

УДК 622.271

С.О. ЛУЦЕНКО, канд. техн. наук, доц., С.О. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф.,
Ю.І. ГРИГОР'ЄВ, канд. техн. наук, доц., С.О. ФЕДОРЕНКО, ст. викл.
Криворізький національний університет

СИСТЕМНІ НЕВІДПОВІДНОСТІ ЗА ТРАДИЦІЙНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ КАР'ЄРІВ

Мета дослідження полягає в уточненні закономірностей утворення відхилень від проектів за умов підвищення динаміки зовнішніх впливів на функціонування кар'єрів.

Методами дослідження є ретроспективний, компаративний та каузальний аналіз розвитку невідповідності між видобувними та розкривними роботами у кар'єрі як чинника коригувань гірничих проектів, а також – оцінка періодичності даного явища.

Наукова новизна дослідження полягає в установленні системного характеру параметричних реакцій «кар'єр-системи» на зміну інтенсивності принципово значимих для неї кон'юнктурних коливань актуальної цінності руди.

Практичне значення: встановлення головних детермінантів перегляду принципів проектування розвитку гірничих робіт в кар'єрі адекватно динаміці стрибків цін на руду та обсягів потенційного її збуту, а також – приведення

до відповідності можливостей прогнозування динаміки коливань зовнішнього середовища та відповідного оперативного реагування на них динамічною адаптацією проектування та планування.

Результати. На підставі виконаного авторами аналізу регулярності, масштабів, причин та наслідків виникнення й накопичення відхилень гірничих робіт від проектних рішень й зумовлених цим відхилень головних параметрів кар'єрів Кривбасу від чинних нормативів, наочно доведено, що існуюче нині традиційне коригує проектування відпрацювання кар'єрів при непередбачуваній зміні продуктивності є не результатом належної стратегії розвитку гірничих робіт, а – лише вимушеною та завжди запізнілою, суто компенсаторною реакцією на зміну потреби в залізорудній продукції, в результаті чого гірничодобувні підприємства несуть значні збитки при повній неможливості адекватного гнучкого реагування на зміну цін і попиту на мінерально-сировинних ринках.

Викладена аргументація актуалізує необхідність коригування на концептуальному рівні ряду принципів проектування залізорудних кар'єрів та планування розвитку гірничих робіт стосовно підвищення оперативності та гнучкості взаємодії в системі «проект – рудник – відхилення від проекту – компенсаторне коригування», реалізація чого вбачається лише в розвитку засад динамічного проектування.

Ключові слова: кар'єр, розвиток гірничих робіт, руда, проектування та планування рудників.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Сучасний стан гірничих робіт залізорудних кар'єрів Кривбасу характеризується тим, що виймання більшої частини розкривних порід (65% від загального обсягу розкриття) здійснюється на верхніх горизонтах. Однак основні роботи з виймання руди здійснюються на нижніх горизонтах. У зв'язку з цим, обсяг готових до виймання запасів гірничої маси не відповідає нормативним вимогам, а ведення гірничих робіт характеризується значним їх розосередженням у кар'єрному просторі.

Крім цього характерною рисою сучасного стану Кривбасу є постійна зміна виробничих потужностей кар'єрів, погіршення основних техніко-економічних показників і велика заборгованість за розкривними роботами.

Тому, виходячи з фактичних показників середньозваженої ширини робочих площадок в кар'єрах і довжини активного фронту гірничих робіт (табл. 1), можна стверджувати, що в більшості кар'єрів існує відставання розкривних робіт від нормативних показників.

Таблиця 1

Фактичні значення готових до виймання запасів гірничої маси на кар'єрах Кривбасу

Показники	НКГЗК		ЦГЗК			ПівніГЗК		ІнГЗК
	№2 біс	№3	№1	№3	№4	Ганнівський	Першотравневий	
Забезпеченість готовими до виймання запасами, міс:								
за нормами	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
фактичні руда	1,8	1,4	0,6	1,0	0,9	0,98	0,56	0,82
фактичні розкрив	0,9	1,1	0,9	0,9	1,7	0,81	0,55	1,22
Мінімальна ширина робочої площадки, м	35		35			35		35
Нормальна ширина робочої площадки, м:								
фактична:								
руда	60	63	54	59	52	52	49	58
розкрив	47	53	47	53	58	49	45	53
за нормами:								
руда	54	65	83	62	64	61	72	77
розкрив	55	60	56	65	55	61	62	57
Довжина активного фронту гірничих робіт, м:								
руда	1055	1310	310	490	168	815	1295	1620
розкрив	1005	1331	3427	2451	2480	4328	4155	6845
Мінімальна довжина екскаваторного блоку, м:								
за нормами								
фактична	650	650	600	650	600	600	650	650
руда	525	430	310	245	168	270	320	330
розкрив	500	445	490	350	600	340	440	570

З аналізу стану гірничих робіт кар'єрів Кривбасу слідує висновок, що:

довжина активного фронту гірничих робіт не забезпечує нормальну роботу гірничотранспортного устаткування: довжина екскаваторних блоків є меншою нормативною;

нормальна ширина робочих площадок на уступах – менша проектної і не забезпечує наявності у кар'єрах нормативу готових до виймання запасів скельної гірничої маси;

активний фронт робіт розосереджується у кар'єрному просторі, що призводить до втрати робочого часу на переїзди екскаваторів, внаслідок чого знижується коефіцієнт їх використання (0,35-0,5).

Аналіз досліджень і публікацій. Одним з найважливіших завдань проектування кар'єрів є прийняття технічних рішень, що забезпечують стабільну, безперебійну роботу рудника й гірничо-збагачувального комбінату в цілому з видобутку корисних копалин заданої якості з мінімальними витратами [1-3].

Ефективність прийнятих рішень уточнюється лише після закінчення досить тривалого періоду часу і вимірюється роками, а в деяких випадках – десятиліттями. Тому періодично виникає необхідність в перегляді попередніх проектів, через відхилення фактичного стану гірничих робіт від проектних рішень [4-5].

Досвід роботи кар'єрів показує, що виробнича потужність кар'єру за корисними копалинами і розкритом, встановлена проектом, витримується на практиці протягом 3-5 років, після чого гірничі роботи відхиляються від проектних положень з відповідною зміною виймання обсягів, як руди, так і розкритих порід [6-7]. При цьому головна увага приділяється конструктивному удосконаленню даних засобів з метою максимально ефективного їх упровадження й застосування в кар'єрах [8-10].

Постановка завдання. Одним із напрямків підвищення ефективності розробки відкритим способом залізрудних кар'єрів України є підвищення якості проектних рішень, удосконалення техніки і технології видобутку мінеральної сировини. В даному дослідженні автори цілеспрямовано зосередили свою увагу на цьому, виходячи з ідеї «динамічного проектування», спираючись на робочу гіпотезу домінантного впливу рівневої варіативності кар'єр-систем.

Викладення матеріалу та результати. Насамперед піддалися ретроспективному аналізу проектні рішення головних параметрів кар'єрів і їх зміна в часі

На рис. 1-8 показано динаміку проектних і фактичних обсягів видобутку руди та коефіцієнтів розкриття кар'єрів Кривбасу.

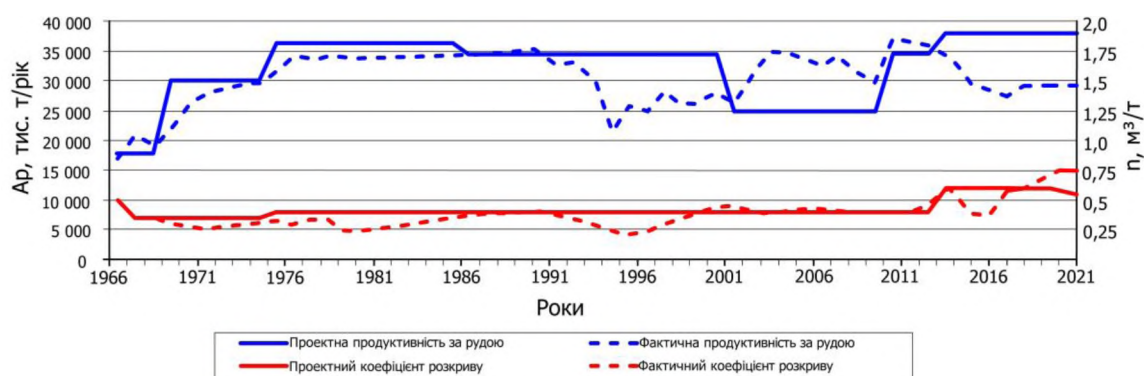


Рис. 1. Динаміка проектних і фактичних обсягів видобутку руди та коефіцієнтів розкриття в кар'єрі ІнГЗК

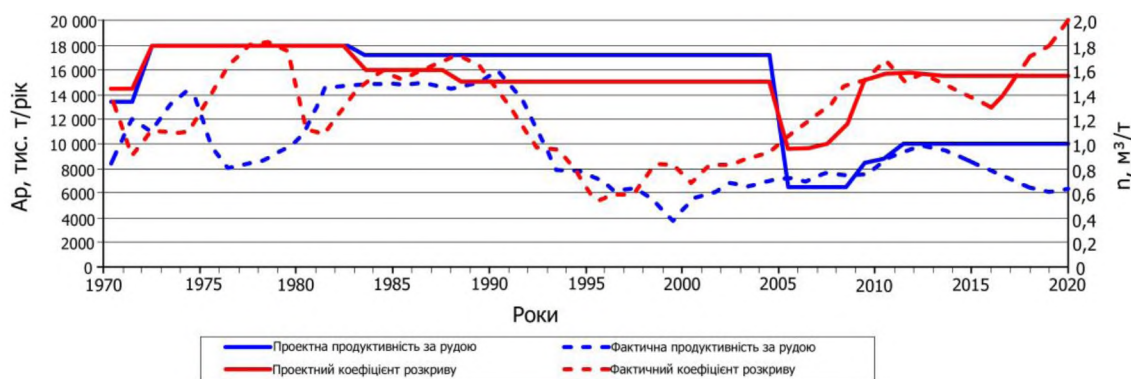


Рис. 2. Динаміка проектних і фактичних обсягів видобутку руди та коефіцієнтів розкриття в Ганнівському кар'єрі ПівніГЗК

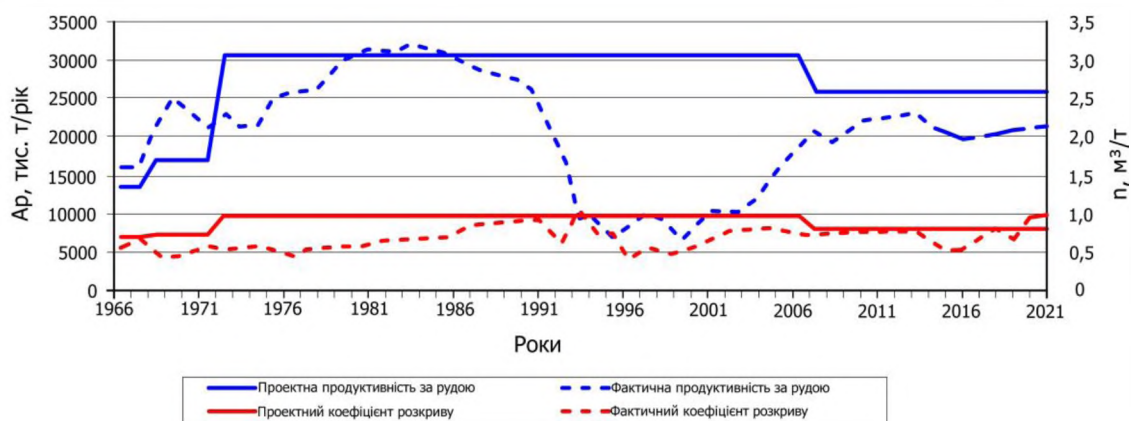


Рис. 3. Динаміка проектних і фактичних обсягів видобутку руди та коефіцієнтів розкриття в Першотравневому кар'єрі ПівніГЗК

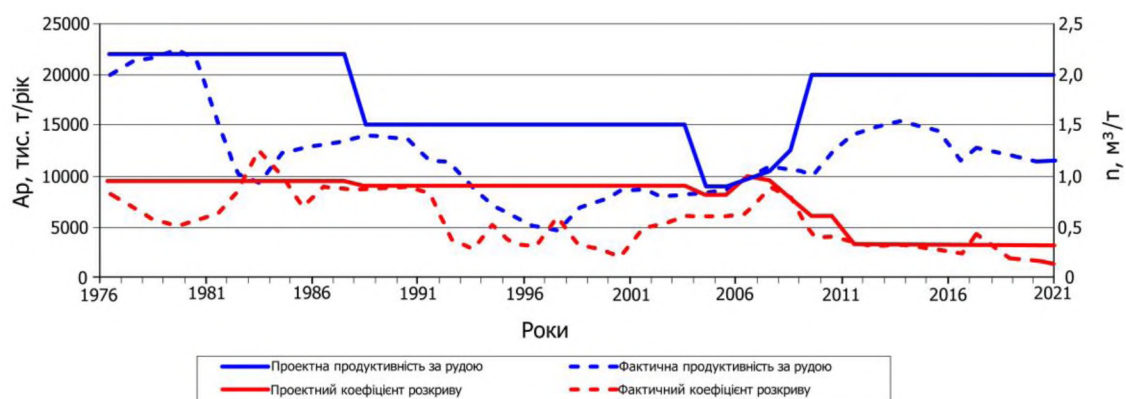


Рис. 4. Динаміка проектних і фактичних обсягів видобутку руди та коефіцієнтів розкриття в кар'єрі №3 АрселорМітталКривий Ріг

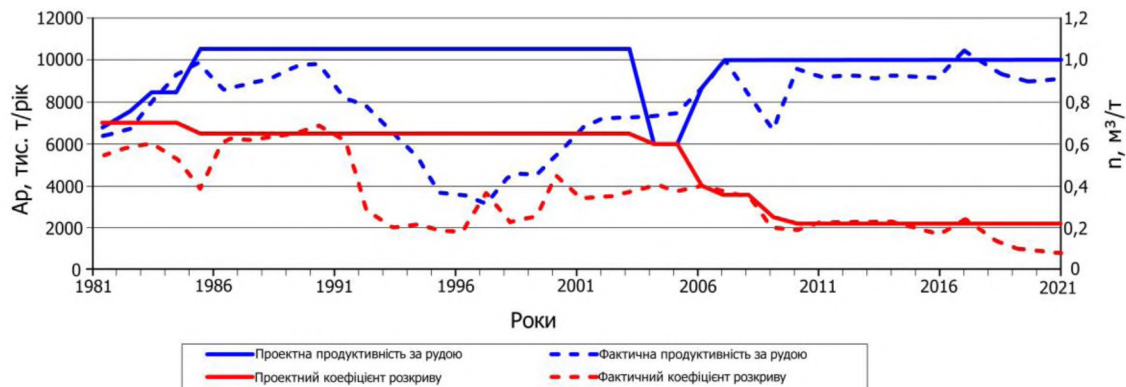


Рис. 5. Динаміка проектних і фактичних обсягів видобутку руди та коефіцієнтів розкриття в кар'єрі №2 біс АрселорМітталКривий Ріг

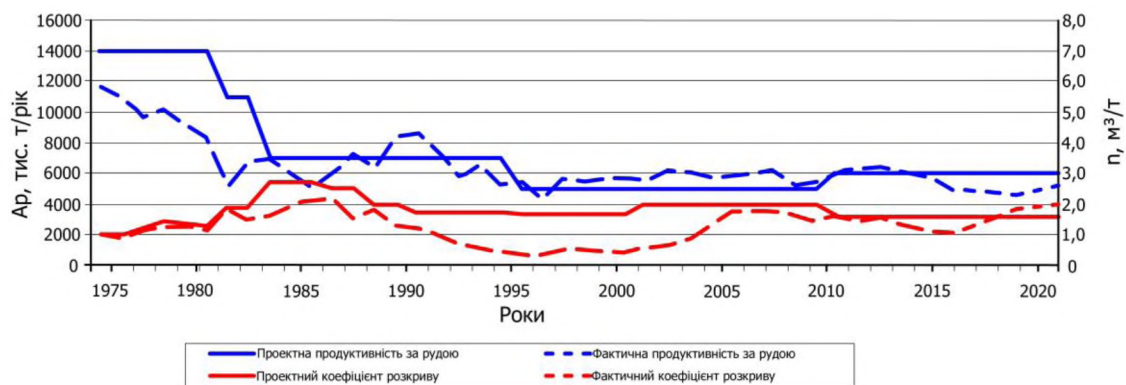


Рис. 6. Динаміка проектних і фактичних обсягів видобутку руди та коефіцієнтів розкриття в кар'єрі №1 ЦГЗК

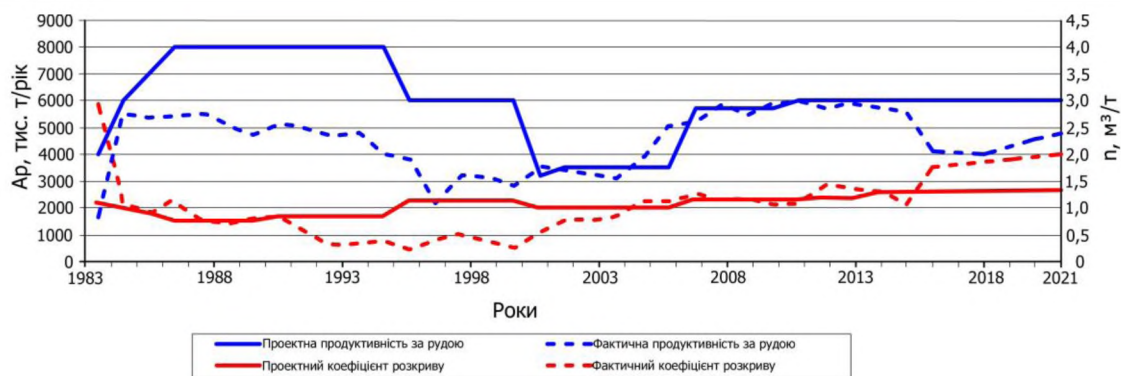


Рис. 7. Динаміка проектних і фактичних обсягів видобутку руди та коефіцієнтів розкриття в кар'єрі №3 ЦГЗК

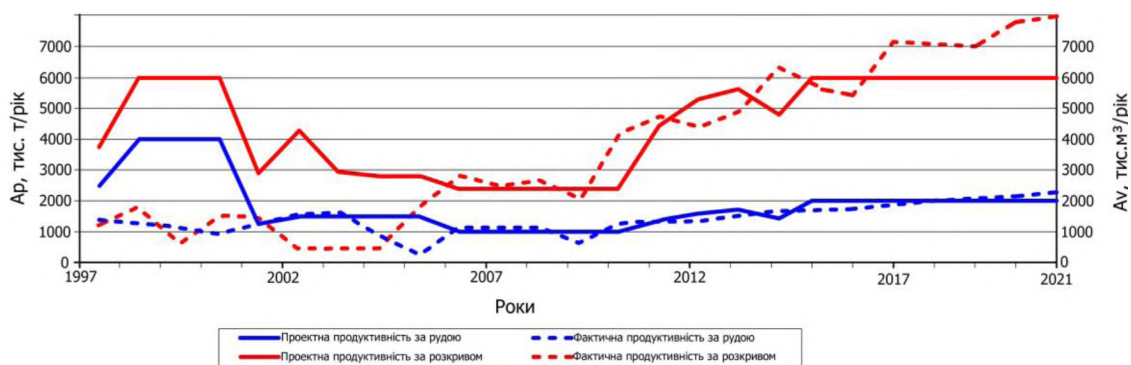


Рис. 8. Динаміка проектних і фактичних обсягів видобутку руди та розкриття в кар'єрі №4 ЦГЗК

Такий ретроспективний аналіз проектних рішень, виконаних в період з 1988 по 2021 рр. виключно для коригування розвитку гірничих робіт кар'єрів Кривбасу, показав, що за весь цей період виробнича потужність, визначена початковими проектами, змінювалася на всіх без винятку ГЗК. Це на кар'єрах – спостерігалось завжди і є системною ознакою даних об'єктів. Основними ж причинами даних змін є: коливання (особливо – стрибки) внутрішнього і зовнішнього попиту на залізорудну сировину, спади і підйоми національного господарства, економічні кризи різного масштабу, необхідність зміни виробництва внаслідок перегляду границь кар'єру, збільшення продуктивності за розкритвом для підтримки обсягів видобутку руд на необхідному рівні, зміна обсягів видобутку й інші чинники, яких неможливо уникнути, і які завжди й неминуче вимагатимуть змін проектних рішень. Це ж стосується і випадків комплексної розробки родовищ.

І тут не зайвим буде нагадати, що проект – є абсолютно єдиним і кінцевим документом, який регламентує гірничі роботи цілком і не допускає ніяких порушень, а в разі ж виникнення непередбачених обставин або відхилень – роботи мають зупинятися до перегляду і перезатвердження проекту.

Завдання, які вирішуються в проектах, пов'язаних з підтриманням або збільшенням виробничої потужності, зумовлюються регулярними і вже традиційними відхиленнями від них реального стану гірничих робіт. Як правило – внаслідок відставання розкриття і зменшення рудних площ (що зрештою призводить до скорочення довжини активного фронту уступів), несвоєчасного перенесення поверхневих споруд й виносу інженерних мереж, недопоставок обладнання, затримок гірничо-капітального будівництва і перенесення розкривних виробок тощо.

Але за часів планової економіки відхилення різної природи мали зовсім незначну амплітуду і – головне – були в більшості випадків прогнозованими. На відміну від того, з чим зіткнулися комбінати останніми десятиліттями, коли запланована проектами узгодженість домінантних для кожного з ГЗК показників (обсягів видобутку руд і коефіцієнтів розкриття) почала повністю руйнуватися, а динаміка їх еволюцій – набувати явні ознаки непередбачуваних флуктуацій (див. рис. 1-8).

Цілком зрозуміло, що значною мірою дане явище пояснюється досить просто – різким переходом від планової економіки до ринкової. Але у цьому разі ми б, цілком закономірно, спостерігали близькі за характером відхилення (принаймні – тенденції) на більшості кар'єрів, і ці

відхилення, без сумніву, відображали б пропорційне відставання розкриття. Та з тих же графіків ми бачимо дещо вельми несподіване (особливо – рис. 2, 3, 6), що ніяк не підпадає під дану логіку і чітко демонструє, що розглянуті відхилення на різних ГЗК не тільки не є аналогічними, але подекуди мають явно протилежний характер.

Дані факти, як показує виконаний аналіз, є вельми симптоматичними і це змушує серйозно переглянути системний аспект регіональних гірничорудних комплексів.

Суть даного твердження полягає у визначенні адекватної ієрархії систем даного класу. Зрозуміло, що за планового господарювання загальною надсистемою була економіка країни, галузі в якій були спеціалізованими системами, в одній з яких – гірничодобувній – комбінати мали статус підсистем. Дана модель діяла протягом тривалого часу досить ефективно і наймасштабніша галузь промисловості – гірничорудна наочно це підтверджує.

Але з поверненням до капіталістичної моделі в Україні відбулися радикальні зміни, оригінальність яких полягає в тому, що зміни ці охопили здебільшого принципи господарювання, в той час, як структура більшості об'єктів господарювання залишилася майже без змін. В цьому аспекті ГЗК почали набувати статусу самостійних систем, що, на наш погляд, є хибним.

За усіма спостереженнями й висновками зі структурно-функціонального аналізу ГМК, власне системою варто все ж розглядати не ГЗК, а галузь. Принаймні – регіональний кластер комбінатів, найбільш залежних один від одного, що опосередковано підтверджують і рис. 9 та рис.10.

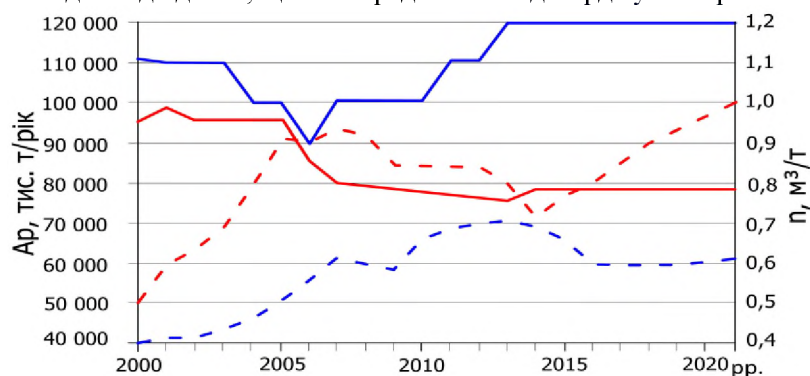


Рис. 9. Динаміка проектних і фактичних обсягів видобутку руди та розкриття в кар'єрах Кривбасу

Найбільш різке зменшення обсягів видобутку руд відбулося в період 1990-1996 рр. внаслідок значного скорочення споживання, як вітчизняних металургійних комплексів, так і країн Східної Європи, одночасно з погіршенням фінансового стану підприємств.

Як правило, в кризові періоди особливо різко відбувається падіння обсягів розкривних робіт, зумовлене прагненням підприємств обмежити зростання витрат виробництва за рахунок формування тимчасово неробочих бортів кар'єрів, а також – робочих бортів з підвищеними кутами нахилу. Все це є прямим і безпосереднім наслідком нездатності гірничодобувних підприємств, а фактично – неможливості забезпечити гнучке реагування на зміну внутрішнього і зовнішнього попиту на продукцію без значного зростання витрат на розробку, так як в проектах на розробку родовища не передбачається зміна продуктивності кар'єру за рудою протягом тривалих періодів.

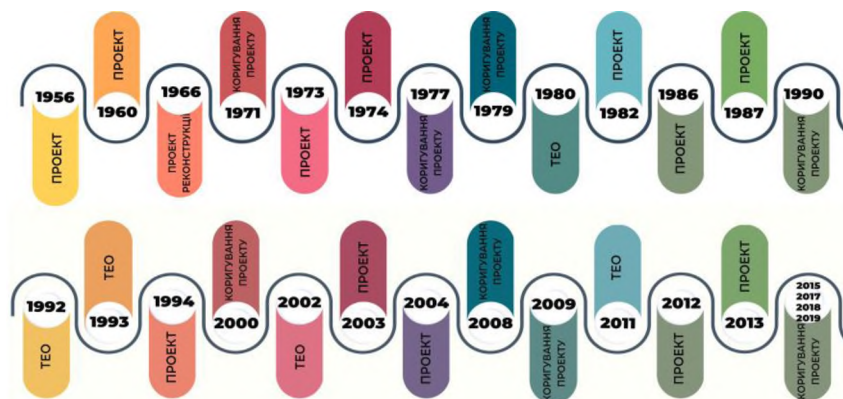


Рис. 10. Хронологія проектних рішень по Глеюватському кар'єру ЦГЗК з 1956 по 2020 рік.

Частково невідповідності (розбіжності) в характері розвитку окремих ГЗК можна пояснити стилем та компетентністю керівництва, частково – випадковим збігом обставин, але це далеко не завжди пояснює явні закономірності.

З рис. 1-9 видно, що з плином часу зменшується розбіжність між проектною потужністю і фактичними обсягами видобутку руди. Це відбувається внаслідок посилення впливу ринку і конкуренції, які змушують підприємства адаптувати проектні рішення шляхом коригування діючих проектів або розробки нових з метою зменшення економічних втрат [11]. Однак, стала наявність періодів, коли обсяги фактичного видобутку регулярно перевищують проектні, наглядно й переконливо свідчить про недоліки й невпинно зростаючі проблеми традиційної організації та технології проектування: проектування не встигає за надзвичайно динамічною ринковою реальністю; не має, не то що адекватного, але – ніякого механізму активного реагування на відхилення від власних статичних рішень, з належним оперативним зворотнім зв'язком. Але ж ці відхилення є абсолютно природними і неминучими, насамперед – внаслідок стохастичної природи й поведінки гірничо-виробничих динамічних систем з їх суто статистично-усередненими параметричними базами даних (геологічних, кліматичних, економічних, соціальних й ін.), а відтак – приречені на безліч ризиків.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Таким чином, в ході виконаного аналізу регулярності, масштабів, причин та наслідків виникнення й накопичення відхилень гірничих робіт від проектних рішень й зумовлених цим відхилень головних параметрів кар'єрів Кривбасу від чинних нормативів, наочно доведено, що існуюче нині традиційне коригуюче проектування відпрацювання кар'єрів при непередбачуваній зміні продуктивності є не результатом належної стратегії розвитку гірничих робіт, а – лише вимушеною та завжди запізнілою, суто компенсаторною реакцією на зміну потреби в залізорудній продукції, в результаті чого гірничодобувні підприємства несуть значні збитки при повній неможливості адекватного гнучкого реагування на зміну цін і попиту на мінерально-сировинних ринках.

Викладена аргументація усе нагальніше актуалізує необхідність коригування на концептуальному рівні ряду принципів проектування залізорудних кар'єрів та планування розвитку гірничих робіт стосовно підвищення оперативності та гнучкості взаємодії в системі «проект – рудник – відхилення від проекту – компенсаторне коригування», реалізація чого нами вбачається лише в розвитку засад динамічного проектування.

Список літератури

1. Аннistrатов Ю.И., Аннistrатов К.Ю. Проектирование карьеров. – М.: ГЕМОС Лимитед, 2003. – 176 с.
2. Lutsenko. A. Sergey. Open pits productivity control along with iron ore products demand variation / Lutsenko. A. Sergey/ Quality – Access to Success. – 2017. – vol. 18(S1) – С. 226-230.
3. Azarian, V. Applied scientific and systemic problems of the related ore-dressing plants interaction in the event of decommissioning the massif that separates their quarries/ V. Azarian, S. Lutsenko, S. Zhukov, A. Skachkov, R. Zaiarskyi, D. Titov // Mining of Mineral Deposits. – 2020. - 14(1), 1-10.
4. Романенко А.В. Обзор и анализ проектных решений по технологии открытых горных работ на глееватском карьере ПАО «ЦГОК» / А.В. Романенко, А.Е.Биленко, В.В.Терешенко, В.Г.Пшеничный // Гірничий вісник КНУ: збірник наук. праць, Вип. 95 (1). - Кривой Рог, 2012.- С.25-31.
5. Научно-исследовательская работа «Определение рациональной стратегии развития транспортной схемы Первомайского карьера ПАО «СЕВГОК». - «МИ-ЦЕНТР». - Кривой Рог, 2013.
6. Луценко С.А. Исследование влияния производительности карьера на экономические показатели разработки / С.А. Жуков, С.А. Луценко // Вісник Криворізького національного університету: зб. наук. праць, вип. 47. – Кривой Рог, 2018. – С. 139-142.
7. Трубецкой К.Н., Краснянский Г.Л., Хронин В.В. Проектирование карьеров - М.: Высшая школа, 2009. - 694с.
8. Луценко С.А. Исследование влияния параметров системы разработки на отставание вскрышных работ в карьере / С.А. Луценко, С.А. Жуков // Гірничий вісник. – Кривой Рог, 2018. - Вип. 104. – С.76-81.
9. Луценко С.А. Дослідження впливу продуктивності кар'єру за рудою і параметрів системи розробки на інтенсивність відпрацювання родовища / С.А. Луценко, С.А. Жуков // Збірник наукових праць НГУ. - Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2019. - №58. - С. 68 - 75.
10. Черепанов Е.В. Обоснование технологии горных работ на рудных карьерах, имеющих отставание по вскрышке / Е.В.Черепанов // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф.Решетнева. – 2006. – №5. – С. 267-270.
11. Панченко В.В. Анализ состояния и приоритетные направления повышения эффективности открытой разработки железорудных месторождений Украины / В.В. Панченко, А.В. Романенко // Матеріали міжнародної конференції „Форум гірників – 20016”. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2016. – С. 33–43.

Рукопис подано до редакції 27.03.2023

К.М. КОВБИК, ст.викладач., В.О. КАЛІНІЧЕНКО, д-р техн. наук, проф.
Криворізький національний університет

МЕТОДИКА МОДЕЛЮВАННЯ ВИПУСКУ НАСИЧЕНИХ ВОДОЮ БАГАТИХ ЗАЛІЗНИХ РУД В УМОВАХ КРИВОРІЗЬКОГО ЗАЛІЗОРУДНОГО БАСЕЙНУ

Метою статті є дослідження випуску обводненої руди та розробка удосконаленої методики випуску з додатковими параметрами, які враховують насиченість руди водою. Процес випуску посідає одну з ключових позицій по системі. Саме від нього залежить ефективне та своєчасне вилучення корисної копалини із надр. В свою чергу сам процес досить суттєво залежить від гірничо-геологічних умов, та фізико механічних властивостей руд. Тому за для вивчення процесу випуску, вченими, було виконано багато лабораторних та практичних дослідів. В них вчені прослідковували вплив зміни різних характеристик руди, та умов залягання на протікання процесу випуску руди. Тому дослідження та моделювання процесу випуску обводненої руди є актуальним завданням. Оскільки багаті залізні руди криворізького басейну мають здатність до злежування то при їх насиченні водою процес випуску відбитої руди значно погіршується. Це призводить до збільшення втрат руди по системі розробки в цілому та виникненню проблем з подальшим відпрацюванням очисних блоків. Незважаючи на значну кількість науково-дослідницьких робіт в області випуску руди, питання відпрацювання обводнених руд залишається відкритим.

Методи дослідження. Аналіз науково дослідної та методичної літератури, яка була присвячена випуску руди та технологіям ресурсозбереження, створення макету для фізичного моделювання випуску руди в лабораторних умовах із урахуванням додаткових показників обводнення руди.

Наукова новизна. Встановлені закономірності випуску обводненої руди із очисних блоків. Визначені залежності показників випуску та встановлені відповідні коефіцієнти та параметри, які враховують насиченість руд водою.

Практична значимість. Удосконалено методику випуску обводненої руди. На основі запропонованої методики виконано серію дослідів для визначення зміни параметрів випуску обводненої рудної маси при камерних системах розробки.

Результати. Було удосконалено методику випуску руди в лабораторних умовах з урахуванням обводненості руди та отримані відповідні залежності показників випуску від насиченості руди водою.

Ключові слова: випуск руди, обводнені руди, насиченість руд, обводнені родовища, методика випуску, шахтна вода, підземна розробка.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. С поглибленням гірничих робіт відбувається зміна гірничо-геологічних умов. Зростає гірничий тиск, а продуктивність виймальних одиниць зменшується. До складних гірничо-геологічних умов додаються ще гірничо-гідрологічні, які мають суттєвий вплив на подальше ведення гірничих робіт. Вони проявляються у пересіканні рудними шарами водоносних горизонтів. Ці ділянки покладу потребують додаткових операцій, як перед початком ведення очисних робіт так і після. Суттєвий вплив води спостерігається і на процес випуску, який є одним із головних процесів підземних гірничих робіт. Насиченість руди водою зменшує їх міцнісні характеристики та погіршує протікання самого процесу випуску руди із очисного простору. Виникають зависання, зростає тиск на приймальному горизонті, збільшується кількість втрат руди по системі та погіршуються санітарно-гігієнічні умови.

Насичена водою рудна маса - це руда, яка містить в своєму складі певну кількість води. Випуск обводненої рудної маси в умовах шахти може бути складним процесом, оскільки води можуть ускладнювати видобуток руди та збільшувати витрати на її видобуток.

Основними технологічними процесами для забезпечення випуску рудної маси в умовах обводнення родовищ є:

встановлення належної вентиляції в шахті, щоб забезпечити необхідний рівень повітряного потоку;

встановлення системи відкачування води (дренаж), яка дозволить знизити рівень води в шахті до прийнятного рівня для продовження видобутку руди;

моніторинг і контроль рівня підземних вод та її вмісту в руді у процесі її видобутку. Це допоможе забезпечити оптимальні умови для продовження видобутку руди та запобігти можливим проблемам, пов'язаним з великим обсягом води.

Застосування технологій забезпечення безпеки працівників, щоб забезпечити безпеку під час робіт з випуску обводненої рудної маси.

Загалом, випуск обводненої рудної маси в умовах шахти є складним технологічним процесом, що вимагає використання відповідних підготовчих етапів, та спеціалізованих технологічних рішень.

Отже, моделювання випуску обводненої рудної маси в лабораторних умовах може бути дуже складним завданням, яке може включати в себе багато факторів, які впливають на точність результатів. Для забезпечення точності результатів необхідно враховувати всі ці фактори та використовувати методи та технології, які максимально наближають умови лабораторних досліджень до реальних.

Тому з'являється необхідність розробити методику, щоб дослідити та удосконалити процес випуску обводненої руди. Для встановлення основних параметрів випуску обводненої руди та прогнозування втрат по системі в цілому були виконані представлені дослідження.

Аналіз досліджень і публікацій. В умовах Криворізького залізрудного басейну гірничі підприємства націлені на впровадження ресурсозберігаючих технологій [1,6]. Подальший розвиток гірничо-видобувної галузі також залежить від можливості підприємств відпрацьовувати складно-структурні поклади [5] та вести ефективно очисні роботи в складних гірничо-геологічних умовах, що забезпечує досягнення максимального економічного ефекту [2-5]. Тому є необхідність досліджувати питання відпрацювання обводнених покладів та ефективність систем в таких умовах.

Моделювання це важливий процес в дослідженні процесу випуску, оскільки він дає змогу візуально, а також фізично підтвердити наукові положення. Для вивчення явищ, які виникають при випуску руди, Малахов Г.М. [7] виконав багаточисленні досліді на моделях із еквівалентних матеріалів в лабораторних умовах. Модель [7] являє собою бокс зі скляною передньою стінкою та отвором на дні, який імітує випускную воронку. В бокс шарами засипають еквівалентний матеріал, поверх якого насипають тонку смужку вугільного порошку, щоб процес зміщення шарів при випуску руди із окремого отвору було візуально зручніше спостерігати [7]. У процесі моделювання випуску необхідно дотримуватися масштабу моделювання та еквівалентного співвідношення матеріалів [7,8].

Випуск руди, відбитої масовим вибухом, є одним із головних процесів, який визначає кінцевий результат використання систем розробки [1,2]. В системах розробки з обваленням руди і вміщуючих порід, в яких блок має вертикальні стінки, найбільш ефективний рівномірно послідовний випуск однакових доз із усіх рудовипускних отворів [7]. Поверхня дотикання руди з обваленими породами знижається, зберігаючи при цьому загальне горизонтальне положення до деякого критичного рівня, який визначається фізичними властивостями руди, діаметром дучок та відстанню між ними. При такій черзі випуску вдається випустити максимальну кількість чистої руди до початку засмічення [8].

В камерних системах розробки здійснюється випуск чистої руди. Головною проблемою такого випуску є наявність втрат обводненої вологої руди.

Постановка задачі. В основі процесу моделювання випуску закладені майже ідеальні умови. Тому провести досліді з використанням додаткових умов є необхідним. Насичення руди водою є параметром, який суттєво впливає на показники виймання по системі. Нами поставлена задача створити модель для випуску обводненої руди та визначити параметри випуску насиченої рудної маси.

Викладення матеріалу та результати. Досліді планується виконувати моделюванням через одну випускную воронку, в умовах камерних систем розробки, тобто без засмічення руди налягаючими пустими породами з відповідним масштабу моделювання гранулометричним складом руди. Змінним параметром є насичення руди водою.

В якості можливого матеріалу та методики для проведення дослідів були розглянуті такі варіанти:

натурні зразки руди: натурні зразки руди можуть бути використані для дослідження впливу води на процеси випуску руди;

модельні системи: модельні системи можуть бути використані для дослідження фізико-хімічних процесів, що відбуваються під час випуску руди насиченої водою;

комп'ютерне моделювання: комп'ютерне моделювання може бути використане для дослідження процесів випуску руди насиченої водою в різних умовах. Наприклад, можна застосувати моделювання, щоб дослідити вплив різних параметрів води на процес випуску руди та визначити оптимальні умови для максимального виходу руди.

З вище розглянутих варіантів для проведення досліджень випуску руди насиченої водою було прийнято рішення використовувати натурні зразки руди.

Пропонована модель, яка зображена на рис. 1, являє собою конструкцію з дерев'яними стінками та прозорим склом з координатною сіткою розмірами 5×5 см. Випускний отвір має радіус 1,7 см. Макет виконаний в масштабі 1:100.

В якості матеріалу була обрана подрібнена гематит-мартитова руда. Для відсіювання руди були використані сита з наступними параметрами: 7 – 5 мм; 5 – 3 мм; 3 – 2 мм; 2 – 1 мм; 1 – 0,5 мм; 0,5 – 0,3 мм.

Для дослідів було обрано фракції: 7 -5 мм; 5- 3 мм; 3 -2 мм; 2-1мм.

Висота засипання моделі 40 м або 40 см згідно масштабу моделювання. Результати дослідження адаптовані для камерних систем розробки. Встановлено що для засипання моделі на вказану висоту слід використати 8520 (рис.2) грамів, сухої (5%) просіяної руди. Гранулометричний склад вказаний в табл. 1.

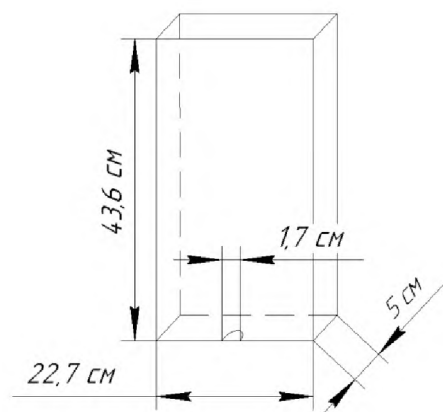


Рис. 1 Схематичне зображення моделі для випуску руди



Рис. 2. Тестове засипання сухого матеріалу на визначену висоту

Таблиця 1

Гранулометричний склад сухого рудного матеріалу

Фракція (мм)	7-5	5-3	3-2	2-1	Σ
Вага (г)	2970	4700	425	425	8520
Відсоток (%)	34,86	55,16	4,99	4,99	100

Моделювання випуску руди в умовах обводнення родовищ, на матеріалах аналогічних натуральним, викликає деякі складності, що погіршують точність результатів порівняння з реальними умовами в шахтах оскільки процес насичення руди водою є неоднорідними і має у своєму складі дуже багато перемінних властивостей. Вода має високий вплив на фізико-механічні властивості випускаємих руд, а саме на зменшення «текучих» властивостей руд. Можна визначити деякі з найбільш поширених проблем моделювання випуску обводненої рудної маси в лабораторних умовах:

відсутність реалістичного середовища: Лабораторні умови можуть відрізнятися від умов в реальних шахтах. Наприклад, реальна рудна маса може містити більшу кількість інших компонентів, таких як глина, пісок, кам'яністі матеріали та інші, які можуть впливати на випуск руди. Ці компоненти можуть бути відсутніми в лабораторних умовах, що може спотворити результати;

складність відтворення реальних умов: Відтворення реальних умов в лабораторії може бути дуже складним, оскільки це може вимагати спеціального обладнання, технологій та матеріалів;

недостатня кількість даних: Для моделювання випуску обводненої рудної маси необхідно використовувати велику кількість даних. Відсутність даних або недостатня кількість даних може призвести до неточностей та недостатньої точності результатів;

недостатня точність вимірювань: Вимірювання, які використовуються в лабораторних умовах, можуть бути менш точними, ніж ті, які використовуються в реальних умовах. Це може призвести до неточності результатів;

відсутність факторів зовнішнього середовища: в реальних умовах, фактори середовища, такі як температура, вологість повітря, тиск, можуть впливати на випуск обводненої рудної маси. У лабораторних умовах ці фактори можуть бути контрольовані, або ж їх взагалі може бути відсутніми, що не дає повної картини взаємодії процесів;

складність врахування всіх процесів: Випуск обводненої рудної маси є складним процесом, який може включати в себе багато етапів та різні види взаємодії. У лабораторних умовах врахування всіх цих процесів може бути дуже складним, що впливає на точність результатів;

взаємодія між компонентами: Випуск обводненої рудної маси може включати взаємодію між різними компонентами, такими як руда, вода та інші матеріали. У лабораторних умовах взаємодію між цими компонентами може бути важко врахувати, що призводить до неточних результатів.

Тому було прийнято рішення змочити рудну фракцію до необхідного стану. Потрібно було збільшити масу руди шляхом її змочування. Для змочування використовувався водяний зрошувач.

Насичення рудної маси водою характеризується співвідношенням мас вологої руди до її сухого аналогу, розділеного на масу сухої руди та помножену на сто. Результат буде у відсотках і відображає насичення руди водою у відсотковому відношенні. У вигляді формули його можливо виразити так

$$H_p = \frac{M_b - M_c}{M_c} 100 \%, \quad (1)$$

де H_p – відсоток насичення руди водою (вологість), %; M_c – маса сухої руди, г; M_b – маса мокрої руди, г.

Для дослідів руда поступово змочувалась та ретельно перемішувалась, доки на вагах не була зафіксована необхідна маса. Розрахункова маса руди при насиченні водою в 0.5% складає 8560 г.

Розрахунок необхідного збільшення рудної маси за рахунок її змочування виконувався шляхом удосконалення формули (1), де M_b – виступало у якості невідомого значення. Формула виглядає так, г

$$M_b = M_c \frac{H_p}{100} + M_c, \quad (2)$$

де $H_p = 0,5\%$; $M_c = 8520$, г.

Підставивши значення в формулу (2), отримуємо, г

$$M_b = 8520 \frac{0,5}{100} + 8520 = 8562,$$

де $M_b = 8562$, г.

Необхідно змочувати руду доки на вагах, доки не буде досягнута відмітка в 8560 г з урахуванням похибки ваг ± 5 г.

Висновки та напрямок подальших досліджень. При виконанні серії дослідів за вище пропонованою методикою планується визначити залежності впливу насичення руди водою на формування втрат в гребнях і загальні показники випуску для підтвердження пропущення того, що в залежності від насичення водою фізико-механічні показники руди змінюються. Випуск руди в таких умовах, навіть на моделі, виконаний в масштабі 1:100 є досить ускладненим. Тому методика буде вдосконалюватися за для досягнення найбільшої відповідності результатів реальним умовам.

Розгляд питання випуску руди насиченою водою теоретично дає змогу вирішити кілька проблем у теорії розробки родовищ та випуску руд. Ось декілька з них:

ризики пов'язані з водою: вода може створювати ризики при розробці родовищ та випуску руди. Наприклад, вона може забруднювати середовище та створювати проблеми з безпекою робочих місць. Розгляд питання випуску руди насиченою водою може допомогти зменшити ризики, пов'язані з водою, та забезпечити більш ефективний та безпечний процес видобутку;

моделювання випуску руди: розгляд питання випуску руди насиченою водою може допомогти покращити точність та надійність моделювання випуску руди. Врахування впливу води

на властивості руди та процес випуску може допомогти створити більш точну та повну модель, що відображає реальні умови випуску руди;

розвиток нових технологій: розгляд питання випуску руди насиченою водою може допомогти розробити нові технології та інструменти для розробки родовищ та випуску руди. Наприклад, нові методики обробки руди можуть бути розроблені з урахуванням впливу води на властивості руди, що може призвести до більш ефективного та економічного видобутку руди;

розв'язання проблем, пов'язаних з водою: розгляд питання випуску руди насиченою водою може допомогти розв'язати проблеми, пов'язані з водою під час процесу розробки родовищ та випуску руди. Наприклад використання відкачуємих води у технологічних процесах;

можливість відпрацювання нових родовищ руд: розгляд питання випуску руди насиченою водою може допомогти при пошуку та відпрацюванні нових покладів руд. Наприклад, вивикористання результатів для різних умов випуску обводнених руд можуть бути використані як один з факторів, що впливають на вибір місця розробки родовища та технологію ведення очисних робіт.

Отже, розгляд питання випуску руди насиченою водою може допомогти вирішити ряд проблем у теорії розробки родовищ та випуску руди, що можуть призвести до більш ефективного, безпечного та економічного процесу видобутку.

Список літератури

1. Черненко А.Р., Черненко В.А. Подземная добыча богатых железных руд. -М.: Недра, 1992. – 224 с.
2. Сторчак С.А. Повышение качества рудной массы при подэтажном обрушении за счёт технологических факторов / С.А. Сторчак, С.В. Письменный, В.А. Сбитнев // Качество минерального сырья. Сб. науч. трудов. – Кривой Рог: КТУ, 2002. – С. 70-74.
3. Колосов В. А. Состояние и перспективы развития сырьевой базы горно-металлургического комплекса Украины / В. А. Колосов, Н. И. Дядечкин // Горный журнал. – 2005. – №5. – С. 10-13.
4. Перспективные направления повышения качества шахтных руд Кривбасса / Бызов В.Ф., Капленко Ю.П., Колосов В.А., Ломовцев Л.А. // Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost'. – 2001. – №1. – С. 85-87.
5. Ступнік М. І. Стан і перспективи розвитку підземних гірничих робіт у Криворізькому басейні / Ступнік М.І., Колосов В. О. Калініченко В. О. // Розробка родовищ: зб. наук. праць – 2013. – Т.7. – С. 223-228.
6. Ступнік Н.И. Пути совершенствования технологии подземной разработки богатых руд Кривбасса / Н.И. Ступнік, М. И. Кудрявцев, А.М. Басов // Вісник Криворізького технічного університету. – 2010 – Вип. 26. – С. 23-26.
7. Малахов Г. М. Особенности разработки рудных месторождений на больших глубинах и пути повышения эффективности разработки руд Кривбасса, Сб. «Пути повышения эффективности подземной добычи руды в Криворожском бассейне», Кривой Рог, КГРИ. – 1971. – С. 5-41.
8. Моделювання фізичних процесів гірського масиву в лабораторних умовах на статичних моделях / В.О. Колосов, З.Р. Маланчук, С.В. Письменний, К.М. Ковбик // Гірничий вісник : науково-технічний збірник. – Кривий Ріг, 2018. – Вип. 104. – С. 55–62.

Рукопис подано до редакції 31.03.2023

УДК 621.9

Д.Ю. КРАВЦОВА, канд. фіз.-мат. наук, ст. викл., У.І. ЗЮГАН, асистент
Криворізький національний університет

СТАТИСТИЧНА ОБРОБКА ІНЖЕНЕРНИХ ВІМІРЮВАНЬ ЗІ КОМП'ЮТЕРИЗАЦІЄЮ РОЗРАХУНКІВ У ТАБЛИЧНОМУ ПРОЦЕСОРІ

Метою роботи є створення універсального шаблону в табличному процесорі для розрахунку статистики емпіричної вибірки із ста розмірів навання вибраних деталей із партії.

Методи дослідження. Вибірка із ста розмірів навання вибраних деталей із партії отримана емпірично шляхом технічних вимірювань. Обчислення статистики виконано аналітичним способом зі застосуванням функцій та цифрових інструментів табличного процесору із метою комп'ютеризації та автоматизації розрахунків.

Наукова новизна полягає у пошуку, визначенні, тестуванні та налагодженні роботи функцій та цифрових засобів візуалізації розрахунку табличного процесора, які повністю задовільняють вимоги до статистичної обробки інженерних вимірювань, які будуть спроможні максимально автоматизувати обчислення і миттєво повертати результати для кожної наступної вибірки.

Практична значимість. Очевидно, що у галузі прикладної механіки технолог відділу механічної обробки має на меті весь час вдосконалювати виробничий процес: зменшувати кількість браку, якщо робота без браку неможлива, то зменшувати витрати на брак, зменшувати зношування інструменту, оптимізувати процес механічної обробки усіма можливими способами. Для цього інженер-механік вимушений проводити вимірювання, статистично їх оброб-

ловати, аналізувати результати, а із аналізу робити висновки та знаходити шляхи вдосконалення виробництва через прийняття конкретних технічних рішень. Тому висока практична значимість отриманого шаблону таблиці полягає не тільки у скороченні витрат часу інженера-механіка на рутинні обчислення, а і поліпшення морально-психологічного стану інженера у робочий час.

Результати. Отримана таблиця, яка після введення вибірки і граничних розмірів по кресленню автоматично перевіряє вибірку по правилу трьох сигм, будує гістограму частотей емпіричної вибірки, будує теоретичну криву нормального розподілу Гауса, будує область допуску на одній діаграмі, обчислює відсоток виправного і невиправного браку, проводить дослідження нульової гіпотези по критерію Пірсона і критерію Колмогорова.

Ключові слова: вибірка із розмірів деталей, гістограма частотей, нормальний розподіл Гауса, статистика Пірсона, статистика Колмогорова, автоматизація розрахунків.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В усіх галузях науки, техніки і промисловості існує етап проектування, на якому слід прийняти те чи інше рішення за умов невизначеності. Аналогічна задача типова для інженерів-механіків на машинобудівному виробництві є задача налаштування верстату зі зміщенням емпіричного середнього арифметичного розміру від середини інтервалу допуску, якій передують статистична обробка вимірювань, побудова діаграм, перевірка по критеріям узгодженості. У статті показано як комп'ютеризувати довгі статистичні розрахунки, автоматизувати таблицю для проведення різних серій вимірювань.

Аналіз досліджень і публікацій. Статистична обробка [1] результатів інженерних вимірювань проводиться у кожному дослідженні, тому важко переоцінити її значимість і актуальність автоматизації рутинних розрахунків. Статистична обробка вибірок у машинобудівній галузі є проміжним етапом випробовування нових матеріалів [2], технологічних процесів конструювання машин гірничо-металургійного комплексу [3], планування циклів ремонтних робіт для машин гірничо-металургійного комплексу [4], переналагодження верстатів [5], комплексної оцінки якості продукції [6], оцінки довговічності металоконструкцій транспортних засобів [7], розрахунку подачі токарних верстатів [8], тощо. Багато авторів, наприклад [9-10], тяжіють максимально автоматизувати розрахунки та економити час.

Постановка задачі. Є певним чином налаштований верстат, який оброблює певну поверхню деталі. Відомо тип оброблюваної поверхні, розмір із допуском по кресленню. Дано вибірку із ста розмірів знятих із випадкових деталей партії.

Перевірити вибірку по правилу трьох сигм. Побудувати гістограму частотей емпіричної вибірки, побудувати теоретичну криву нормального розподілу Гауса, побудувати область допуску на одній діаграмі. Провести дослідження нульової гіпотези по критерію Пірсона і критерію Колмогорова.

Викладення матеріалу та результати. Вибірka – множина елементів $\{x_n\}$, які мають реальний зміст і які обрані у множину у результаті відбору їх із генеральної сукупності. Генеральна сукупність – абсолютно усі елементи певного класу, які мають конкретний реальний зміст і об'єднані у множину по спільній властивості.

У даній роботі вибіркою буде масив числових значень, які отримані у результаті вимірювання певної кількості деталей, які у свою чергу були вибрані для вимірювання навмання із партії деталей (генеральної сукупності). Обробивши цей масив даних методами математичної статистики та теорії імовірності можна буде робити висновки про усю генеральну сукупність (усі деталі партії). Це справедливо тому, що у машинобудуванні емпірично доведено, що розмір обробленої деталі – випадкова величина.

Розмах вибірки – різниця між максимальним і мінімальним значеннями вибірки.

$$R = x_{\max} - x_{\min} \quad (1)$$

Кожна вибірка має кінцеву кількість елементів N. У табличному процесорі кількість елементів можна порахувати використовуючи функцію

=СЧЁТ(перша_комірка_масиву:остання_комірка_масиву).

Середнє значення вибірки або математичне сподівання – середнє арифметичне усіх значень вибірки. У табличному процесорі можна порахувати використовуючи функцію

=СРЗНАЧ(перша_комірка_масиву:остання_комірка_масиву)

$$\bar{x} = \frac{\sum_{n=1}^N x_n}{N} \quad (2)$$

Середньо-квадратичне відхилення або стандартне відхилення σ – показник розсіювання випадкової величини від середнього значення вибірки. Для його обчислення існує функція =СТАНДОТКЛОН.В(перша_комірка_масиву;остання_комірка_масиву)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (x_n - \bar{x})^2}{N - 1}} \quad (3)$$

Дисперсія випадкової величини σ^2 – квадрат стандартного відхилення.

Відомо, що 0,9973 усіх значень вибірки вкладаються у діапазон значень $[\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma]$. Значення, які виходять за ці межі, є малоімовірними, а на практиці виявляються грубими помилками вимірювання або промахами вимірювання, тому такі значення слід відкинути із вибірки. У цьому полягає сенс правила трьох сигм.

Щоб побудувати найбільш інформативну діаграму емпіричної і теоретичної виборок також слід скористатися діапазоном $[\bar{x} - 3\sigma; \bar{x} + 3\sigma]$. Його треба розбити на інтервали. Кількість інтервалів слід обрати 5, 7 або 9, якщо кількість елементів вибірки у межах 50-200.

Частота – кількість повторів певної величини у вибірці. У даній роботі це – кількість елементів вибірки, які попадають у інтервал значень. Щоб автоматизувати процес підрахунку повторів існує функція

=ЧАСТОТА(1a_комірка_вибірки;остання_комірка_вибірки;
1a_комірка_max_значень_на_інтервалі;остання_комірка_max_значень_на_інтервалі)

Щоб табличний процесор при підрахунку частоти на певному інтервалі не враховував кількість елементів вибірки із попередніх інтервалів слід задати режим роботи функції ЧАСТОТА «у масиві». Для цього треба виділити стовбець, де повинні бути розраховані частоти і викликати функцію частота із панелі інструментів. Таким чином буде відкрито вікно функції частота, де можна ввести масив вибірки, масив верхніх значень на інтервалах. Щоб ЧАСТОТА спрацювала «у масиві» треба після заповнення полів натиснути Shift+Ctrl+Enter.

Відносна частота або частість – відношення частоти до кількості елементів вибірки. Для даної задачі вона слугує значенням функції емпіричного розподілу випадкових розмірів деталей.

$$f_{emn} = \frac{m}{N} \quad (4)$$

Функцію нормального розподілу Гауса (густину імовірності) і розподілу імовірності у математичній статистиці розраховують по формулам

$$f_{теор} = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}; \quad (5)$$

$$P_{теор} = \int_{-\infty}^x f_{теор} \cdot \quad (6)$$

У табличному процесорі для них існує функція НОРМ.РАСП. Вона має 4 параметри, останній із них означає густину імовірності – 1 (ІСТИНА) або розподіл імовірності – 0 (ХИБА):

=НОРМ.РАСП(поточне_значення_випадкової_величини; середнє_значення_вибірки; стандартне_відхилення_вибірки; 1_або_0)

У табличному процесорі існує функція без параметрів НД() і означає, що значення комірки недоступне. Її зручно використовувати у випадках при побудові діаграм по формулам, які в деяких випадках повертає помилку. Якщо з допомогою умовного оператора ЕСЛИ запрограмувати дії так, щоб у випадку помилки розрахунку комірки призначалося значення НД(), то це значення під час побудови діаграми буде ігноруватися. Такий прийом слід застосувати для побудови області допуску.

Для того, щоб перевірити, що емпіричний розподіл відповідає неперервному теоретичному розподілу розроблено багато критеріїв узгодження. Розглянемо два із них, які придатні для застосування у цій задачі.

Критерій Пірсона або критерій χ^2 – критерій узгодження, який можна застосувати до вибірок із $N \geq 100$. Критерій χ^2 – універсальний, бо може бути застосований до різних теоретичних розподілів і навіть при невідомих їх параметрах. Критерій χ^2 передбачає, що увесь розмах вибірки буде розбито на інтервали і будуть обчислені відносні частоти, тобто, що дані будуть групувані. Кількість інтервалів залежить від кількості елементів вибірки. Для $N = 100$ доречно утворювати 5, 7 або 9 інтервалів. Недоліком критерію є те, що інтервал, який отримує значення частоти менше 5, слід об'єднати із сусіднім інтервалом і розраховувати статистику Пірсона для об'єданого інтервалу. Якщо об'єднання не прийнятно у даному розрахунку, то можна вважати, що результат буде достатньо точний, якщо не більш як 20% інтервалів отримали значення частот від 1 до 5 включно.

Статистика Пірсона вибірки обчислюється по формулі

$$\chi^2 = N \cdot \sum_{i=1}^k \frac{(f_{emni} - f_{teopi})^2}{f_{teopi}}, \quad (7)$$

де N – кількість елементів у вибірці, f_{emni} – відносна частота на інтервалі, k – кількість інтервалів, f_{teopi} – теоретична імовірність попадання випадкової величини в інтервал. У табличному процесорі для цього розрахунку не існує функції. Це значення слід порівнювати із критичним значенням статистики Пірсона.

Критичне значення статистики Пірсона враховує степені свободи і рівень значимості

$$r = k - m - 1, \quad (8)$$

де k – кількість інтервалів, m – кількість оцінених у вибірці параметрів, $m = 2$ для нормального розподілу Гауса, а саме: середнє значення і середньо-квадратичне відхилення. α – рівень значимості (статистична значущість), який означає імовірність відхилити нульову гіпотезу, якщо насправді вона істинна (помилка першого роду). Мале значення рівня значимості знижує ризик зробити помилку першого роду, але приводить до ризику не відхилити хибну гіпотезу (помилка другого роду). Популярні рівні значимості 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,1.

Критичне значення статистики Пірсона $\chi^2_{\text{крит}}$ – таблична величина. У табличному процесорі її можна визначити використовуючи формулу

=ХИ2.ОБР.ПХ(рівень_значимості;степені_свободи)

Отримане значення слід порівняти із χ^2 , яке отримане по формулі (7). Якщо критичне значення більше, то нульова гіпотеза приймається і можна вважати, що вибірка відповідає нормальному розподілу випадкової величини. Інакше – відхиляється, а вибірка може пройти тести на відповідність іншим теоретичним розподілам.

Другий спосіб реалізувати перевірку по критерію χ^2 – розрахувати так зване p -значення використовавши формулу

=ХИ2.ТЕСТ(масив_емпіричних_частот;масив_теоретичних_частот)

Отримане p -значення слід порівняти із рівнем значимості α . Якщо p -значення більше, то нульова гіпотеза приймається і можна вважати, що вибірка відповідає нормальному розподілу випадкової величини. Інакше – відхиляється, а вибірка може пройти тести на відповідність іншим теоретичним розподілам.

p -значення також можна отримати по формулам:

=ХИ2.РАСП.ПХ(статистика_Пірсона;степені_свободи)

=1-ХИ2.РАСП(статистика_Пірсона;степені_свободи;ИСТИНА)

p -значення отримані усіма формулами будуть абсолютно однакові, якщо вибірка задовольняє усі вимоги до використання критерію χ^2 . Якщо ж у ході розрахунку було об'єднано/відкинуто інтервали із малим числом частот, то p -значення розраховане формулою ХИ2.ТЕСТ може відрізнятись від p -значення розрахованого формулою ХИ2.РАСП.ПХ.

Критерій Колмогорова або Колмогорова-Смірнова можна використовувати для групуваних і негрупуваних даних. Статистикою Колмогорова є максимальне значення модулю різниці емпіричної і теоретичної відносної частоти

$$D = \max_{i=1}^k |f_{emni} - f_{теорі}|. \quad (9)$$

Критичне значення статистики Колмогорова для даної вибірки

$$D_{крит} = \frac{\lambda_{\alpha}}{\sqrt{N}}, \quad (10)$$

де λ_{α} – табличне критичне значення статистики у залежності від рівня значимості α , деякі із них наведені у табл. 1. Значення λ_{α} відсутні у табличному процесорі, тому вибір їх слід організувати самостійно із допомогою функції ЕСЛИ.

Критичне значення статистики Колмогорова для даної вибірки $D_{крит}$ слід порівняти із статистикою Колмогорова D . Якщо $D_{крит}$ більше, то нульова гіпотеза приймається і можна вважати, що вибірка відповідає нормальному розподілу випадкової величини. Інакше – відхиляється, а вибірка може пройти тести на відповідність іншим теоретичним розподілам.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Засобами табличного процесору створено універсальний шаблон для статистичної обробки 100 розмірів навмання вибраних деталей, яка вимагає введення вибірки, максимального граничного розміру, мінімального граничного розміру. Таблиця автоматично перераховує статистику, будує гістограму емпіричної вибірки, графік теоретичного розподілу Гауса, область допуску (рис. 1), перевіряє вибірку по критерію Пірсона та Колмогорова.

Таблиця 1
Критичні значення статистики Колмогорова
залежні від рівня значимості

Рівень значимості α	Критичні значення статистики Колмогорова λ_{α}
0,01	1,63
0,02	1,52
0,03	1,45
0,04	1,4
0,05	1,36
0,1	1,22

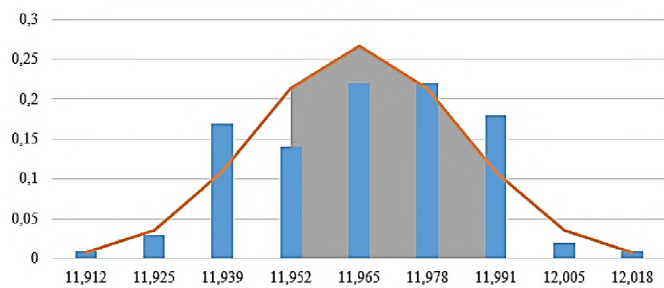


Рис. 1. Остаточний вигляд діаграми із емпіричним і теоретичним розподілом та областю допуску

У подальшій роботі заплановано доповнити розрахунковий шаблон обчисленням оптимального налаштування верстату із мінімізацією фінансових втрат на брак.

Список літератури

1. Пашинський В. Статистичні методи в інженерних дослідженнях. Навчальний посібник для здобувачів вищої освіти з інженерних спеціальностей. Кропивницький : ЦНТУ, 2020. 106 с.
2. Kravtsova D. Y., Rebrova S. V., Dubrovski S. S. Methodology and equipment for research of polymeric composite material on abrasive wear resistance. Journal of Kryvyi Rih National University. 2020. No. 50. P. 50–55 [doi: 10.31721/2306-5451-2020-1-50-50-55](https://doi.org/10.31721/2306-5451-2020-1-50-50-55)
3. Klyatsky V. I., Buhai L. A., Zaporozhets N. S. Experimental studies of process parameters of the fine cone crusher. Journal of Kryvyi Rih National University. 2021. No. 52. P. 82–85.
4. Maksymov S. V., Maksymova O. S. Repair cycles of dump trucks in terms of operation reliability. Journal of Kryvyi Rih National University. 2018. No. 47. P. 122–128
5. Алгоритм проєктування систем автоматичного управління точністю механічної обробки на верстатах з ЧПУ / Г. Грінченко та ін. Машинобудування. 2022. № 29. С. 50–61.
6. Технологічне забезпечення якості продукції машинобудування / Є. Фролов та ін. Полтава : ПолтНТУ, 2019. 204 с.
7. Оцінка довговічності металоконструкцій автотранспортних засобів / М. В. Бурак та ін. Вісник машинобудування та транспорту. 2022. № 1. С. 11–16.
8. Дослідження розсіювання величин подач токарних верстатів в імовірнісному аспекті / В. В. Крупа та ін. Вісник Херсонського національного технічного університету. 2023. № 4(83). С. 16–28.
9. Мигович А. В., Лапач С. М. Статистичні методи при дослідженні температурної деформації інструменту. Інновації молоді в машинобудуванні (Youth Innovations in Mechanical Engineering) : Зб. пр. Міжнар. науково-техн. конф. молодих вчен. та студентів №1, м. Київ. Київ, 2019. С. 320–326.
10. Мигович А. В., Лапач С. М. Деякі помилки в роботі Microsoft Excel. Інновації молоді в машинобудуванні (Youth Innovations in Mechanical Engineering) : Зб. пр. Міжнар. науково-техн. конф. молодих вчен. та студентів №2, м. Київ. Київ, 2020. С. 435–441.

Рукопис подано до редакції 05.04.2023

О.М.КОСТЯНСЬКИЙ, канд. техн. наук, НДГРІ, Криворізький національний університет
С.О. ЖУКОВ, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ВАНТАЖОПОТОКІВ НА ДПП КОНВЕЄРНИХ ПІДЙОМНИКІВ РОБОЧОЇ ЗОНИ ГЛИБОКИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ КАР'ЄРІВ

Мета даної роботи спрямована на підвищення завантаження дробильно-перевантажувального пункту автомобільно-конвеєрного транспорту при відкритому видобутку залізної руди шляхом управління формуванням рудопотоків. При цьому повнота завантаження дробильно-перевантажувальних пунктів має вирішальне значення для ефективної роботи всього транспортного комплексу.

Методи досліджень. В роботі використовувалися методи статистично-логічного, каузального і компаративного аналізу й узагальнень щодо визначення закономірностей розвитку кар'єрних рудопотоків та причинних зв'язків і параметричних залежностей в них з урахуванням найбільш впливових факторів на основі удосконалених аналітичних розрахунків, що дозволило обґрунтувати авторську інтерпретацію результатів. За допомогою методу моделювання вивчався процес формування вантажопотоків на дробильно-перевантажувальний пункт (ДПП).

Наукова новизна. При встановленні розрахункових рудопотоків на проєктований ДПП для обґрунтування раціональних границь групи уступів, що обслуговуються ним, використовується аналітична залежність розподілу обсягів руди, обумовлена глибиною закладення горизонту і показано взаємозв'язок між розташуванням видобувних уступів, їх кількістю та завантаженням обслуговуючого ДПП.

Практичне значення. З використанням встановлених залежностей визначено ступінь завантаження дробильно-перевантажувального пункту рудою, а також обсяг сформованого рудопотоку з групи уступів, закріплених за цим ДПП та відстань перевезення до ДПП руди за подальшого поглиблення залізрудного кар'єру.

Результати. З використанням отриманих залежностей легко визначити розрахункове завантаження ДПП рудою, орієнтовну відстань її перевезення до даного ДПП. Запропонований методичний підхід до формування вантажопотоків на наступний ДПП при поглибленні конвеєрного підйомника дозволить оцінити його завантаження та рекомендувати раціональні параметри вантажопотоків для конкретних умов у майбутній період роботи кар'єру.

Враховуючи тенденції щодо формування рудних вантажопотоків на глибоких горизонтах при наступному облаштуванні ДПП, може бути рекомендованим вибір дробарок менших типорозмірів, що дозволить підвищити їх завантаження та знизити висоту перепадів руди за подальшої розробки залізрудних покладів кар'єром.

Ключові слова: дробильно-перевантажувальний пункт, завантаження, розподіл руди по глибині кар'єру, керування рудопотоком.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. При постійному збільшенні глибини залізрудних кар'єрів посилюється їх головна проблема – транспортна, так як збільшення глибини розробок викликає зростання відстані перевезення, яка у поєднанні з іншими негативними факторами призводить до неминучого зростання собівартості руди, що видобувається.

Транспортні витрати у собівартості видобутку руди можуть сягати 50-55% і мають стійку тенденцію до збільшення зі зростанням глибини кар'єру. На великих кар'єрах більш високі техніко-економічні показники дозволяє отримати комбінований транспорт, завдяки тому, що кожен із видів транспорту, які входять до комбінації, експлуатується за найбільш вигідних для нього умов. У схемах циклічно-потокової технології (ЦПТ) для доставки корисних копалин на фабрику з глибоких горизонтів кар'єра з міцними скельними породами та рудами при вантажопотоках 10-20 млн т і вище найбільшого розповсюдження набув автомобільно-конвеєрний транспорт (АКТ), конкурентоздатність якого зростає зі збільшенням площі і глибини кар'єру.

При цьому на формування внутрішньокар'єрних вантажопотоків значний вплив має розподіл руди в просторі кар'єру. Цей фактор необхідно по-новому враховувати під час планування продуктивності транспортних комплексів глибоких кар'єрів.

Аналіз досліджень і публікацій. Широкого застосування у теперішній час набула комбінація автомобільного та конвеєрного транспорту [1]. Досвід експлуатації транспортних схем із застосуванням ЦПТ на глибоких залізрудних кар'єрах показує, що ця технологія дозволяє скоротити кількість автосамоскидів, які обслуговують рудопотоки. При цьому, як правило, для транспортування конвеєром крупнокускової гірничої маси на перевантажувальних пунктах необхідно здійснювати її попереднє подрібнення [1]. Тому одним з головних елементів комплексу ЦПТ є дробильно-перевантажувальні пункти (ДПП).

У раніше виконаних дослідженнях [2-3] вирішувалися питання вдосконалення ЦПТ, досліджувався вплив спільної роботи кар'єрного автотранспорту та ДПП для встановлення раціональних параметрів ЦПТ методами імітаційного моделювання [4], зокрема – вплив обсягу бункера перед дробаркою крупного подрібнення на роботу рухомого складу автотранспорту.

Для дослідження зміни середньої відстані транспортування при місячному та тижневому плануванні роботи автотранспорту було побудовано імітаційну модель, що враховує розташування у просторі кар'єру екскаваторних блоків, та пунктів доставки гірничої маси, відстань транспортування гірничої маси [5].

Однак, задачу щодо визначення раціональної завантаженості ДПП неможливо вирішити, спираючись лише на розрахунок спільної роботи технологічного кар'єрного автотранспорту та ДПП для різних умов, можливих у період експлуатації розглянутого перевантажувального пункту. Для обґрунтованої відповіді на це питання потрібно враховувати розподіл за глибиною кар'єру обсягів гірничої маси, що транспортується з видобувних горизонтів на ДПП ЦПТ [6], оскільки від цих вантажопотоків залежить власне продуктивність ДПП.

Будь-яка оптимізація починається зі встановлення аналітичної залежності у розмірному вигляді. Подання завдання в обмеженому діапазоні зміни параметрів дозволяє вельми прості апроксимації вихідних зв'язків між гірничо-технологічними факторами [7,8]. При цьому етап спрощення полягає у заміні суворих параметричних функцій на апроксимації у вигляді алгебраїчних залежностей.

Постановка задачі. Для кар'єрів, що розробляють похилі та круті поклади з використанням транспортних комплексів з конвеєрними підйомниками з декількома ДПП, внаслідок збільшення висоти робочої зони часто виникає питання про повноту завантаження кожного ДПП та необхідність розподілу кар'єрних вантажопотоків між окремими ДПП. Істотно впливає на завантаження ДПП такий фактор, як відповідність обсягів гірничої маси, що транспортується, продуктивності ДПП.

Повнота завантаження кожного ДПП має суттєве значення для ефективної роботи всього комплексу АКТ, внаслідок значних обсягів (до 30 млн т) гірничої маси, що видається за допомогою комплексу на поверхню з робочих горизонтів кар'єру. Причому, вдосконалення роботи однієї ланки забезпечує покращення роботи всього комплексу АКТ.

Це диктує необхідність прогнозування розрахункової продуктивності кожного ДПП конвеєрного підйомника з урахуванням вантажопотоків з групи уступів, що ним обслуговуються, відокремлених умовними межами по висоті рудної робочої зони.

Параметри транспортних вантажопотоків АКТ визначаються кількістю обслуговуваних окремим ДПП горизонтів робочої зони (від чого залежить продуктивність ДПП), відстанню доставки вийнятої гірничої маси (руди) автотранспортом до ДПП, розміщенням за глибиною відносно ДПП груп рудних горизонтів, що ним обслуговуються та іншими параметрами, які в значній мірі впливають на продуктивність ДПП в комплексі АКТ, що конкретно актуалізує питання прогнозування завантаження ДПП. Його вирішення пов'язане з розподілом руди за глибиною кар'єру. Звернемо увагу й на те, що характер змін погоризонтних обсягів видобутої руди в залежності від глибини видобувного горизонту апроксимується алгебраїчною функцією. У поставленій задачі обмеженням є паспортна продуктивність дробарок ДПП.

Викладення матеріалу та результати. ДПП конвеєрного підйомника в кар'єрі може обслуговувати тільки певну кількість горизонтів рудної робочої зони. В цілому, слід прагнути до того, щоб обсяг видобутку руди з групи уступів, що обслуговуються даним ДПП, приблизно відповідав продуктивності його дробарки. При цьому, паспортна продуктивність дробарки ДПП не повинна бути меншою за обсяг вантажопотоку з групи уступів, яку обслуговує даний ДПП. Варіанти формування групи з уступів відрізняються між собою кількістю уступів, їх розташуванням відносно робочої зони кар'єру, сумарними обсягами руди вийнятої з горизонтів, що належать до даної групи, а також – відстанню її перевезення до ДПП і можуть порівнюватись за цими показниками.

Відстань перевезення руди автосамоскидами по транспортним комунікаціям з глибоких горизонтів кар'єру до ДПП залежить, як від розташування самого ДПП у просторі кар'єру, так і від розподілу обсягів руди відносно ДПП по глибині. Відстань перевезення руди до ДПП розраховується (за відсутності звітних даних) через середньозважену висоту її підйому від групи

уступів до ДПП, яка в свою чергу розраховується по прогнозованому розподілу видобутку руди з уступів, задіяних до транспортування з них руди на даний ДПП.

Для вирішення задачі встановлюється характер аналітичної залежності, що описує зміни обсягів видобутку руди залежно від глибини розташування горизонту її видобутку, та коефіцієнти рівняння.

Використовуючи досвід застосування апроксимації в гірничій справі [9], приймаємо, що апроксимуюча залежність, яка описує зміну величини обсягів V_i руди від глибини закладення горизонту x , має вигляд, тис. м³

$$V_i = a \cdot x^2 + b \cdot x + c, \quad (1)$$

де V_i – обсяг виїмки руди з i -горизонту, тис. м³; x – глибина закладення горизонту (порядковий номер уступу, рахуючи зверху вниз).

Визначимо невідомі коефіцієнти рівняння параболи, гілки якої спрямовані донизу, тобто $a < 0$, за такими даними: площа (S) параболи (рис. 1), обмежена точками перетину її дуги з віссю абсцис x_1 і x_2 , приймається чисельно рівною продуктивності кар'єру по руді. Різниця між точками перетину параболи із віссю абсцис, тобто проміжок $x_2 - x_1 = f$ приймається відповідно висоті рудної робочої зони кар'єру.

Таким чином, використовуючи відомі показники (S, f), встановимо для даної залежності коефіцієнти рівняння, за допомогою якого можна визначити прогнозований розподіл погоризонтних обсягів видобутку руди (рис. 1).

Одне з рівнянь може бути отримано як залежність, що визначає площу (S) параболи, яка утворюється кривою самої параболи, гілки якої спрямовані вниз, та віссю абсцис.

Рис. 1. Визначення коефіцієнтів рівняння, що описує прогнозований розподіл погоризонтних обсягів видобутку руди, залежно від глибини розташування горизонту

При цьому скористаємося роботами з геометрії, де, завдяки застосуванню теоретичних положень механіки до геометрії, визначено площу параболи [10-13].

Інше рівняння отримаємо, приймаючи, що довжину параболи отримано як різницю між абсцисами крайніх точок, тобто $x_2 - x_1 = f$ (рис. 1), яка відповідає різниці по глибині між першим і останнім (верхнім і нижнім) горизонтами рудної робочої зони (рахуючи кількість уступів) кар'єру. Таким чином, задавшись продуктивністю кар'єру (S), висотою рудної зони (f), згідно з [10-13] визначимо площу параболи, яка дорівнює

$$S = 2/3 \cdot (1/2 \cdot f \cdot H_B) = f \cdot abc/3, \quad (2)$$

де S – площа параболи, чисельно відповідна плановій продуктивності кар'єру по руді, тис. м³; $f = x_2 - x_1$ – висота рудної робочої зони (кількість уступів), $H_B = AK$ – висота трикутника, утвореного дотичними до крайніх точок параболи $C(x_1)$ і $D(x_2)$.

Відповідно до іншої аналогічної залежності [10-13], площа тієї ж частини параболи дорівнює,

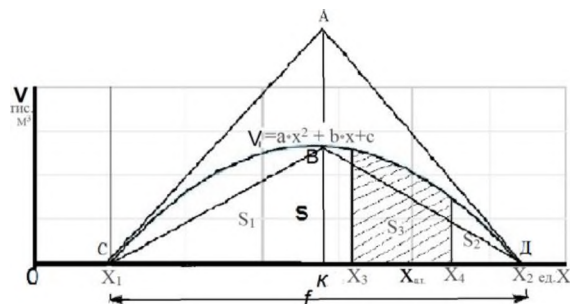
$$S = 4/3 \cdot (1/2 \cdot f \cdot H_m) = 2 \cdot f \cdot H_m/3, \quad (3)$$

де $H_m = BK$ – висота трикутника, вписаного в дугу параболи, вершина якого (точка B) одночасно є екстремумом функції $V_i = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$. Величину H_m можна визначити як $H_m = (c - b^2/4a)$. Тоді, з урахуванням значення H_m , площа S (рівняння 3) параболи (1) складе

$$S = 2/3 \cdot (c - \frac{b^2}{4a}) \cdot f \quad (4)$$

Для вирішення задачі встановлюється характер аналітичної залежності, що описує зміни обсягів видобутку руди залежно від глибини розташування горизонту її видобутку. Обидві формули (2) і (4) визначають одну й ту саму величину S – площу. Прирівнявши ці формули, отримаємо

$$1/3 \cdot f \cdot abc = 2/3 \cdot (c - b^2/4a) \cdot f \quad (5)$$



У точках перетину гілок параболи (див. рис.1) з віссю абсцис- x_1 і x_2 значення $V_i = ax^2 + bx + c = 0$. Розв'язавши рівняння, знайдемо x_1 та x_2 . Їхня різниця $(x_2 - x_1)$ дорівнює величині f (кількість уступів рудної робочої зони), тому маємо, одиниць

$$x_2 - x_1 = f = \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{a} \quad (6)$$

Отриманий вираз після зведення у квадрат підставляємо у формулу (4), звідки знаходимо коефіцієнт a

$$a = -\frac{6 \cdot S}{f^3} \quad (7)$$

Підставивши значення коефіцієнта a у формулу (2) знайдемо вирази, що визначають коефіцієнти b та c

$$c = -\frac{f^2}{2 \cdot b}; b = -\frac{f^2}{2 \cdot c} \quad (8)$$

Площа S параболи знаходиться через інтеграл

$$S = \int_{x_1}^{x_2} (a \cdot x^2 + b \cdot x + c) dx = \frac{a \cdot f^3}{3} + \frac{b \cdot f^2}{2} + c \cdot f \quad (9)$$

З формули (9) знаходимо коефіцієнт c і прирівнюємо його до раніше отриманого значення коефіцієнта з виразу (8). Підставивши в отриману формулу значення коефіцієнта a (7), отримаємо рівняння

$$f^2 \cdot b^2 - 6 \cdot S \cdot b - f^3 = 0 \quad (10)$$

Розв'язавши рівняння (10), знаходимо коефіцієнт b , після чого, підставивши у формулу (8) значення коефіцієнта b , визначимо коефіцієнт c

$$b = \frac{3 \cdot S + \sqrt{9 \cdot S^2 + f^5}}{f^2}; c = -\frac{f^4}{2 \cdot (3 \cdot S + \sqrt{9 \cdot S^2 + f^5})} \quad (11)$$

В результаті, знаючи коефіцієнти a, b, c , отримаємо рівняння, що описує розподіл погоризонтних обсягів руди (1) в залежності від глибини закладання горизонту x , тис. м³

$$V_i = -\frac{6 \cdot S}{f^3} x^2 + \frac{3 \cdot S + \sqrt{9 \cdot S^2 + f^5}}{f^2} x - \frac{f^4}{2 \cdot (3 \cdot S + \sqrt{9 \cdot S^2 + f^5})} \quad (12)$$

Отримана залежність дозволить спрогнозувати на розрахунковий період розподіл обсягів руди по глибині та на його основі визначити обсяг перероблюваної ДПП руди і відстань її доставки на ДПП автотранспортом.

Вплив на транспортні рудопотоки глибини видобувних горизонтів, з яких руда транспортується на ДПП в залізорудному кар'єрі, розглянуто на прикладі, наближеному до умов кар'єру ІнГЗК, з якого руда на поверхню доставляється із застосуванням ЦПТ: автомобільним транспортом – до ДПП на концентраційні горизонти: -60, -180, -240, -300 м, де відбувається крупне дроблення дробарками ККД 1500/180 [14]. Потім – подається підземними конвеєрними трактами «Західний» та «Східний» на збагачувальну фабрику. При цьому для розробки цілика під ДПП на гор.-240м, його заплановано демонтувати. Руда видобувається [14] на горизонтах в інтервалі від гор.-60 м до -420 м.

У черговому проекті [15] набула подальшого розвитку система ЦПТ: у даному проекті передбачався ДПП на горизонті -300 м з будівництвом далі ДПП на горизонті -360 м (рис.2), в результаті чого скоротиться відстань перевезення гірничої маси автосамоскидами на 10%, що дає змогу підприємству зменшити собівартість транспортування [16].

Досвід експлуатації більшості технологічних комплексів ЦПТ засвідчує наявність резервів ефективності їх використання. Як підтверджує виконаний аналіз [18], більшість дробильно-конвеєрних комплексів ЦПТ ГЗК працюють із завантаженням 70-85% від проектної потужності. Основні причини цього – значна віддаленість ділянки видобувної робочої зони, що обслуговується від концентраційних горизонтів.

Визначимо розрахункову відстань перевезення руди автотранспортом від видобувних горизонтів до задіяного ДПП за нескладною формулою: $L=k \cdot h/i \cdot 1000$, де: L – відстань перевезення руди автотранспортом, км; h – висота підйому руди автосамоскидами до ДПП; k – коефіцієнт розвитку траси; i – ухил шляху, тис.

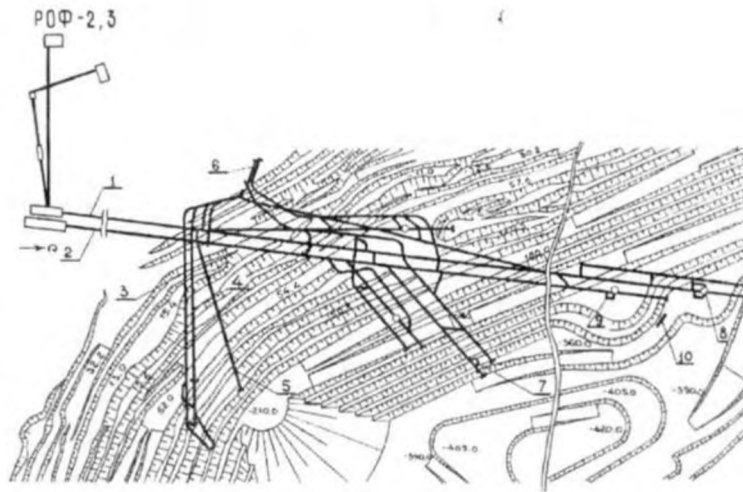


Рис.2. Схема розкриття кар'єру ІнГЗК похилими стволами, обладнаними конвеєрними підйомниками: 1, 2 – магістральні похилі стволи «Західний» і «Східний»; 3– вентиляційні штольні; 4 – конвеєрна штольня; 6 – ствол шахти "Вентиляційна"; 7, 8, 9 –дробильно-перевантажувальні пункти гор. -240 м, -360 м, -300 м [17]

Висоту підйому h руди до ДПП знаходимо як різницю відміток центрів мас- $x_{ц.т}$ групи уступів, що відпрацьовуватимуться на даний ДПП, і позначки x_3 – місця розташування самого ДПП, тобто $h=x_{ц.т}-x_3$, м.

Центр мас ($x_{ц.т}$) криволінійної ділянки (рис.1, заштрихована частина), обмеженої вищеведеним рівнянням $V_1=a \cdot x^2+b \cdot x+c$, віссю X і вертикальними лініями x_3, x_4 (відповідає групі уступів, руду з яких перероблятиме ДПП, розташований на уступі x_3), дорівнює: $x_{ц.т}=M_3/S_3$, де M_3 – статичний момент площі плоскої фігури S_3 , який знаходиться за формулою, м³

$$M_3 = \int_{x_3}^{x_4} x(a \cdot x^2 + b \cdot x + c) dx = -\frac{1.5S}{f^3} \cdot (x_4^4 - x_3^4) + \frac{3 \cdot S + \sqrt{9S^2 + f^5}}{3 \cdot f^2} (x_4^3 - x_3^3) - \frac{f^4}{4 \cdot (3S + \sqrt{9S^2 + f^5})} (x_4^2 - x_3^2) \quad (13)$$

Площа криволінійної ділянки (рис.1, заштрихована частина), що дорівнює об'єму видобутої руди з уступів, які обслуговуються даним ДПП, тис.м³

$$S_3 = \int_{x_3}^{x_4} (a \cdot x^2 + b \cdot x + c) dx \quad (14)$$

Підставивши M_3 і S_3 в формулу визначення положення центру мас ($x_{ц.т}$) ділянки, обмеженої координатами x_3, x_4 на осі X (рис.1), отримаємо, од.

$$x_{ц.т.} = \frac{\frac{a}{4} \cdot (x_4 + x_3) \cdot (x_4^2 + x_3^2) + \frac{b}{3} \cdot ((x_4 + x_3)^2 - x_4 \cdot x_3) + \frac{c}{2} \cdot (x_4 + x_3)}{\frac{a}{3} \cdot ((x_4 + x_3)^2 - x_4 \cdot x_3) + \frac{b}{2} \cdot (x_4 + x_3) + c} \quad (15)$$

Після підстановки виразів a, b і c у формулу (15), отримаємо, одиниці

$$x_{ц.т.} = \frac{-\frac{1.5 \cdot S}{f^3} \cdot (x_4 + x_3) \cdot (x_4^2 + x_3^2) + \frac{3 \cdot S + \sqrt{9 \cdot S^2 + f^5}}{3 \cdot f^2} \cdot ((x_4 + x_3)^2 - x_4 \cdot x_3) - \frac{f^4}{4 \cdot (3 \cdot S + \sqrt{9 \cdot S^2 + f^5})} \cdot (x_4 + x_3)}{-\frac{2 \cdot S}{f^3} \cdot ((x_4 + x_3)^2 - x_4 \cdot x_3) + \frac{3 \cdot S + \sqrt{9 \cdot S^2 + f^5}}{2 \cdot f^2} \cdot (x_4 + x_3) + \frac{f^4}{3 \cdot S + \sqrt{9 \cdot S^2 + f^5}}}$$

Обсяг руди, переробленої ДПП, що знаходиться на уступі x_3 , буде дорівнювати обсягу її видобутку на ділянці, обмеженій координатами x_3, x_4 (рис.1) $S_3=S-S_1-S_2$, де S – площа, утворена кривою параболи і віссю абсцис, обмежена точками x_1, x_2 ; S_1 – площа, утворена кривою параболи, віссю абсцис і вертикальними лініями x_1, x_3-1 ; S_2 –площа, утворена кривою параболи, віссю абсцис, вертикальною лінією x_4 і точкою x_2 . Визначимо площу ділянки S_3 як різницю площі S

та площ ділянок S_1, S_2 суміжних з ділянкою S_3 . Після перетворень отримаємо формулу, що визначає величину площі ділянки S_3 , яка дорівнює обсягу руди, видобутої на горизонтах, закріплених за ДПП, m^3

$$S_3 = \frac{a \cdot (x_4^3 - (x_3 - 1)^3)}{3} + \frac{b \cdot (x_4^2 - (x_3 - 1)^2)}{2} + c \cdot (x_4 - x_3 + 1) \quad (16)$$

Після підстановки a, b і c в рівняння (16), отримаємо, m^3

$$S_3 = \frac{2 \cdot S \cdot ((x_3 - 1)^3 - x_4^3)}{f^3} + \frac{(3 \cdot S + \sqrt{9 \cdot S^2 + f^5}) \cdot (x_4^2 - (x_3 - 1)^2)}{2 \cdot f^2} - \frac{f^4 \cdot (x_4 - x_3 + 1)}{2 \cdot (3 \cdot S + \sqrt{9 \cdot S^2 + f^5})} \quad (17)$$

Продуктивність комплексу ЦПТ становить $S=27$ млн т руди на рік [19] або 8060 тис. m^3 руди. Як приклад, визначимо для умов, наближених до кар'єру ІнГЗК, обсяг руди, що транспортується на ДПП, розташований на гор.-300м, з ділянки S_3 (рис. 1). Пронумеруємо горизонти зверху донизу, приймаючи за точку відліку гор.-60м зі зростанням нумерації до дна кар'єру, тобто до гор.-420м. При цьому ДПП – розташовано на 17-му уступі.

Знайдемо розрахунковий обсяг руди для ДПП, припускаючи, що він обслуговує групу уступів від гор. -300 м до -420м, що визначиться за формулою (17), тис. m^3

$$S_3 = \frac{2 \cdot 8060 \cdot ((17 - 1)^3 - 25^3)}{25^3} + \frac{(3 \cdot 8060 + \sqrt{9 \cdot 8060^2 + 25^5}) \cdot (25^2 - (17 - 1)^2)}{2 \cdot 25^2} - \frac{25^4 \cdot (25 - 17 + 1)}{2 \cdot (3 \cdot 8060 + \sqrt{9 \cdot 8060^2 + 25^5})} = 2405$$

За проектної потужності ДПП 18 млн т/рік, розрахункова завантаженість його при обслуговуванні згаданої групи уступів складе 40-50%. При недозавантаженні рудою ДПП, розташованого в нижній частині робочої зони, за доволі значний проміжок часу можливим буде збільшити його завантаження, збільшивши кількість уступів, що обслуговуються даним ДПП, але тоді зменшиться завантаження рудою ДПП суміжних зі згаданим, що свідчить про можливість оптимізації вантажопотоків.

Обчислимо центр мас- $x_{y.m.}$ плоскої фігури S_3 , що становить відповідно центр мас групи уступів, які відпрацьовуються на даний ДПП, при $f = 25$, $x_4 = 25$, $S = 8060$ тис. m^3 , один.

$$x_{y.m.} = \frac{-\frac{1,5 \cdot 8060}{25^3} \cdot (25 + 17) \cdot (25^2 + 17^2) + \frac{3 \cdot 8060 + \sqrt{9 \cdot 8060^2 + 25^5}}{3 \cdot 25^2} \cdot ((25 + 17)^2 - 25 \cdot 17) - \frac{25^4 \cdot (25 + 17)}{4 \cdot (3 \cdot 8060 + \sqrt{9 \cdot 8060^2 + 25^5})}}{-\frac{2 \cdot 8060}{25^3} \cdot ((25 + 17)^2 - 25 \cdot 17) + \frac{3 \cdot 8060 + \sqrt{9 \cdot 8060^2 + 25^5}}{2 \cdot 25^2} \cdot (25 + 17) + \frac{25^4}{3 \cdot 8060 + \sqrt{9 \cdot 8060^2 + 25^5}}} = 20,2$$

Відстань перевезення руди до ДПП автомобільним транспортом визначимо, як, км

$$L = \frac{k \cdot (x_{y.m.} - x_3) \cdot h_y}{i \cdot 1000} = \frac{1,05 \cdot (20 - 17) \cdot 15}{0,025 \cdot 1000} = 1,9,$$

де h_y – висота уступу ($h_y=15$ м), м.

Враховуючи вищевикладене, як альтернатива для підвищення завантаженості ДПП на нижніх горизонтах кар'єру, є можливим застосування дробарок меншого типорозміру, наприклад ККД–1200/150, з продуктивністю 680 m^3 /год. [20], що також дозволить зменшити висоту перепідйому руди.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Дослідження завантаження ДПП, а також зміни середньої відстані перевезення руди автотранспортом може бути здійснено за допомогою математичної моделі, що враховує функцію розподілу руди по глибині видобутку і слугуватиме для вивчення формування вантажопотоків на ДПП.

Для оцінки ефективності транспортування АКТ залізорудної сировини з кар'єру доцільним є аналіз прогнозованих вантажопотоків на ДПП АКТ. Хоча, аналітичний розрахунок вантажопотоків руди на ДПП є наближеним, він полегшить вирішення завдання з передпроектного визначення продуктивності чергового ДПП у майбутній період. В цьому зв'язку, при проектуванні чергового ДПП, розташованого на нижніх горизонтах кар'єру, з огляду на його завантаження, може бути застосована дробарка меншого типорозміру, наприклад ККД–1200/150 [20].

Використання встановлених залежностей допоможе обґрунтувати раціональний розподіл руди між окремими ДПП конвеєрного підйомника, якщо кількість ДПП – більша одиниці. При цьому оцінюється кількісно також розрахунковий вантажопотік та ступінь завантаження ДПП.

Запропонований підхід щодо визначення завантаженості ДПП враховує мінімальну кількість необхідних параметрів, що характеризують роботу ЦПТ по транспортуванню руди з робочих горизонтів на поверхню, та може застосовуватись при проектуванні АКТ на більшості залізрудних кар'єрів.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на виявлення закономірних зв'язків між різними техніко-економічними показниками ДПП конвеєрних трактів для вдосконалення оцінки довготривалих періодів їх експлуатації при плануванні наступних черг будівництва ДПП ЦПТ з урахуванням вантажопотоків, а також бажано більш детально обґрунтувати величину використаних в розрахунках коефіцієнтів.

Список літератури

1. **Фролов О.О.** Відкриті гірничі роботи: Ч. I. Процеси відкритих гірничих робіт [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності «Гірництво» / **О.О.Фролов, Т.В.Косенко**// Електронне мережне навчальне видання. КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ .- 2020. – 151 с.
2. **Kolonja B.** Simulation of in-pit crushing system using Auto Mod // **B.Kolonja, R. Stanic, J.Hamovic** 19th World Mining Congress, – New Delhi (India), 2003. – P. 517-531.
3. **Слободянюк В.К.** Особенности оптимизации технологических схем циклично-поточной технологии / **В.К. Слободянюк, И.И. Максимов** // Збірник наукових праць ННУ. – 2010. – № 34, Т. 2. – С. 42-53.
4. **Слободянюк В.К.** Исследование и обоснование рациональных параметров дробильно-перегрузочного пункта / **В.К. Слободянюк, О.Н. Гуренко, А.Л. Ромашков, Р.В. Слободянюк** // Збагачення корисних копалин. Кривий Ріг, - 2010. – Вип. 43(84).
5. **Пищик М.М.** Дослідження залежності відстані транспортування гірничої маси автосамоскидами від гірничо-технічних умов в кар'єрі / **М.М.Пищик, Р.В. Слободянюк**// «Розвиток промисловості та суспільства». Міжнародна науково-технічна конференція ДВНЗ «КНУ». Кривий Ріг.- 2017 р.- С.-6.
6. **Жуков С.О.** Прогнозування змін параметрів вантажопотоків ППП конвеєрних підйомників у наступному періоді їх експлуатації/ **С.О. Жуков, О.М. Костянський**// Вісник КНУ, Вип. 54, 2022 р., Кривий Ріг. С.121-126.
7. **Арсеньев А.Ю.** «Теория подобия в инженерных экономических расчетах». Недра, 1967. - 200 с.
8. **Сердюк Л.Л.** Теория розмірностей, подібності та математичне моделювання: навчальний посібник для студентів та аспірантів вищих навчальних закладів. ПНТУ, Полтава, 2008 – 160 с.
9. **Грищенко Н.В.** Сравнительный анализ методов аппроксимации/ **Н.В.Грищенко, С.А. Семериков, А.А. Харраджян, Е.В.Чернов**// Криворожский государственный педагогический институт. Кафедра информатики и прикладной математики. Друкарня СП Мира. Кривой Рог, 1998- 26 с.
10. **Dijksterhuis E.J. Archimedes.** — 1987. — ISBN 0-691-08421-1. Thomas L. Heath. The Works of Archimedes. — 2nd. — 2011. — ISBN 978-1-4637-4473-1
11. **Luciano Ancora.** Quadrature of the parabola with the square pyramidal number // Archimede. — 2014. — Т. 66, вып. 3.
12. **Архимед** Квадратура параболы. Париж, Les Belles Lettres, 1971 г. (ISBN 2-251-00025-9) - 189 с.
13. **Уоллис Джон**, Arithmetica infinitorum, предложения с XIX по XXIV. [Арифметика бесконечно малых (Источники и исследования по истории математики и физических наук)]// издание 2004 г. Издательство: Springer, - 226 с. Язык: Английский.
14. **Григорьев Ю.И.** Технические решения по отработке Ингулецкого месторождения карьером ЧАО «ИнГОК» в границах лицензионной площади/ **Ю.И. Григорьев, М.Д. Миронов, А.В. Дрок** // Геотехнічна механіка, 2016.- №129, С. 116- 121.
15. Комплексный проект поэтапного развития горных работ и переработки минерального сырья до конца отработки Ингулецкого месторождения. Поэтапное развитие горных работ и переработки магнетитовых руд., проект / ГП «ГПИ «Кривбасспроект»; ГИП **Н.В. Корчагин**. – Кривой Рог, 2006. – 63 с.
16. **Крамаренко О.** Новий тракт ЦПТ Ингулецкого ГЗК – один з наймасштабніших проектів за часи незалежності України // 02 вересня 2022 р. <http://krivbass.city/news/view/novij-trakt-tspt-inguletskogo-gzkodin-z-najmasshtabnishih-proektiv-za-chasi-nezalezhnosti-ukraini>. [Електронний ресурс].
17. Криворожский экономический институт (КНЭУ) им. В.Гетьмана. Раздел 3.4.doc Ленточные конвейеры и дробилки. <https://studfile.net/preview/9736700/> [Електронний ресурс]
18. **Федоренко С.О.** Аналіз технологічного потенціалу періодичних коливань продуктивності ЦПТ як резерву мультиструктурних вантажопотоків/ **С.О.Федоренко, С.О.Жуков, Ю.М.Навитний, С.В.Ткаличенко**// Вісник КНУ, Вип. 41, 2016 р., Кривий Ріг, Стр. 126-132.
19. **Валім Колисниченко**/ИнГОК направил \$45 млн на строительство комплекса ЦПТ в карьере. 15.06.2021 <https://gmk.center/news/ingok-napravil-45-mln-na-stroitelstvo-kompleksa-cpt-v-karere/> [Електронний ресурс].
20. Техническая характеристика конусных дробилок крупного дробления с гидравлическим регулированием щели. Информационный ресурс: msd.com.ua Мастерская Своего Дела. <https://msd.com.ua/mashinostroenie/tehnicheskaya-kharakteristika-konusnykh-drobilok-krupnogo-drobleniya-s-gidravlicheskim-regulirovaniem-shheli-29/> [Електронний ресурс]

Рукопис подано до редакції 14.04.2023

**ПИЛОПРИГНІЧЕННЯ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ ПРИ ПЕРЕВАНТАЖЕННІ ВУГІЛЛЯ
У ПАЛИВНО-ТРАНСПОРТНИХ ЦЕХАХ ТЕС**

Мета. Метою даної роботи є аналіз ефективності боротьби з вугільним пилом за допомогою піни для зниження пилового навантаження, яке шкодить здоров'ю працівників паливно-транспортних цехів теплових електростанцій. Транспортування вугілля конвеєрами та його перевантаження супроводжуються утворенням та поширенням вугільного пилу. Для попередження виділення вугільного пилу у приміщення паливно-транспортних цехів, джерела його утворення (вузли перевантаження) обладнують аспіраційними укриттями, повітря з яких спрямовується до очисних апаратів. Недосконалість монтажу аспіраційних укриттів або невірний підбір вентиляційно-очисного обладнання призводить до зниження їх ефективності погіршуючи умови праці працівників та підвищуючи небезпеку утворення вибухонебезпечних сумішей.

Методи дослідження. Проведено узагальнення та аналіз наукової літератури, свідоцтв і патентів на винаходи та корисні моделі щодо засобів боротьби з пиловиділенням на вузлах перевантаження вугілля.

Наукова новизна. Розглянуто можливості зниження пиловиділення при перевантаженні вугілля у паливно-транспортних цехах за рахунок використання повітряно-механічної піни.

Практична значимість. Результати проведеного аналізу показують, що для зниження виділення вугільного пилу у приміщеннях паливно-транспортних цехів теплових електростанцій під час перевантаження вугілля доцільно використовувати барботажні піногенератори, які дозволять забезпечити утворення необхідної для пилопригнічення кількості піни і стабільність зниження виділення вугільного пилу на перевантажувальних вузлах паливоподачі без постійного оперативного контролю з боку працівників станцій.

Результати. Проведені дослідження роботи аспіраційних систем перевантажувально-розвантажувальних ліній показали, що основними недоліками в проектуванні систем аспірації у приміщеннях паливно-транспортних цехів є заниження об'ємів аспіраційного повітря, непогодженість повузлових тисків у цих системах і відсутність запасу продуктивності вентиляторів на непродуктивні підсмоктування повітря. Використання піни є ефективним засобом зниження пиловиділення при перевантаженні вугілля, але застосування такого способу пилопригнічення без використання аспіраційних систем, які знижують тиск в укриттях вузлів перевантаження, погіршує його ефективність. Підвищення ефективності пилопригнічення можливе при використанні для пилоочищення апаратів, працюючих при невеликих швидкостях руху повітря. Ці заходи дозволять поліпшити умови праці працівників паливно-транспортних цехів теплових електростанцій.

Ключові слова: вугільний пил, аспіраційна система, пилопригнічення, перевантажувальний вузол, повітряно-механічна піна, піноутворювач, барботажний піногенератор.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Теплові електростанції (ТЕС) представляють собою складні енергогенеруючі комплекси, які складаються з будівель і споруд різного призначення, енергогенеруючого та іншого обладнання. Одним із основних структурних елементів є паливне господарство – паливно-транспортні цехи.

У паливно-транспортних цехах вугільних ТЕС використовують таке обладнання: устаткування для розморожування вугілля у зимовий період, вагоноперекидачі для розвантаження вугілля, дробарки, стрічкові конвеєри, аспіраційні та інші допоміжні системи, системи пилоприготування. Це обладнання використовується для підготовки (подрібнення, очищення від домішок тощо) і транспортування вугілля до котельного цеху або на вугільний склад.

Технологічний комплекс паливно-транспортного цеху працює таким чином. За допомогою вагоноперекидачів вугілля з вагонів надходить у бункери. З бункерів за допомогою стрічкових живильників вугілля пересипається на стрічкові конвеєри (транспортери), які спрямовують його до котлів або на склад. Оскільки лінія паливоподачі паливно-транспортного цеху має велику протяжність, конвеєри обладнано перевантажувальними вузлами з метою пересипання вугілля з одного транспортера на інший для його спрямування на подальшу переробку до технологічного устаткування. У дробарках дробильного корпусу вугілля подрібнюється до розмірів не більше 25 мм.

З метою попередження виділення вугільного пилу у приміщення паливно-транспортних цехів, яке має місце при перевантаженні вугілля (інтенсивність виділення пилу, в середньому, коливається у межах 40-125 мг/с і може сягати 500 мг/с), перевантажувальні вузли обладнують

аспіраційними укриттями. Через несвоєчасність заміни (регенерації) аспіраційних очисних установок, а також недостатній контроль герметичності аспіраційних укриттів, вугільний пил надходить у приміщення та транспортні галереї паливно-транспортних цехів погіршуючи умови праці працівників та підвищуючи небезпеку утворення вибухонебезпечних сумішей, що можуть стати причиною вибуху та пожежі.

Вдихання повітря, забрудненого вугільним пилом, спричинює у працівників захворювання на хронічний пиловий бронхіт та карбоконіоз – антракоз, який проявляється слабкістю, болем за грудиною, кашлем. Вугільний пил також може провокувати захворювання верхніх дихальних шляхів, очей і шкіри [1-3].

Вміст вугільного пилу в атмосфері робочої зони працівників паливно-транспортних цехів ТЕС регламентується Гігієнічними регламентами хімічних речовин у повітрі робочої зони, затвердженими наказом Міністерства охорони здоров'я України від 14.06.2020 р. № 1596.

Аналіз досліджень і публікацій. Питанню боротьби з вугільним пилом присвячено наукові роботи ряду вітчизняних та закордонних авторів, таких як В.Б. Гого, Б.А. Грядущий, Ю.Ф. Булгаков, А.Б. Качинський, Є.О. Яковлев, О.І. Лисенко, Є.О. Воробйов, Р.Н. Воег, D. Laurence, Jiuping Xu та ін. [4-11].

Для зменшення виділення та уловлення вугільного пилу різні автори рекомендують використовувати дисперговану воду [4-6], розчин лігносульфонатів [7], розчин вуглелужного реагенту [8], волоконні фільтри [9] та ін.

Постановка задачі. Багато робіт присвячено боротьбі з вугільним пилом при видобутку та транспортуванні вугілля, але до теперішнього часу не вирішене питання пилопригнічення та вловлення вугільного пилу під час перевантаження вугілля на лініях паливоподачі ТЕС для покращення умов праці працівників.

Викладення матеріалу та результати. Ефективність роботи аспіраційних систем паливно-транспортних цехів ТЕС залежить, у першу чергу, від ефективності уловлення пилу в пилоочисних апаратах та швидкості руху запиленого повітря у аспіраційних трубопроводах.

Очищення аспіраційного повітря може відбуватись в одну стадію, як правило у циклонах, або у дві стадії – у циклонах з доочищенням у скруберах. Теоретична ефективність пилоочищення циклона може сягати 80-90 %, а скрубєрів – 90-95, у реальних умовах паливно-транспортних цехів ТЕС ефективність роботи циклонів та скрубєрів значно нижче, наприклад, ефективність пилоочищення циклонів в умовах паливно-транспортного цеху ДТЕК «Криворізька ТЕС» АТ «ДТЕК Дніпроенерго» знаходиться у межах 42-76 % і в середньому не перевищує 55 %, ефективність пилоочищення скрубєрів ще нижче. Це пояснюється низькою швидкістю входу запиленого повітря у циклони через значний опір аспіраційних повітроводів, який зумовлений їх забиванням вугільним пилом. Підвищення ефективності уловлення пилу у пилоочисних апаратах можна досягти за рахунок запровадження засобів і заходів пилопригнічення вугільного пилу в аспіраційних укриттях для запобігання його відкладенню у аспіраційних повітроводах.

Цілодобовий режим роботи ліній паливоподачі паливно-транспортних цехів, відсутність постійних працівників поблизу перевантажувальних вузлів, наявність значної кількості місць інтенсивного пилоутворення висуває особливі вимоги до засобів пилопригнічення: ефективність і економічність, простота конструкції і управління, надійність в роботі.

Застосовування повітряно-механічної піни для пилопригнічення вугільного пилу на лініях паливоподачі має ряд переваг перед іншими засобами: зниження витрат рідини (ефективність пилопригнічення зростає в 2-2,5 рази при зниженні витрати води в 2-3 рази у порівнянні зі зрошенням), відсутність перезволоження вугілля, рівномірність покриття джерел пилоутворення, зниження вторинного пилоутворення та ін.

Повітряно-механічна піна являє собою комірчасто-плівкову систему, окремі бульбашки якої зв'язані між собою у загальну масу роздільними плівками, утворену шляхом змішування повітря з розчином піноутворювача. Вона має певну жорсткість і відноситься до колоїдних систем, які характеризуються гетерогенністю (багатофазністю) та агрегативною лабільністю (нестійкістю).

Піноутворювачами є поверхнево-активні речовини (ПАР), молекули яких складаються з довгої неполярної (гідрофобної) і короткої полярної (гідрофільної) частин. Гідрофільна частина молекули розчинена у воді, а гідрофобна повернена до повітря. Якщо повітряна бульбашка

знаходиться в розчині ПАР на її поверхні формується адсорбційний шар піноутворювача, гідрофобні (вуглеводні) частини молекули якого направлені всередину бульбашки, а гідрофільні частини повернені в бік водної фази. Поверхня розчину також вкрита шаром молекул піноутворювача, орієнтованим гідрофобною частиною до повітря, а гідрофільною – до розчину. Проходячи через поверхню розчину, повітряна бульбашка вкривається подвійним шаром орієнтованих молекул, між якими міститься розчин ПАР.

Розчин ПАР, який знаходиться в середній частині, поступово стікає, плівка тоншає, втрачаючи свою стійкість, і розривається. Зазвичай бульбашки у повітряно-механічній піні мають не сферичну форму, як у окремої бульбашки, а деформовану багатогранну внаслідок надлишку повітря і взаємного стискання.

Повітряно-механічна піна має значно більший об'єм, ніж розчин ПАР, з якого її отримано, і це співвідношення називається кратністю піни. Внаслідок цього при відносно невеликих витратах розчину піноутворювача збільшується поверхня взаємодії з пилом порівняно зі зрошенням дрібнодисперговою водою. Крім того, шар повітряно-механічної піни дозволяє ізолювати осередки пилоутворення та запобігти переходу вугільного пилу в зважений стан і поширенню в атмосфері паливно-транспортного цеху.

При контакті повітряно-механічної піни з пилинками вугілля відбувається їх змочування і адсорбція молекул ПАР на поверхні пилинок.

При нанесенні повітряно-механічної піни на вугільну масу відбувається її очищення від пилових часток за рахунок їх втягування всередину бульбашок піни. Це зумовлено процесами, які протікають у піні при її руйнуванні.

Оскільки вага пилинок вугілля розміром менше 100 мкм не перевищує $1 \cdot 10^{-8}$ Н, а їх адгезія до поверхні – не більше $0,2 \cdot 10^{-8}$ Н, можна зробити висновок, що сили, обумовлені розпадом бульбашок повітряно-механічної піни, значно перевищують сили адгезії і ваги пилинок, внаслідок чого вони можуть бути легко відірвані від шматків вугілля або поверхні технологічного обладнання і втягнуті всередину шару піни.

Отже, при пилопригніченні повітряно-механічною піною в порівнянні зі зрошенням дрібнодисперговою рідиною значно збільшується ймовірність проникнення вугільних пилинок в шар рідини, в результаті чого може підвищуватися ефект знепилювання.

Слід зазначити, що всмоктування вугільних частинок всередину повітряно-механічної піни посилюється при перемішуванні нижніх її шарів, які містять велику кількість часток вугілля, з верхніми шарами. При подачі повітряно-механічної піни в зону руйнування вугілля відбувається її інтенсивне перемішування, в результаті чого процес змочування і всмоктування вугільних пилинок поліпшується.

Для попередження винесення пластівців повітряно-механічної піни з-під аспіраційного укриття до аспіраційних повітроводів рекомендується, щоб швидкість потоку повітря, що надходить на пінний екран, не перевищувала 0,6-0,7 м/с.

Оптимальна кратність повітряно-механічної піни для пилопригнічення вугільного пилу на лініях паливopодачі паливно-транспортних цехів становить 80-200.

В Україні випускається велика кількість піноутворювачів, серед яких можна виділити такі: піноутворювач «Альпен» (ТОВ «Альхім») – водний розчин вуглеводневих аніонних ПАР зі стабілізуючими добавками; випускається для загального («Альпен АЕРО») та спеціального («Альпен АFFF», «Альпен-М») призначення, не шкідливий для навколишнього середовища, біологічно розкладається, малотоксичний, невибухонебезпечний;

піноутворювач «Софір» (ТОВ «Фірма «СОЮЗ, ЛТД») – піноутворювач для пилопригнічення вугільного, вуглепородного, залізородного, породного пилу; екологічно нешкідливий, нетоксичний, вибухо- та пожежобезпечний;

піноутворювач «Пірена» (НВП «Пірена») – випускається для загального («Пірена-1», «Пірена-2», «Пірена-3», «Пірена-4») та спеціального («Аfmer АFFF») призначення; не шкідливий для навколишнього середовища, біологічно м'який.

Для отримання повітряно-механічної піни різноманітними організаціями розроблено велику кількість піногенераторів, за допомогою яких її можна застосовувати як для гасіння пожеж, так і для пилопригнічення.

Повітряно-механічну піну можна отримати шляхом механічного перемішування розчину піноутворювача, збовтування, пропускання повітря через шар розчину піноутворювача, про-

давлювання піноутворювача через пористі перегородки за рахунок ежектування повітря струменем розчину або примусової його подачі в піногенератор.

Для пилопригнічення широко використовують піногенератори з отриманням повітряно-механічної піни на сітках (рис. 1).

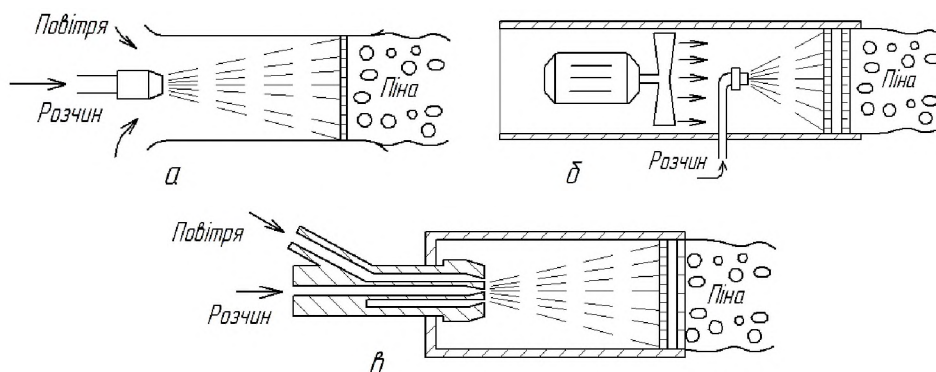


Рис. 1. Схеми сіткових піногенераторів

У цих піногенераторах повітря та піноутворювач подаються на сітку за рахунок ежекції повітря (рис. 1а), за допомогою вентилятора (рис. 1б) або за допомогою компресора (рис. 1в).

Отримана таким чином повітряно-механічна піна має відносно рівномірну структуру, а її кратність може бути змінена в широких межах (від 20 до 1000) за рахунок зміни співвідношення кількості повітря та піноутворювача, яке залежить, у першу чергу, від концентрації піноутворювача в розчині та розмірів вічка сітки.

Основною перевагою сітчастих піногенераторів з форсуночною подачею піноутворювача полягає в їх компактності. Недоліком таких піногенераторів є непостійність роботи, так як вона залежить від співвідношення кількості повітря та піноутворювача, їх фізичних параметрів (в'язкості, температури), розміру крапель піноутворювача, форми факелу розбризкування тощо.

У промислових умовах сталість цих факторів забезпечити складно і тому експлуатація таких піногенераторів потребує постійного нагляду і, відповідно, закріплення за ними постійних працівників (операторів).

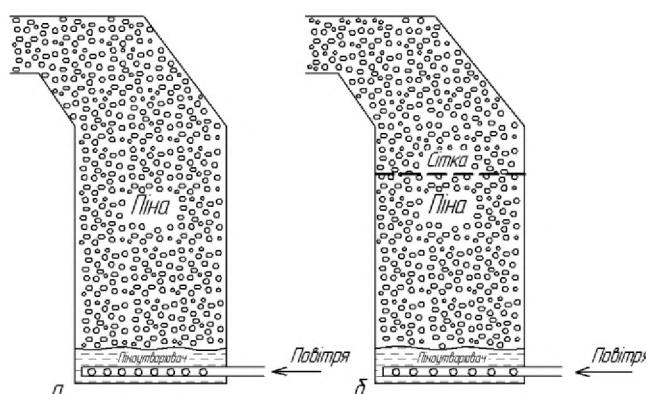
Оскільки у паливно-транспортних цехах велика кількість місць інтенсивного пилоутворення (вузлів перевантаження) і не має можливості закріплення постійних працівників (операторів), то використання сітчастих піногенераторів у таких умовах є недоцільним.

За таких умов доцільно використовувати барботажні піногенератори (рис. 2), у яких повітря пропускається крізь розчин піноутворювача. Вони поділяються на чисто барботажні та сітчасто-барботажні.

Рис. 2. Схеми барботажних піногенераторів

У чисто барботажних піногенераторах (рис. 2а) повітряно-механічна піна утворюється на поверхні розчину піноутворювача і далі пінопроводом спрямовується у потрібну точку.

У піногенераторах сітчасто-барботажного типу (рис. 2б) повітряно-механічна піна потрапляє на горизонтальну сітку, калібрується і далі надходить до пінопроводу.



Продуктивність утворення повітряно-механічної піни у барботажному піногенераторі може сягати до $7 \text{ м}^3/\text{хв.}$ з 1 м^2 площі барботування, а сітчасто-барботажного – до $26 \text{ м}^3/\text{хв.}$ з 1 м^2 площі барботування.

Недоліком барботажних піногенераторів є відносно невелика питома продуктивність у порівнянні з сітчастими при однаковій витраті повітряно-механічної піни. Перевагами таких піногенераторів є стабільність роботи, економічність та низька вірогідність відмов при експлуатації, що дозволяє використовувати дистанційне керування процесом пилопригнічення. Тому

барботажні піногенератори доцільно використовувати в умовах паливно-транспортних цехів ТЕС.

Загальна кількість повітряно-механічної піни, яку треба подавати на пилопригнічення, визначається з виразу

$$Q = Q_p + Q_n + Q_e,$$

де Q_p – кількість піни, яка мимовільно руйнується під час заповнення об'єму аспіраційного укриття, $\text{м}^3/\text{с}$; приймається 10 % від продуктивності піногенератора; Q_n – кількість піни, яка йде на вловлення пилу, $\text{м}^3/\text{с}$; Q_e – кількість піни, яка виноситься з укриття матеріалом, $\text{м}^3/\text{с}$.

Кількість піни, яка йде на вловлення пилу, можна визначити з виразу

$$Q_n = q \cdot S_n,$$

де q – питома витрата піноутворювача, $\text{м}^3/\text{м}^2$; S_n – середня питома поверхня часок пилу, $\text{м}^2/\text{с}$.

Кількість піни, яка виноситься з укриття матеріалом, можна визначити з виразу

$$Q_e = l \cdot h \cdot v,$$

де l – ширина покриття піною матеріалу на стрічці конвеєра, м; h – товщина покриття піни, м; v – швидкість руху стрічки конвеєра, м/с.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Досягти зниження запиленості повітря у паливно-транспортних цехах ТЕС і покращення умов праці працівників можна застосуванням повітряно-механічної піни для пилопригнічення в аспіраційних укриттях перевантажувальних вузлів:

для пилопригнічення можна застосовувати барботажні піногенератори, які дозволяють запровадити дистанційне керування процесом утворення повітряно-механічної піни. Продуктивності барботажного піногенератора цілком достатньо для пилопригнічення в таких умовах;

використання для пилопригнічення тільки повітряно-механічної піни без аспіраційних систем або інших пристроїв зниження тиску в укриттях перевантажувальних вузлів знижує пилопригнічення через значний винос піни з укриття;

для отримання повітряно-механічної піни можна використовувати піноутворювачі вітчизняного виробництва: «Альпен» (ТОВ «Альхім»), «Софір» (ТОВ «Фірма «СОЮЗ, ЛТД»), «Пірена» (НВП «Пірена»).

Список літератури

1. Костюк І.Ф. Професійні хвороби : підручник / І.Ф. Костюк, В.А. Капустник. – К. : Вид-во «Здоров'я», 2003. – 582 с.
2. Актуальні проблеми діагностики та лікування професійних захворювань : навч. посібн. для лікарів / за ред. проф. М.Г. Карнауха. – Кривий Ріг, 2009. – 128 с.
3. Кундієв Ю.І. Динаміка професійної захворюваності в Україні та досвід Інституту медицини праці НАМН України / Ю. І. Кундієв, А. М. Нагорна, М. П. Соколова, І. Г. Кононова // Український журнал з проблем медицини праці. – 2013. – № 4. – С. 11-22.
4. Гого В.Б. Інноваційні гідродинамічні засоби боротьби з пилом для сучасних гірничих комплексів / В.Б. Гого, В.О. Сироватченко, О.І. Михайлов, Р.В. Патокин // Форум гірників – 2018. – С. 257-263.
5. Горобей М.С. Теоретичні дослідження динаміки пилових потоків у гірничих виробках і розробка фізичної моделі взаємодії диспергованої води з завислим у повітрі карбоновмісним пилом // Геотехнічна механіка. – 2018. – № 141 – С. 184-189.
6. Горобей М.С. Розробка математичної моделі аеродинамічної взаємодії розпиленої води з частинками вугільного пилу / М.С. Горобей, Ю.Ф. Булгаков, І.А. Шайхлисламова, С.А. Алексеєнко // Розробка родовищ. – 2015. – Т. 9. – С. 443-449.
7. Воробйов Є.О. Вирішення питань техногенної безпеки при складуванні і транспортуванні вугілля / Є.О. Воробйов, О.В. Грабар, В.В. Лихачова, Д.О. Чекальов, К.О. Сухар // Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. – № 2. – С. 68-73.
8. Тищук В.Ю. Способи пилоподавлення при підготовці вугілля до коксування / В.Ю. Тищук, І.Б. Ковальова // Збірник наукових праць НГУ. – 2017. – № 52. – С. 376-382.
9. Тищук В.Ю. Розробка способу пилоуловлювання при сухому вивантаженні коксу з печі / В.Ю. Тищук, І.Б. Ковальова, М.В. Худик // Збірник наукових праць НГУ. – 2017. – № 52. – С. 382-389.
10. Emissions and human health impact of particulate matter from surface mining operation – A review AK Patra, S. Gautam, P. Kumar – Environmental Technology & Innovation, 2016 – P. 233-249.
11. Mamurekli D. Environmental impacts of coal mining and coal utilization in the UK // Acta Montanistica Slovaca, Ročník 15(2010), № 2, p. 134-144

Рукопис подано до редакції 15.04.2023

ПРО ЗАРУБІЖНИЙ ДОСВІД ГЕОДЕЗИЧНИХ РОБІТ

Мета. Сучасні вимоги із забезпечення потрібними даними органів державної влади та місцевого самоврядування, профільних підприємств, установ і організацій, а також громадян із метою регулювання земельних та інших відносин, дефініція розміру плати за землю і цінності земель у складі природних ресурсів, контролювання за застосуванням та охороною земель, економічного, екологічного мотивування бізнес-планів та хазяйських проєктів обумовили мету дослідження щодо аналізу практики організації геодезичних, картографічних робіт за кордоном на прикладі розгляду історії та теперішнього стану картографо-геодезичного забезпечення й проведення геодезичних робіт за кордоном, зокрема на території Сполучених Штатів Америки.

Методи дослідження. Поставлена мета та завдання дослідження дозволили використання загальнонаукових підходів, логічних законів формування висновків, професіональних методів пізнання. Під час виконання задач дослідження опиралися на світовий досвід застосування описового методу, порівняльно-історичного методу (компаративізму) на підставі комплексного та системного підходів. Інформаційною основою виконання роботи слугували збірники наукових праць, періодичні фахові видання, Інтернет-ресурси, нормативні документи.

Наукова новизна. Означено вибір результативних методів практики проведення геодезичних, картографічних і моніторингових робіт за кордоном на прикладі обговорення історії та сучасного стану картографо-геодезичного забезпечення, проведення геодезичних та інших спеціальних робіт на території Сполучених Штатів Америки.

Практична значимість. Позначається цільовою направленістю цього дослідження задля потреб спеціалістів геодезичної галузі та для землевпорядників і метою виконання результативної роботи щодо методів і способів збирання просторових даних, які можуть забезпечити оперативне автоматизоване отримання картографічної інформації з необхідною точністю і потрібним обсягом інформації як для потреб країни, так і зацікавлених користувачів.

Результати. У роботі досліджено історію та сьогодишній стан картографо-геодезичного забезпечення закордонної території, виконано розгляд практик виконання геодезичних і картографічних робіт Національною геодезичною службою NOAA (NGS) Сполучених Штатів Америки. Представлено правила проведення моніторингу та обстеження територій і споруд, описано правила проведення національної геодезичної й картографічної діяльності, які служать основою для прийняття управлінських рішень. Досліджено шляхи удосконалення інфраструктури просторових даних, яка є доступною для всіх користувачів на теренах Інтернету.

Ключові слова: геодезія, картографія, Сполучені Штати Америки, інфраструктура геопросторових даних, державна геодезична мережа, моніторинг

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Оскільки геодезичні, картографічні, землевпорядні роботи відносяться до робіт, що мають загальнодержавне значення і багатофункціональне призначення, то необхідно забезпечити їх перспективну ефективну організацію і відповідне достойне фінансування [5, 15]. Разом з тим, останнім часом спостерігається недостатня увага до науково-виробничого потенціалу, технологічного забезпечення та матеріально-технічної бази в Україні, хоча певні кроки у державі здійснено [16].

Забезпечення необхідною інформацією органів державної влади та органів місцевого самоврядування, зацікавлених підприємств, установ і організацій, а також громадян з метою регулювання земельних та інших відносин, визначення розміру плати за землю і цінності земель у складі природних ресурсів, контролю за використанням та охороною земель, економічного та екологічного обґрунтування бізнес-планів та господарських проєктів вимагає організації створення єдиної державної системи картографо-геодезичних робіт [7, 15]. Для цього необхідні високої якості картографо-геодезичні продукти, які б надавали перспективу достатньо повно і детально відобразити топографічну ситуацію, тобто потрібно відповідне картографо-геодезичне забезпечення виконання таких робіт, особливо в умовах воєнного стану.

Аналіз останніх публікацій. Функціонування картографо-геодезичних служб, перевірення та удосконалення геодезичних робіт висвітлено у працях науковців: М. Горковчука [3, 4, 13], Ю. Карпінського [6–12], А. Ляценка [6–13], А. Мартина [14], І. Тревого [16, 17], І. Юрченка [18] та ін. Концептуальні рішення оцінювання та забезпечення якості геопросторових даних показано в роботах Ю. Карпінського, А. Ляценка, М. Горковчука, особливості функціонування національної реєстраційної системи викладено у монографії А. Мартина. І. Юрченко дослідив діяльність державних агентств із управління земельними ресурсами країн Європи та України. У роботі [16], автори звернули увагу на відсутність науково-економічного обґрунтування допус-

тимой кількості втрат пунктів, а також на наявність пунктів, до яких немає доступу, та збільшення їх кількості у майбутньому. Розглянуто заходи щодо використання недоступних пунктів, що зумовлено збільшенням вагомості в суспільстві приватної власності на земельні ділянки. Розглянуто класифікацію, основні принципи створення і структури організації системи топографічного моніторингу місцевості як засобу актуалізації баз геопросторових даних у статтях [3, 4, 6–13], І. Тревого докладно виклав дослідження щодо стану і перспектив картографо-геодезичних робіт, використання кадастрової карти України [17].

Постановка задачі. Зрозуміло, що важливими задачами перспективного розвитку української геодезії, картографії та кадастру є розробка наукових основ системного картографування і картографічного моделювання, пошуки нових видів, типів карт, які глибоко і всесторонньо відображали б взаємозв'язки та динаміку природних і соціально-економічних явищ; розробка пакетів програм для автоматизованого створення інвентаризаційних карт на основі статистичних даних; широке використання матеріалів космічного знімання; формування нових напрямків тематичного картографування: еколого-географічного, медико-географічного, раціонального природокористування та видання карт, збільшення цифрових топографічних карт.

Прискоренню рішення проблем в умовах воєнного стану із створенню та поновленню топографічних карт і планів сприятиме вживання ГНСС та ГІС-технологій, ДДЗ [6, 7, 14]. Вживання відмінних систем координат, неоднакової системи розграфлення і номенклатури ускладнює їх розв'язання. Спільно з тим, сьогочасні технології, дослідження й застосування практики фахівців інших держав дасть перевагу реалізовувати усі дані процеси ефективно та раціонально [11, 18].

Мета. Розглянути досвід організації геодезичних, картографічних і моніторингових робіт за кордоном на прикладі розгляду історії та теперішнього стану їх здійснення на території США.

Виклад матеріалу і результати. Діяльність Національної геодезичної служби США NOAA полягає у визначенні, підтримці та наданні доступу до Національної системи просторових координат для задоволення економічних, соціальних та екологічних потреб Сполучених Штатів Америки [2].

Національна геодезична служба США (NGS) забезпечує основу для всієї діяльності з позиціонування в країні. Основні елементи: широта, довгота, висота над рівнем моря, інформація про берегову лінію та їх зміни з часом, сприяють прийняттю обґрунтованих рішень і впливають на широкий спектр важливих видів діяльності, щодо картографування, навігації, визначення ризику повеней, транспорту, землекористування та управління екосистемами. Авторитетні просторові дані, моделі та інструменти NGS є життєво важливими для захисту та управління природними і штучними ресурсами, а також для підтримки економічного процвітання, охорони навколишнього середовища країни.

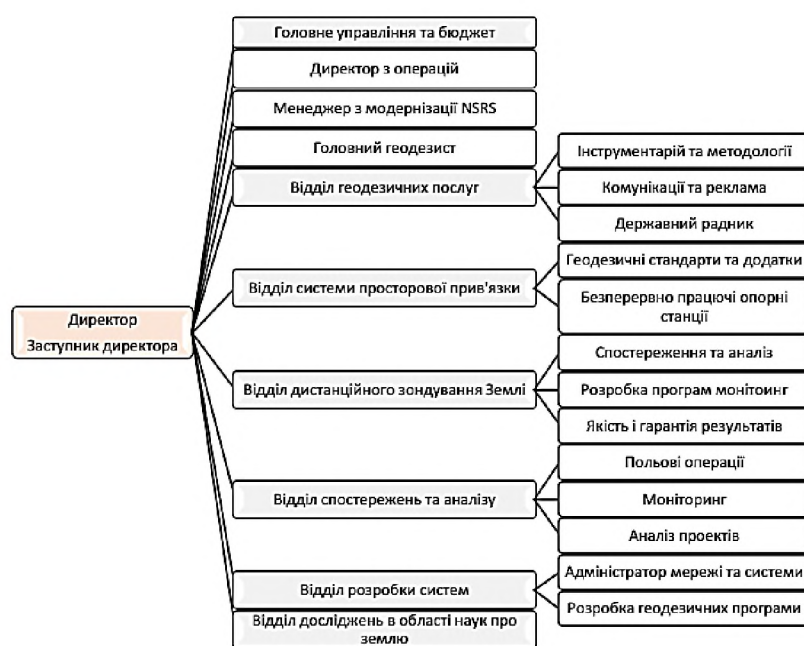


Рис. 1. Організаційна структура Національної геодезичної служби США

В NOAA простежується така структура: 1) Департамент: Міністерство торгівлі США; 2) Агентство: Національне управління океанічних і атмосферних досліджень; 3) Лінійний офіс NOAA: Національна служба океану (NOS); 4) Керівництво NGS та спеціалізовані департаменти. Організаційну структуру NGS показано на рис. 1.

У 2010 році NGS затвердила набір основних пріоритетів для діяльності,

а саме: орієнтація на клієнта, досконалість, повага, креативність і підзвітність.

Нижче наведено огляд основних проєктів та послуг NGS.

Національна геодезична служба NOAA (NGS) управляє мережею постійно діючих опорних станцій (CORS), які забезпечують дані глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS) для підтримки тривимірного позиціонування, метеорології, космічних і геофізичних досліджень на всій території Сполучених Штатів, окремих штатів і декількох зарубіжних країн. Мережа CORS – це багатопільове спільне підприємство, в якому беруть участь понад 200 урядових, академічних та приватних організацій. Партнери NGS підтримують мережу CORS, яка має понад 1200 станцій, що перебувають у державній власності та експлуатації.

Основною метою програми CORS є визначення та підтримка національної просторової інфраструктури NSRS. Програма CORS також: забезпечує вільний доступ до даних GNSS із мережі CORS, встановлює координати та швидкості станцій CORS щодо NSRS, позиціонує та рекламує Америку на майбутнє. Її використання дозволяє користувачам визначати положення на сантиметровому рівні щодо NSRS, одночасно обробляючи свої власні дані GNSS з використанням даних із мережі CORS; обчислює орбіти супутників GPS для підтримки спеціалізованих додатків для подальшої обробки, надає веб-сервіси для подальшого опрацювання даних ГНСС за допомогою системи онлайн-позиціонування служби користувача (OPUS), калібрує значення фазового центру антени GPS і надає рекомендації щодо експлуатації та використання активних геодезичних контрольних мереж.

NOAA керує національною програмою під назвою «Удосконалення висотної мережі», яка спрямована на встановлення точних і надійних висот із використанням ГНСС-технології в поєднанні з традиційним нівелюванням, гравіметрією і сучасною інформацією дистанційного зондування. Потреби та переваги точної висоти були спочатку обґрунтовані у національному дослідженні модернізації висот у доповіді Конгресу в 1998 році. Сьогодні роботи з модернізації висотних мереж здійснюються більш, ніж у десяти Штатах по всій країні, включаючи прибережні штати, схильні до сильних штормів, такі як Луїзіана в Мексиканській затоці і Північна Кароліна на узбережжі Атлантичного океану; а також у штатах, які відчувають коливання земної кори, такі як землетруси в Каліфорнії і післяльодовиковий підйом у Вісконсіні та на Великих озерах; і штати, де такі події, як повені на річках, і такі види діяльності, як точне землеробство, вимагають точного позиціонування.

Дана програма модернізації здійснюється на основі партнерських відносин із федеральними органами влади, органами влади штатів та місцевими органами влади, агентствами, академічними інститутами та професійними організаціями і адаптує програму до конкретних місцевих потреб. Ці точні, надійні та актуальні дані про висоту використовуються для широкого спектру заходів, включаючи управління будівельними та інфраструктурними проєктами, такими як мости, греблі та дамби; оповіщення фахівців із планування надзвичайних ситуацій про зміни висоти для маршрутів евакуації під час шторму, які повільно опускаються і схильні до затоплення; складання карт заплав для отримання точних даних, складання карт зон затоплення і визначення тарифів страхування від повеней; точного управління обладнанням, яке використовується в сільському господарстві, дорожньому будівництві та прибиранні снігу; моніторинг змін рівня моря; управління проєктами відновлення екосистем тощо.

Уточнення висотних координат дозволяє економити гроші, усуваючи непотрібні збори за сертифікат небезпеки повеней; рятує життя, допомагаючи літакам безпечно приземлятися в умовах поганої видимості; захищає навколишнє середовище, покращуючи можливості з моніторингу руху ґрунтових і поверхневих вод, тектонічних плит. NGS реалізує цю національну програму за трьома основними напрямками: надання доступу до Національної системи просторових даних, розробка моделей та інструментів та нарощування потенціалу місцевих користувачів щодо точного визначення висот; координує надання грантів місцевим організаціям, публікує та розповсюджує специфікації та посібники з польових досліджень та опрацювання даних; проводить форуми та семінари для виявлення місцевих потреб та навчання місцевих користувачів найефективнішим засобом задоволення цих потреб.

Національна геодезична служба NOAA (NGS) ініціювала і виконала в цілому 2021 році амбіційну програму уточнення вертикальних координат Сполучених Штатів. Проєкт називається Gravity for the Redefinition of the American Vertical Datum, або GRAV-D. Здійснення програми дозволило одержати нові вертикальні дані, засновані на гравітації із точністю ± 2 см на більшій

частині Сполучених Штатів. Відомо, що поточна вертикальна вихідна точка, NAVD 88, зміщена приблизно на 50 см із нахилом на 1 м по території Сполучених Штатів. Ортометричні висоти – на відміну від еліпсоїдальних висот, можуть бути використані для точного прогнозування потоку води, ризику зсуву та інших факторів, на які впливає гравітаційне поле Землі. В даний час глобальна система позиціонування забезпечує лише еліпсоїдальні висоти, але нові дані, отримані з GRAV-d, полегшують швидкий доступ до ортометричних висот. Проект GRAV-d приніс США соціально-економічні вигоди у розмірі 4,8 мільярда доларів.

GRAV-D складається з трьох основних етапів. По-перше отримують знімок гравітації з високою роздільною здатністю. Польоти по всій території США здійснювалися в наступному порядку: Пуерто-Ріко і Віргінські острови, Аляска, узбережжя Мексиканської затоки, Великі озера, східне і західне узбережжя континентальної частини Сполучених Штатів, Гавайї, американські території тихоокеанських островів і внутрішня частина континентальної частини країни.

По-друге, створюється монтаж карти із низькою роздільною здатністю про зміни гравітації. В першу чергу – наземні роботи, другий етап включає періодичні відвідування об'єктів для моніторингу змін гравітації з часом. Цей етап дозволяє проводити моделювання геоїду за часом – і, отже, моніторинг ортометричної висоти за часом – за допомогою технології глобальної навігаційної супутникової системи (GNSS). На цьому етапі широко відбувалися консультації з представниками наукової спільноти держави. По-третє: проект GRAV-D спрямований на співпрацю з місцевими партнерами (урядовими, комерційними та академічними), готовими підтримати аерофотозйомку, наземні дослідження або відстежувати локальні зміни гравітаційного поля.

Програма NGS Ecosystem and Climate Operations (ECO) адаптує технології геодезичної зйомки, прилади та процедури на сприяння стійкості прибережних громад, екосистемних послуг та екологічної цілісності, особливо при реагуванні на зміну клімату. ECO проводить спільні дослідження та розробки в декількох лінійних офісах NOAA, особливо в рамках традиційних навігаційних служб: Національної геодезичної служби, Центру оперативних океанографічних продуктів та послуг та управління берегової зйомки. ЕКО також допомагала керувати зусиллями NOAA щодо створення спостережних пунктів для моніторингу впливу зміни рівня моря та затоплення прибережних районів.

Також Національна геодезична служба проводить аеронавігаційні обстеження з 1920-х років, коли вона була відома як Берегова та геодезична служба США. Дані моніторингу надають інформацію про критичну злітно-посадкову смугу, перешкоди, навігаційні засоби та характеристики аеропорту, необхідні для безпечного польоту в аеропорти по всій країні (рис. 2).



Рис. 2. Фрагмент сторінки сайту NGS (ASP) [2]

Федеральна авіаційна адміністрація (FAA) використовує ці дані для розробки процедур підходу та вильоту повітряних об'єктів, визначення максимальної злітної ваги, оновлення авіаційних баз даних та публікацій, а також підготовки планів аеропортів та інженерних досліджень. NGS розробляє стандарти зйомки, керівні принципи, моделі та інструменти, призначені для надання допомоги геодезістам, які проводять аеронавігаційні зйомки. Щоб задовольнити останні вимоги, програма аеронавігаційної зйомки NGS (ASP) перейшла від проведення зйомок до забезпе-

печення гарантії якості та керівництва щодо проведення зйомок в аеропортах за контрактом зі спонсорами аеропортів на підтримку програми FAA Airports Surveying gis.

Хоча кількість аеронавігаційних зйомок NGS зменшується, досвід NGS значно розширюється. NGS використовує комбінацію власного фотограмметричного аналізу та методів польових досліджень, щоб забезпечити відповідність критично важливих даних щодо безпеки польотів нових технологій, таких як виявлення світла та дальності (lidar), аналіз супутникових знімків, які можуть бути використані для підтримки збору аеронавігаційної інформації.

NGS надає спрощений доступ до високоточних координат Національної системи просторових даних (NSRS) через веб-сервіс під назвою Online Positioning User Service (OPUS). Користу-

вач може відправити в OPUS файл даних GNSS, зібраних за допомогою приймача геодезичного класу, отримати координати NSRS по електронній пошті. OPUS – один із найпопулярніших геодезичних інструментів NGS. Щомісяця користувачі добровільно надсилають десятки тисяч файлів даних GNSS; кожен з них автоматично обробляється за допомогою стандартних даних NGS та моделей для обчислення точного місцезнаходження. OPUS вимагає мінімального введення даних від користувача та використовує програмне забезпечення, яке обчислює координати для мережі постійно працюючих опорних станцій NGS (CORS). Отримані координати точні та узгоджуються з даними інших користувачів Національної системи просторових даних. OPUS тепер надає спрощений метод публікації розташування об'єктів монументальної зйомки, таких як контрольні пункти припливів та інші місця зйомки. Ця нова опція OPUS дозволяє користувачам постійно ділитися своїм звітом про рішення через веб-сайт NGS. Функції, надані OPUS для обробки, зберігання та форматування, роблять результати вимірювань користувачів більш послідовними, надійними та доступними.

Спільно розроблений національною геодезичною службою NOAA, управлінням берегової зйомки та центром оперативних океанографічних продуктів та послуг vdatum.info@noaa.gov інструмент вертикального перетворення вихідних даних (VDatum), призначений для вертикального перетворення геопросторових даних із різних вихідних даних. Ця процедура дозволяє користувачам перетворювати свої дані з різних вертикальних прив'язок у загальну систему, забезпечуючи об'єднання різноманітних геопросторових даних, особливо в прибережних регіонах. В даний час VDatum підтримує вертикальні перетворення вихідних даних для розміщення в трьох категоріях: еліпсоїдальні: реалізуються за допомогою космічних систем, таких як GPS; ортометричний: визначається відносно геопотенціальної поверхні і одночасно реалізується за допомогою геодезичних контрольних точок; припливний: заснований на середній відмітці рівня води, розподіленої в часі. Програмний інструмент VDatum в даний час доступний тільки для окремих районів Сполучених Штатів і призначений для підтримки безлічі різноманітних додатків. Інструмент VDatum дозволяє перетворювати одну глибину/висоту або файл / файли точок із однієї системи висот в іншу. Незначеності, пов'язані з VDatum, в даний час надаються для інформування користувачів і надання допомоги в перетворенні висот серед різних підтримуваних вертикальних вихідних даних.

Щоб використовувати OPUS необхідно завантажити файл даних GNSS, результат обчислення надсилається електронною поштою. За бажанням користувача він також може бути опублікованим на веб-сайті NGS або додано до даних інших більших за обсягом проєктів. Рекомендовано записувати дані з інтервалом в 1, 2, 3, 5, 10, 15, або 30 секунд. Прийняті формати даних: для проєктів кінематичних (RTK) – GVX у реальному часі та вектори з подальшою обробкою RINEX 3, RINEX 2; формати UNIX, gzip, pkzip і Hatanak, які обробляються спільно з одним типом антени + висотою, введеною при завантаженні (рис. 4).

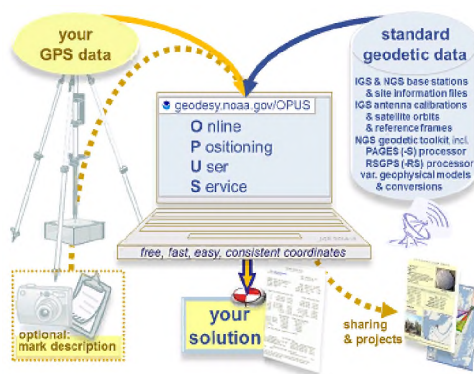


Рис. 3. 5 кроків процедури використання OPUS [2]

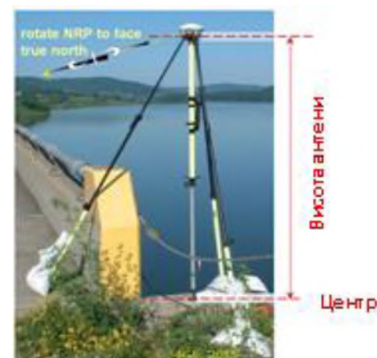


Рис. 4. Визначення висоти антени GPS-приймача

Залежно від тривалості файлу даних, OPUS використовує або статичну, або швидку статичну обробку. Статичні файли тривалістю від 2 до 48 годин обробляються за допомогою статичного програмного забезпечення PAGES. При цьому координати є середнім значенням трьох незалежних рішень із однією базовою лінією, кожне з яких обчислюється за допомогою вимірювань фази несучої частоти з подвійною різницею в одному з трьох суміжних пунктів CORS.

Rapid-Static файли із тривалістю від 15 хвилин до 2 годин обробляються за допомогою програмного забезпечення RSGPS rapid-static. Для швидкої статичної обробки існують більш жорсткі вимоги до безперервності даних та геометрії; у деяких віддалених районах країни OPUS-RS може не працювати. У нормальних умовах більшість визначень позиціонування можна обчислити з точністю до декількох сантиметрів. Однак оцінити точність для конкретного рішення складно, оскільки поширення формальних помилок, як відомо, оптимістично для швидкого знімання. Помилки користувача (наприклад, неправильне визначення антени або висоти ARP) не можуть бути виявлені. Локальна багатоприменевість або несприятливі атмосферні умови також можуть негативно вплинути на рішення. Для кожної координати (X, Y, Z, Φ , λ , h і H) для опрацювання статичних спостережень забезпечується діапазон із трьох окремих базових ліній, які можуть включати будь-яку помилку в координатах і базової станції. Під час опрацювання швидких знімків Rapid-Static найкращими оцінками помилок координат є стандартні відхилення, отримані при аналізі однієї базової лінії. Як показують експерименти [1], фактична похибка менша за ці розрахункові значення точності більш ніж у 95 відсотках випадків. Для покращення результатів OPUS рекомендується збільшувати час спостережень: довший сеанс надає OPUS кращу можливість точно виправити неоднозначності та зменшити помилку багатоприменевості. На рис. 5, 6 нижче показана кореляція між тривалістю сеансу та точністю. Зверніть увагу: цей показник є результатом опублікованого регіонального дослідження [1], і продуктивність OPUS також залежить від географічного розташування ділянки спостережень.

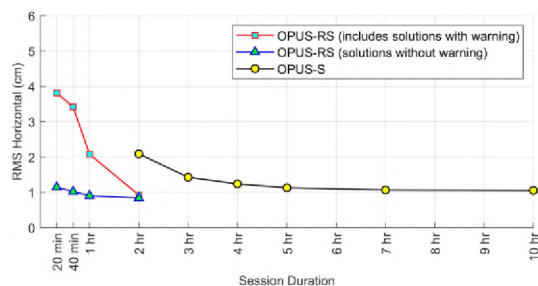


Рис. 5. Залежність точності в плані від тривалості сеансу

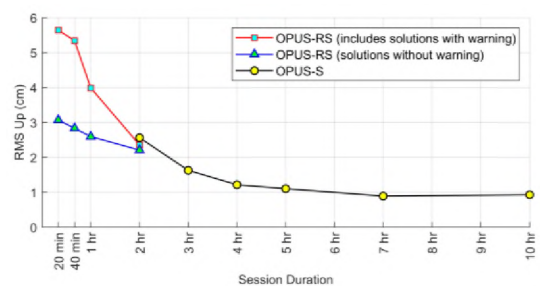


Рис. 6. Залежність точності по висоті від тривалості сеансу

Доступні два формати рішення: стандартне або розширене. У розширеній версії на додаток до інформації в стандартному рішенні надається більш детальна інформація про використані базові станції і статистику рішення. Отримані дані або рішення допомагають підтримувати локальні зв'язки з національною системою просторових даних (NSRS), є підґрунтям для підготовки до модернізації NSRS, для накопичення додаткових даних на контрольних точках GPS кампанії Transformation Tool (GPS на BM). Наприклад, отримані дані були основою для модернізації мереж із використанням нових даних про геопотенціал Північної Америки та Тихого океану 2022 року (NAPGD2022). Опрацювання результатів вимірювань дозволило створити Національну геодезичну карту NGS, що уявляє собою веб-картографічну програму ArcGIS Online, яка дає право користувачам переглядати безліч наборів даних, що надаються національними геодезичними дослідженнями (рис. 7).

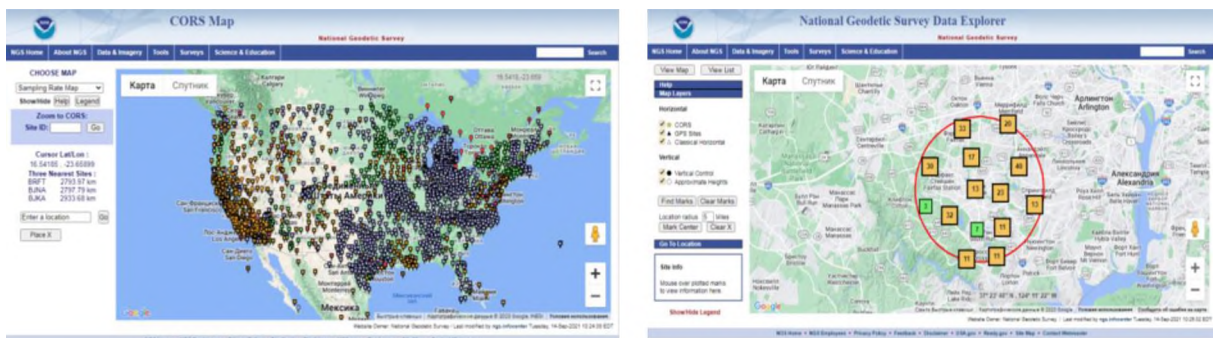


Рис. 7. Скріншоти екрана Національної геодезичної карти NGS [2]

Ця програма не тільки дозволяє користувачам відображати набори даних та взаємодіяти з об'єктами для перегляду атрибутів, але й надає безліч інших функцій, включаючи: інструмент пошуку, інструмент вимірювання, вибір базової карти, інструмент вибору та експорту об'єктів та таблиць атрибутів для перегляду і фільтрації атрибутів. Головне меню сторінки карти має такі набори даних: цільові сторінки NGS, таблиці даних NGS, загальні рішення OPUS, мережа CORS NOAA, сервіси функцій AGOL, загальні рішення OPUS, мережа CORS NOAA. Також веб-сторінка має інструкції та навчальні відео, які були створені, щоб допомогти користувачам дізнатися про всі функції, доступні в цьому новому додатку.

Особливу увагу CORS NOAA приділяє комплексному картографуванню океану та прибережних районів. Ця ініціатива NOAA підтримує план дій США щодо океану на основі прийнятого закону про картографування океану та прибережних районів 2009 року, який рекомендував NOAA очолити Міжвідомчий комітет з картографування океану та прибережних районів.

В останні роки дані про берегову лінію були отримані в цифровій формі. Багато старих друкованих рукописів берегової лінії також були переведені в цифрову форму, в основному в рамках проєктів, що здійснюються центром прибережних служб NOAA. Вважається, що ці цифрові набори даних мають цінність, яка виходить за рамки застосування до морських карт, особливо для тих користувачів, які проводять аналіз ГІС і створюють карти спеціального призначення, зокрема у прибережній зоні (рис. 8).

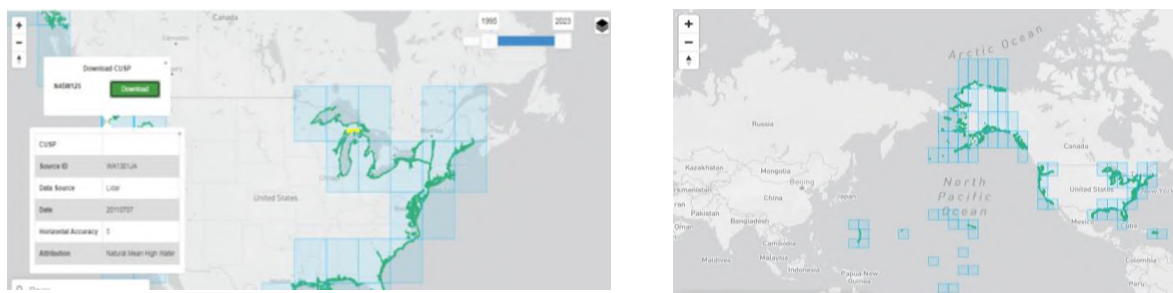


Рис. 8. Скріншоти сторінок бази даних берегової лінії

NGS надає інформацію про пункти національної геодезичної мережі (включаючи контрольні пункти) у текстових таблицях даних або у файлах форм ГІС. Таблиці даних можна переглядати в текстових редакторах або у вигляді текстових файлів он-лайн, використовуючи програмне забезпечення ГІС на інтерактивних картах. Є можливість збільшення масштабу для місця пошуку із контролем NGS Map, NGS Data Explorer або DS World.

NGS створює свою базу даних берегової лінії. Функції, доступні через це місце розташування, підтримують географічний перегляд бази даних, вибір проєктів, що представляють інтерес за обранням місця розташування чи іншими атрибутами, перегляд вибраних проєктів та завантаження вибраних проєктів на комп'ютер користувача. Історичні та сучасні векторні дані берегової лінії можна вільно завантажувати із сторінки даних берегової лінії NOAA.

Постійно виконуються дослідження на тему «Програма аналізу змін узбережжя та берегової лінії (CSCAP)», яке дозволяє аналізувати зміни берегової лінії в районах портів шляхом порівняння останніх комерційних супутникових знімків високої роздільної здатності з існуючими електронними навігаційними картами NOAA (ENCs). Шляхом цифрового накладення супутникових знімків на дані карти виявляються неточності у визначенні місця розташування та зміни берегової лінії і берегових об'єктів (пірси, пристані і т.д.), а виправлення та оновлення компілюються та відправляються для швидкого оновлення карт NOAA і ENC.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Вивчення й обмін досвідом із іншими країнами є одним із шляхів пошуку ефективних варіантів знаходження правильних рішень удосконалення геодезичних робіт України. Дослідження дозволили відзначити, що Національна геодезична служба, надає користувачам безкоштовні дані глобальної навігаційної супутникової системи, підтримуючи тривимірне позиціонування, метеорологію, космічну та геофізичні програми по всій території Сполучених Штатів. Практична значимість відзначається цільовим спрямуванням даного дослідження для потреб фахівців геодезичної галузі, для землевпорядників, для фахівців із організації ефективної роботи щодо методів та способів збирання просторових даних, які можуть забезпечити оперативне автоматизоване отримання картографічної інфо-

рмації з заданою точністю і необхідним обсягом інформації як для потреб країни, так і зацікавлених користувачів різних галузей.

Список літератури

1. Daniel T. Gillins. Evaluation of the Online Positioning User Service for Processing Static GPS Surveys: OPUS-Projects, OPUS-S, OPUS-Net, and OPUS-RS / Daniel T. Gillins, Darren Kerr, Brian Weaver // Journal of Surveying Engineering. – 145(3). [Електронний ресурс]. – 2019. – Режим доступу: <https://www.researchgate.net/publication/>.
2. National geodetic survey [Електронний ресурс]. – 2023. – Режим доступу: <https://geodesy.noaa.gov/>.
3. Горковчук, Д. В. Аналіз інтегрування геоінформаційних ресурсів систем просторового планування території в Європейську інфраструктуру геопросторових даних INSPIRE [Текст]: наук.-техн. зб. / Горковчук Д. В. // Містобудування та територіальне планування. – 2013. – № 50. – С. 118–125.
4. Горковчук, Д. В. Розроблення геоінформаційної моделі зонування міських територій для використання в системах містобудівного кадастру [Текст]: наук.-техн. зб. / Горковчук Д. В. // Scientific Journal «ScienceRise». – 2016. – № 12/2(29). – С. 11–18.
5. Земельний кодекс України [Електронний ресурс] // Верховна Рада України. – 2001. – Режим доступу: <https://goo.gl/jnT3A2>.
6. Карпінський Ю.О. Еталонна модель бази топографічних даних / Ю.О. Карпінський, А. А. Лященко, Р. В. Рунець // Вісник геодезії та картографії. – 2010. – № 2. – С. 28–36.
7. Карпінський Ю.О. Концептуальні засади оцінювання та забезпечення якості геопросторових даних / Ю.О. Карпінський, А.А. Лященко, М.В. Горковчук // Вісник геодезії та картографії. – 2012. – № 4. – С. 33–42.
8. Карпінський Ю.О. Концептуальні засади створення національної інфраструктури геопросторових даних України / Ю.О. Карпінський, А.А. Лященко // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2005. – С. 295–301.
9. Карпінський Ю.О. Концептуальні засади створення системи державного топографічного моніторингу місцевості / Ю.О. Карпінський, А.А. Лященко, Т. М. Квартич // Вісник геодезії та картографії. – 2011. – № 3. – С. 27–31.
10. Карпінський Ю.О. Системотехнічні аспекти формування топологічного земельно-кадастрового покриття / Ю.О. Карпінський // Вісник геодезії та картографії. – 2015. – № 5. – С. 62–68.
11. Карпінський Ю.О. Склад і принципи розроблення національного профілю стандартів з географічної інформації / Ю. О. Карпінський, А. А. Лященко, Окада Ясуюкі // Інженерна геодезія. – 2016. – Вип. 63. – С. 110–121.
12. Карпінський Ю.О. Уніфікація структури, правил кодування та цифрового опису векторних моделей у базах топографічних даних / Ю.О. Карпінський, А. А. Лященко, Р. В. Рунець // Вісник геодезії та картографії. – 2010. – № 5. – С. 35–41.
13. Лященко А. А. Принципи цифрового подання та організації зберігання містобудівної документації в геоінформаційній системі містобудівного кадастру / А. А. Лященко, Д. В. Горковчук, Ю. С. Максимова, М.М. Шматько // Вісник геодезії та картографії. – 2015. – № 4. – С. 31–37.
14. Мартин А.Г. Формування кадастрово-реєстраційної системи в Україні: моногр. / А.Г. Мартин, О.В. Тищенко. – К.: Медінформ, 2015. – 580 с.
15. Постанова КМ «Про Державну службу України з питань геодезії, картографії та кадастру» [Електронний ресурс] Кабінет Міністрів України. – 2015. – Режим доступу: <https://goo.gl/r6XdTk>.
16. Тревого І. Аналіз сучасного стану ДГМ України / І. Тревого, Є. Ільків, М. Галярник // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2019. – Вип. 2. – С. 54–60.
17. Тревого І. Стан і перспективи використання кадастрової карти України / І. Тревого, Ю. Карпінський // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2013. – Вип. 2. – С. 137–147.
18. Юрченко І.В. Управління земельними ресурсами в контексті реалізації земельно-кадастрової політики Європейського Союзу / І.В. Юрченко // Економіка агропромислового комплексу. – К., 2017. – № 9. – С. 63–66.

Рукопис подано до редакції 16.04.2023

УДК 622.1:622.271.3

А.В. ПЕРЕМЕТЧИК, канд. техн. наук, доц.,
С.О. ФЕДОРЕНКО, Т.О. ПОДОЙНІЦИНА, старші викладачі
Криворізький національний університет

ГЕОМЕТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ЯКОСТІ ЗАЛІЗНИХ РУД

Мета. Розробка методики геометризації та якісних показників залізрудних родовищ для побудови такої гірничо-геометричної моделі родовища, яка давала б можливість описати закономірності розміщення найважливіших якісних показників у просторі для того, щоб спрогнозувати їх зміну в процесі розвитку гірничих робіт.

Методи дослідження. Застосовано комплексний метод досліджень, що включає проведення теоретичних дос-

ліджень, лабораторні та промислові експерименти. Рівняння геохімічного поля і випадкового геохімічного поля реалізуються на основі використання аналітичних методів прогнозування, що самоорганізуються. Графоаналітична модель родовища будується з допомогою геостатистичних методів.

Наукова новизна. Описано методику прогнозування, на основі методів, що самоорганізуються, ефективно реалізує рівняння математичної моделі багатовимірного випадкового геохімічного поля. Описано розроблений авторами багатовимірний евристичний алгоритм прогнозування, який використовує поліном довільного ступеня, що дозволяє описати будь-яку функціональну залежність. Показано, що як математичний опис елементів прогнозованого гірського масиву доцільно приймати систему рівнянь багатовимірного випадкового геохімічного поля.

Практичне значення. Розроблено гірничо-геометричний метод прогнозування якісних показників залізрудних покладів, що дозволяє вирішувати завдання перспективного та поточного планування за результатами, отриманими під час геометризації. Особливо важливим аспектом геометризації родовищ залізрудних корисних копалин є гірничо-геометричне прогнозування їх якісних показників для вирішення завдань перспективного та поточного планування для того, щоб налагодити з максимальною ефективністю роботу гірничодобувного підприємства в режимі усереднення якості руди та підвищити раціоналізацію освоєння родовища.

Результати. Запропоновано вирішення актуального наукового завдання, що полягає у розробці гірничо-геометричного методу прогнозування якісних показників залізрудних родовищ, заснованого на математичній моделі багатовимірного випадкового геохімічного поля, яка реалізована на основі раніше існуючих та розроблених методів, що самоорганізуються. Визначено, що на родовищах Кривбасу метод крайінгу є найбільш прийнятним для оцінки та підвищення достовірності вихідної геологічної інформації, оскільки детальна геологічна розвідка проводиться за допомогою нерегулярної мережі свердловин.

Ключові слова: геометризація, гірничо-геометричні методи прогнозування, геостатистичні методи, крігінг, багатовимірне випадкове геохімічне поле, евристичні алгоритми прогнозування.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Сталий економічний розвиток на основі науково-технічних досягнень неможливий без подальшого розвитку гірничодобувної промисловості, що потребує розширення сировинної бази гірничодобувних підприємств, удосконалення технологій видобутку, обґрунтування методів видобутку, вибір раціональних технічних засобів гірничого виробництва. Це, у свою чергу, потребує вдосконалення наукових основ прогнозів та геологічної оцінки родовищ корисних копалин, підвищення повноти використання корисних копалин та застосування комплексного підходу. Для вирішення цих проблем необхідно створити моделі родовищ, які забезпечують достовірність гірничо-геологічних даних, отриманих геометричними методами.

Геометричні графіки, що відображають якість родовищ, дозволяють встановити певний зв'язок між компонентами корисної копалини, визначаючи таким чином розташування цих компонентів. Це має велике значення для проектування та експлуатації родовища. Такі графіки дозволяють планувати видобуток корисних копалин з певним складом, необхідним для їх видобутку та переробки.

Аналіз досліджень і публікацій. Сталий безпечний економічний розвиток, залежний від використання надр, потребує як поглиблення гірничих робіт, так промислова переробка руд з низьким вмістом заліза і складним мінеральним складом. Застосування технологічних схем і обладнання великої одиничної потужності призводить до збільшення кількісних і якісних втрат корисної складової, що впливає на переробку, і зниження якості концентрату через неефективну переробку, викликану нерівномірністю якості руди. Якісний склад руди найбільше впливає на вартість кінцевого продукту металургійної обробки. При цьому слід мати на увазі, що поліпшити техніко-економічні показники металургійної обробки можна за рахунок не тільки підвищення вмісту заліза, але й досягнення високого ступеня купажування руди на основі геометричної оцінки масиву.

Збільшення глибини розробки призводить до напружено-деформованого стану гірського масиву, а також до необхідності пошуку надійних матеріалів для кріплення гірничих виробок. Проблема стійкості та геометричного моніторингу гірського масиву набуває актуальності.

Особливо важливим аспектом застосування геометризації залізрудних родовищ є геометричне прогнозування їх якісних показників для вирішення завдань поточного та перспективного планування з метою забезпечення найефективнішої роботи гірничопромислового підприємства щодо змішування руд та підвищення раціоналізації розробки родовища. Також велике значення має проведення гірничих робіт з мінімальним впливом на навколишнє середовище та гірський масив. Цього можна досягти на основі чіткого розуміння властивостей порід і розподілу геологічних показників у масиві.

Постановка задачі. Гірничо-геометричні графіки розташування параметрів покладу широко використовуються при вирішенні широкого кола практичних завдань розвідки, проектування та експлуатації покладу, але в ряді випадків вони не відповідають практичним вимогам як за своєю точністю, так і за ефективністю використання геолого-розвідувальних даних. Велику роль тут відіграє низька якість оцінки геологічних даних у надрах. Достовірність оцінки геологічних даних в умовах високої мінливості розподілу показників у масиві можна підвищити за допомогою геостатистичних методів оцінки.

Багато методів геометризації засновані на спрощеному представленні математичної моделі геологічного положення у вигляді геохімічного поля і випадкового геохімічного поля. При цьому методи геометризації покладів, засновані на принципах самоорганізації, можуть найбільш повно описати моделі розміщення гірничо-геологічних параметрів у надрах. Такі моделі дозволяють описувати складні закономірності розташування показників, що дозволяє з високою точністю прогнозувати розташування геологічних показників у надрах і на цій основі планувати раціональну роботу гірничого підприємства. Розробці таких методів присвячено дану роботу.

Викладення матеріалу та результати. Авторами розроблено методологію геометризації залізородного родовища та прогнозування якісних показників його запасів на основі самоорганізованих алгоритмів.

Залежно від координат простору x, y, z і час t , закономірність розташування параметра P можна описати функцією загального типу (геохімічне поле П.К. Соболевського):

$$P = f(x, y, z, t). \quad (1)$$

Якщо розташування параметра $\varphi(P)$ є випадковим, математична модель його розташування може бути записана у вигляді випадкового геохімічного поля:

$$P = f(x, y, z, t) + \bar{\phi}(p), \quad (2)$$

де $\bar{\phi}(p) \{ \delta_x(p); \delta_y(p); \delta_z(p); \delta_t(p) \}$; $\delta_x(p), \delta_y(p), \delta_z(p), \delta_t(p)$ – дисперсії параметра в просторі та часі t .

Ці моделі, за допомогою яких було вирішено ряд основних теоретичних і практичних завдань, вже не можна вважати адекватними за складністю досліджуваним об'єктам. Таким чином, існуючі методи геометризації мають низку серйозних обмежень, які або неможливо подолати в принципі в рамках прикладних математичних моделей, або викликають великі теоретичні та практичні труднощі.

Крім того, переважно лінійна інтерполяція, яка використовується при побудові гірничих схем, може призвести до значних помилок параметрів у міжсвердловинному просторі. Застосування для цієї мети інших типів інтерполяції (квадратної, кубічної та ін.) не завжди дає хороші результати, оскільки немає надійних методик визначення типу інтерполяції, відповідного складності поверхні, що розглядається. Крім того, побудова моделей з нелінійною інтерполяцією дуже трудомістка.

Вищезазначене призводить до пошуку більш досконалої та складної моделі розташування параметрів та нових методів на її основі для вирішення широкого кола гірничо-геометричних задач. Моделлю такого типу є багатовимірне випадкове геохімічне поле. Ця модель є послідовною та логічно розвиває та уточнює наявні математичні моделі розташування.

Залізородні родовища Кривбасу мають дуже неоднорідну геологічну будову. Закономірності розташування показників багатогранні. Тому для їх опису за математичну модель приймається багатовимірне випадкове геохімічне поле:

$$P = f(\bar{p}) + \bar{\phi}(p), \quad (3)$$

де $\bar{p} \{ x, y, z, t, p_1, p_2, \dots, p_m \}$ та $\bar{\phi}(p) \{ \delta_x(p); \delta_y(p); \delta_z(p); \delta_t(p); \delta_{p1}; \delta_{p2}; \dots, \delta_{pm} \}$.

З рівняння (3) випливає, що значення геологічного параметра P складається з багатовимірного вектора $f(\bar{p})$ що описує схему розташування параметра в залежності від просторово-часових координат x, y, z, t та інші геологічні параметри $p_1; p_2; p_3; \dots; p_m$, а також багатовимірна дисперсія розташування $\bar{\phi}(p)$.

Практично побудова моделі (3) можлива з використанням принципів евристичної самоорганізації математичних моделей складних систем. Враховуючи обмежену кількість даних в окремих областях, груповий метод обробки даних (GMDH) є найбільш бажаною процедурою для прогнозування показника в межах їх меж.

Ідея GMDH полягає в тому, що математична модель складної системи будується поступово, в процесі так званого багаторівневого відбору. Перед побудовою моделі задається список можливих аргументів рівняння та елементів майбутнього рівняння (базова функція). Відповідно до алгоритму на основі запропонованих критеріїв відбору шляхом багаторазового пошуку будуються рівняння (підбираються їх змінні та коефіцієнти), які оптимально відповідають складності (варіативності) та ступеню вивченості модельованого об'єкта.

У процедурі GMDH всі вхідні дані

$$\{P_i\}_{i=1}^n; \{\bar{x}_j\}_{j=1}^n.$$

де P – прогнозований показник; $\bar{x} = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ – можливі аргументи рівнянь прогнозу; $i = 1, 2, \dots, n$ – показники P і $\bar{x}$ точки спостереження, поділяються на дві групи: навчальну $\{P_i\}_{i=1}^r$; $\{\bar{x}_j\}_{j=1}^r$ і контрольну $\{P_i\}_{i=1}^k$; $\{\bar{x}_j\}_{j=1}^k$, при цьому $r + k = n$.

На першому наборі точок будується рівняння (модель навчається), на другому, який є зовнішнім доповненням, контролюється якість отриманого рівняння, його прогнозні властивості.

Важливою особливістю GMDH є те, що повний багатовимірний опис природного об'єкта замінюється декількома шарами спеціально підібраних індивідуальних описів (базових функцій), складених для пар вхідних аргументів:

$$\begin{aligned} P &= a_0 + a_1 x_g + a_2 x_c; \\ P &= a_0 + a_1 x_g + a_2 x_c + a_3 x_g x_c; \\ P &= a_0 + a_1 x_g + a_2 x_c + a_3 x_g x_c + a_4 x_g^2 + a_5 x_c^2. \end{aligned} \quad (4)$$

Побудова математичної моделі починається з розрахунку методом найменших квадратів коефіцієнтів будь-якого з окремих описів у точках навчального набору:

$$P_1 = f_1^{(1)}(x_1, x_2); P_2 = f_2^{(1)}(x_1, x_2), P_s = f_s^{(1)}(x_{m-1}, x_m), \quad (5)$$

де $s = 1, 2, \dots, m$; (1) – номер шару виділення.

У контрольних точках, які не беруть участі в розрахунку коефіцієнтів цих моделей, їх якість перевіряється за критерієм середнього квадратичного відхилення виміряного від розрахованих за рівняннями (5) значень прогнозованого показника:

$$\bar{\delta}_k^{(1)} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \delta_i^2}; \delta_i = P_i - P_i^c. \quad (6)$$

Далі всі рівняння (5) ранжуються за критерієм (6), а найкращі з них (за мінімальними значеннями $\bar{\delta}_k$) приймаються як аргументи у рівняння (4) на другому шарі відбору моделі, після чого розраховуються коефіцієнти нових залежностей у точках навчальної множини:

$$y_1 = f_1^{(2)}(P_1, P_2); y_2 = f_2^{(2)}(P_1, P_3), \dots, y_V = f_V^{(2)}(P_{T-1}, P_T). \quad (7)$$

У точках контрольної множини, критерій $\bar{\delta}_k^{(2)}$ (6) обчислюється знову для кожного рівняння (7) і T найкращі рівняння ранжуються та відбираються відповідно до нього. Якщо $\bar{\delta}_{k_{\min}}^{(1)} > \bar{\delta}_{k_{\min}}^{(2)}$, необхідно перейти до третього шару виділення, де всі описані процедури повторюються. Модель будується до нерівності $\bar{\delta}_{k_{\min}}^{(j-1)} > \bar{\delta}_{k_{\min}}^{(j)}$.

Складність побудованого рівняння зростає від шару до шару відбору через збільшення кількості вхідних змінних та їх потужності. При застосуванні першого опису з рівнянь (4) збільшується лише кількість врахованих аргументів, при застосуванні другого та третього додатково враховується потужність.

Кожен окремий опис (4) є функцією двох змінних, що дозволяє будувати надійні залежності на невеликій кількості експериментальних точок (7-10 точок). Отримані описаним способом математичні моделі типу (3) є оптимальними як за складністю, так і за ступенем вивченості прогнозованого показника та пов'язаних із ним аргументів. З великої кількості аргументів системи «депозит» метод дозволяє вибрати лише ті, які дійсно пов'язані з прогнозованим показником, і встановити тип і силу цього зв'язку. Знайдене рівняння описує схему розташування прогнозованого показника. Значення (6) оцінює похибку передбачення цього рівняння і є багатовимірною дисперсією моделі.

Подальше моделювання родовища виконується за допомогою розробленого авторами багатовимірного евристичного алгоритму прогнозування (МНРА). Цей алгоритм з максимальною ефективністю реалізує рівняння математичної моделі багатовимірного випадкового геохімічного поля.

Ідея алгоритму полягає в знаходженні оптимального типу функції розташування показника, який дає мінімальне відхилення суми абсолютних значень розрахункових значень від фактичних

$$f_i = [c_i^p (a_{11}^p x_1^p + b_{11}^p x_1^p)^p \cdot (a_{12}^p x_2^p + b_{12}^p x_2^p)^p \dots (a_{1n}^p x_n^p + b_{1n}^p x_n^p)^p \cdot$$

$$\cdot (a_{21}^p x_1^p + b_{21}^p x_1^p)^p \cdot (a_{22}^p x_2^p + b_{22}^p x_2^p)^p \dots (a_{mn}^p x_n^p + b_{mn}^p x_n^p)^p],$$

$$F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = d_i^p [f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \dots$$

$$\dots + f_n(x_1, x_2, \dots, x_n)]^p + k^p,$$

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = g^p [F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + F_2(x_1, x_2, \dots, x_n) + \dots$$

$$\dots + F_n(x_1, x_2, \dots, x_n)]^p + h^p,$$

де a, b, c, d, k, h – числові коефіцієнти.

Функції (8) – (10) – це степені поліномів, коефіцієнти яких можуть мати як цілі, так і дробові чи від'ємні значення. Ступені, у свою чергу, можуть бути функціями того ж роду, що й весь многочлен. Збільшення порядку степенів або кількості змінних, які додаються до полінома, не обмежені.

Порядок застосування алгоритму наступний. На родовищі є сітка детальних розвідувальних свердловин. Необхідно знайти функціональну залежність між показниками якості, які визначаються свердловинами, і вмістом магнітного заліза в підірваній масі, а потім поширити її на необроблені ділянки покладу. У міжсвердловинному просторі значення, отримані з детальних розвідувальних свердловин, інтерполюються в точки з відомими значеннями магнітного заліза в підірваній масі та приймаються як аргументи. За поліноміальні аргументи доцільно прийняти показники із законом розподілу, подібним до того, що передбачається. В даному випадку це вміст загального та магнітного заліза в детально розвідувальних свердловинах. Відстані від точки до найближчої детально розвідувальної свердловини необхідно приймати як аргументи, оскільки точність інтерполяції зменшується зі збільшенням відстані від свердловини. Введення цих відстаней дозволяє покращити регулярність зміни точності та визначення поправок.

За критерій ефективності алгоритму приймається сукупність відхилень розрахункових абсолютних значень від фактичних у всіх точках покладу з відомими показниками якості. Індивідуальні відхилення вносяться в підсумок з вагою, обернено пропорційною відстані від даної точки до найближчої свердловини. Таким чином, більш точні результати побудови функції мають вищий пріоритет при оцінці якості побудованої прогностичної функції.

Алгоритм складається з кількох основних алгоритмів, таких як алгоритм подвійного збільшення (зменшення) числового коефіцієнта, заснований на збільшенні модуля коефіцієнта за аргументом до виконання умови оптимальності функцій (8) – (10), і модифікований напівінтервальний алгоритм, що покращує результати попереднього алгоритму. Робота обох алгоритмів, а також послідовність їх використання регулюється системою умовних переходів, яка дає можливість при зменшенні результатів знаходження числових коефіцієнтів прогностичної функції переходити до додавання нових коефіцієнтів, або до іншого методу пошуку оптимального виду вже наявних коефіцієнтів. У цьому алгоритмі змінюються числові коефіцієнти і фіксуються значення прогностичної функції спеціальним методом. За допомогою наведених вище алгоритмів

мів знову шукають числові коефіцієнти, починаючи з того, який дає найбільшу зміну прогностичної функції та показує найбільшу чутливість. Потім враховується коефіцієнт, який дає найменшу зміну та чутливість тощо. Якщо цей метод пошуку не дає позитивних результатів, розгляд починається з коефіцієнта, який дає найменшу зміну, коли його виключають. Таким чином, визначено оптимальний спосіб і напрямок пошуку типу прогностичної функції. Далі здійснюється перехід до алгоритму групування даних за значеннями відхилень та побудови локальних прогностичних функцій для окремих ділянок родовища за вищеписаними методиками.

При діленні на нуль або знаходженні парного кореня від'ємного значення, яке може зустрічатися в окремих точках відкладення, в алгоритмі умовно приймається будь-яке постійне значення, яке найкраще задовольняє критерію ефективності. Це дає можливість описати розривну функціональну залежність. Виходячи з природи полінома, можна описати будь-яку функціональну залежність.

Геометризація та моделювання показників якості родовищ корисних копалин базується на оцінці геологічних даних. У табл. 1 представлено порівняння найбільш часто використовуваних методів оцінки геологічних даних.

Таблиця 1

Порівняння методів оцінки якості руд надр

Розподіл компонентів у масиві	Похибка оцінки (%), отримана методами				
	середнє зважене арифметичне	вага обернено квадрату відстаней	анізотропія зважування та обліку	дискретний крігінг	універсальний крігінг
Fe_{mag}	12.1	11.8	11.5	9.6	8.3
Fe_{zag}	18.1	18.2	18.1	16.4	16.4
Si	8.5	8.6	8.4	8.5	—

Як видно з табл. 1, найбільш ефективними для оцінки геологічних даних є геостатистичні методи оцінки, у тому числі крігінг.

До переваг геостатистичних методів можна віднести чітку математичну формулювання; можливість аналітичної постановки розрахунків і високий ступінь їх уніфікації; при підрахунку запасів порівнюють середні значення показників з геометричною формою блоків та їх просторовим розташуванням, а також враховують анізотропію мінералізації.

Крігінг вирішує дві основні задачі: оцінку запасів руди і визначення точності цієї оцінки.

Середній вміст блоку визначається за формулою

$$z^* = \sum_{i=1}^n a_i \cdot z(x_i), \quad (11)$$

де $z(x_i)$ – вміст корисних компонентів у пробах, %; a_i – ваговий коефіцієнт (крігінг).

Коефіцієнт a визначається розв'язуванням системи рівнянь крігінгу. Значення a залежить від якісних характеристик мінливості вмісту в межах досліджуваного рудного тіла та до якого блоку належить. У цьому випадку основна мета полягає в тому, щоб знайти такі вагові коефіцієнти, які дозволяють найкраще оцінити зміст і найменшу помилку оцінки.

Існує кілька типів крігінгу, вибір якого залежить від даних геологічної розвідки та відбору проб, системи видобутку, розмірів оцінюваних блоків та їх геометричного розташування.

Таким чином, для обробки вхідних даних і результатів моделювання доцільно застосовувати геостатистичні методи.

Розроблена методика була застосована для оцінки Склевацького родовища Кривбасу.

На Склевацькому родовищі залізистих кварцитів залізистий горизонт PR_{1sx}^{4f} видобувається. Він включає сім геологічних підгоризонтів, продуктивна товща включає п'ять з них – $PR_{1sx}^{4f/2}$, $PR_{1sx}^{4f/3}$, $PR_{1sx}^{4f/4}$, $PR_{1sx}^{4f/5}$, $PR_{1sx}^{4f/6}$. Два підгоризонти $PR_{1sx}^{4f/1}$ і $PR_{1sx}^{4f/7}$ не видобуваються через високу неоднорідність порід.

На родовищі залізистих кварцитів існує тісний зв'язок між вмістом магнетиту у руді і виходом концентрату з руди і, в свою чергу, між загальним вмістом заліза і магнетитом. У більшості випадків відбирають проби на вміст загального та магнітного заліза. Тому необхідно знайти залежність між вмістом цих компонентів і технологічними параметрами руд, що видобуваються.

Виділено ділянки із закономірним характером мінливості середнього вмісту корисних компонентів. Кожній із виділених областей приписується загальне значення показника, що в ній

прогнозується. Цей показник приймається як залежність між магнітним залізом і виходом концентрату з руди. На цій основі виконується прогнозне гірничо-геометричне моделювання.

Мінливість геологічних даних, на яких базується прогноз, значною мірою залежить від розташування параметрів родовища. Варіабельність показника виявляється і вважається стандартною. Різні методи оцінки мінливості можуть дати неоднозначні результати. Якщо відстань між точками відбору перевищує критичний інтервал геологічної розвідки, геологорозвідувальна сітка вважається непридатною, оскільки не розкриває характер розташування показників у надрах. Це вимагає так званого згущення розвідувальної сітки, тобто додавання додаткових точок відбору проб, що є дорогим і не завжди можливим. Однак, можливо, метод оцінки геологорозвідувальної сітки не підходить для оцінки поточної сітки, оскільки закономірність розташування геологічних показників не узгоджується з оціночними можливостями цього методу. У зв'язку з цим виникає проблема вибору методу оцінки геологічної мережі.

Частку випадкової та регулярної мінливості на заданому інтервалі дослідження можна отримати зі співвідношення

$$\sigma_{\text{зак}}^2 = \sigma^2 - \sigma_n^2, \quad (12)$$

де σ^2 – стандарт; σ_n^2 – спостережувана мінливість.

Залежність оцінки спостережуваної мінливості від інтервалу вибірки та стандарту можна визначити з виразів

$$\sigma_n^2 = \frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} (u_{i+1} - u_i)^2; \quad (13)$$

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2, \quad (14)$$

де $\bar{u} = \frac{1}{n} \sum u_i$ – середнє арифметичне серій спостережень параметра; n – інтервал вибірки.

Для визначення радіуса автокореляції використовується автокореляційна функція, окремі значення якої розраховуються за формулою

$$\rho_x(l) = k(l) = \frac{1}{\sigma^2(N-k)} \sum_{i=1}^{N-k} (u_i - \bar{u})(u_{i+k} - \bar{u}), \quad (15).$$

де $\bar{u} = \frac{1}{n} \sum u_i$ – середнє арифметичне серії спостережень параметра; σ^2 – дисперсія цього ряду;

$k = 1, \dots, N-1$ – інтервал розвідки; N – загальна кількість кроків розвідувальної сітки по розрізу.

За методикою GMDH визначено основні закономірності розподілу геологічних показників у залізистих підгоризонтах родовища.

Підготовчі операції включають виділення геологічно однорідних ділянок для прогнозування, вибір змінної області, необхідної для рівняння прогнозу, і вибір точок наборів навчання та контролю.

Подальше моделювання родовища проводилося за допомогою розробленого авторами багатовимірної евристичного алгоритму прогнозування (МНРА). Проведено моделювання вмісту магнітного заліза в підірваному гірському масиві. Вміст магнітного заліза в свердловинах розвідувальної сітки брали як аргументи прогнозної функції. В результаті роботи алгоритму здійснено групування даних та виявлено функціональні залежності прогнозного вмісту $Fe_{\text{маг}}$ у підірваній масі.

Методами крігінгу створено графоаналітичну модель родовища з використанням знайдених прогностичних функцій (рис. 1, 2).

В результаті дослідження отримано прогноз просторового розміщення магнітного чавуну в підірваному масиві порід. Це найважливіший технологічний показник, від якого залежить стійка робота гірничого підприємства. Знання просторового розміщення цього показника дає можливість поточного та перспективного планування діяльності підприємства, вибору оптимальних параметрів гірничих робіт та підвищення ефективності видобутку корисних копалин.

Розроблена методика прогнозування впроваджена на кар'єрі ПівдГЗК і використовується для оцінки поточних і прогнозних запасів родовища та планування гірничих робіт у кар'єрі.

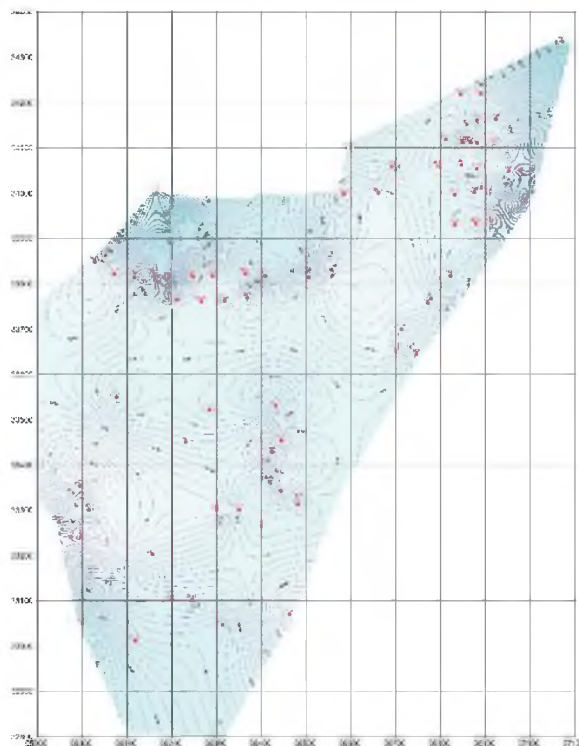


Рис. 1. Графоаналітична модель ізоліній прогнозного змісту Fe_{mag} у підірваному масиві кар'єру ПівдГЗК

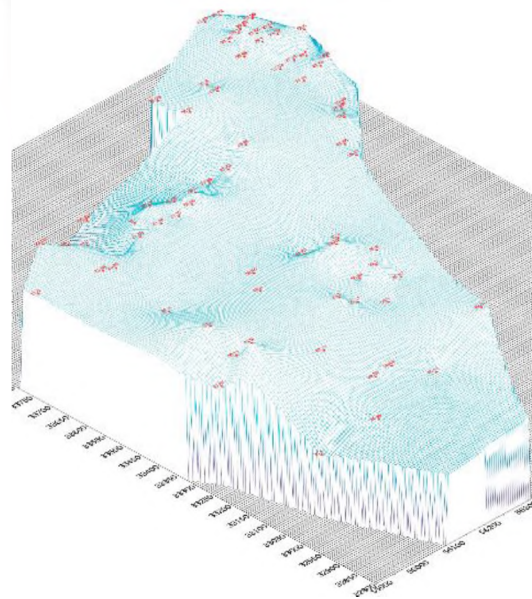


Рис. 2. Графічна візуальна модель прогнозу Fe_{mag} вміст у підірваній гірській масі кар'єру ПівдГЗК

Висновки та напрямок подальших досліджень. У статті показано вирішення актуальної науково-технічної проблеми геометризації якісних показників залізорудних родовищ. У результаті будується геометрична модель родовища, яка дає змогу описати закономірності просторового розміщення найважливіших якісних показників і прогнозувати їх зміну в процесі розробки гірничих робіт.

У статті показано, що рівняння випадкового геохімічного поля є найбільш придатними для опису характеру розташування показників якості родовищ із високою анізотропією геологічних характеристик. Ці рівняння можна розв'язати за допомогою самоорганізованих аналітичних методів прогнозування.

Розроблено гірничо-геометричний метод прогнозування якісних показників залізорудних родовищ на основі математичної моделі багатовимірного випадкового геохімічного поля, яка реалізована за допомогою самоорганізованих методів аналітичного прогнозування. Розроблено новий багатовимірний евристичний алгоритм прогнозування, який використовує поліном довільної потужності та дозволяє описувати будь-яку функціональну залежність. Визначено, що геостатистичні методи є найбільш придатними для оцінки та підвищення достовірності вхідних геологічних даних, оскільки детальна геологічна розвідка здійснюється за допомогою нерегулярної сітки свердловин.

В результаті геометризації покладу будується графоаналітична модель покладу. Це дає можливість геометричного прогнозування якісних показників родовища для вирішення завдань перспективного та поточного планування для забезпечення найбільш ефективної роботи гірничодобувного підприємства в частині змішування руд та підвищення раціоналізації розробки родовищ.

До найбільш перспективних напрямків геометризації якісних показників родовищ відносяться самоорганізовані методи прогнозування просторового розташування гірничо-геологічних показників родовищ у поєднанні з геостатистичними методами оцінки. Ці методи потребують подальшого розвитку та розширення сфери їх застосування.

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. Геоestatистические 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. Класифікація запасів та ресурсів корисних копалин Державного фонду. Затверджено постановою Кабінету Міністрів України №432 від 5.05.1997 р. – Київ: Державний комітет України при Міністерстві екології та природних ресурсів. – 1997.
7. Калинин В.М. Многомерная геометризация форм и качественных свойств месторождений // Маркшейдерское дело и геодезия. Межвузовский сборник. – 1979. – вып. 6. – с. 99-105.
8. Крамбейн У., Грейбилл Ф. Статистические модели в геологии. – М.: Мир. – 1969. – 400 с.
9. Крамбейн У., Кауфмен М., Мак-Кеммон Р. Модели геологических процессов – М.: Мир. – 1973. – 150 с.
10. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. – М.: Мир, 1982.
11. Методичний посібник з оцінки перспективних та прогнозних ресурсів твердих корисних копалин. – К.: УкрДГРІ. – 2010. – 25с.
12. Миллер Р.Л., Кан Дж. С. Статистический анализ в геологических науках. – М.: Мир. – 1965. – 482 с.
13. Низгурецкий З.Д. К приложению теории нестационарных случайных функций для оценки результатов геометризации месторождений. – Л.: изд. ВНИМИ. – 1974. – Сб. № 93. – С. 99-113.
14. 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.
15. 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.
16. Положення про порядок розробки та обґрунтування умов мінеральної сировини для розрахунку запасів твердих корисних копалин у надрах, затверджене наказом Державного комітету з мінеральних ресурсів від 07.12.2005 № 300.
17. 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.
18. Marechal, A., Serra, J. Random kriging // In: D.F. Merriam (Editor), Geostatistics. A Colloquium. Plenum Press, New York. 1970. P. 91-112.
19. Matheron, G. Kriging or polynomial interpolation procedures. – CIMM Trans., 70. 1967. P. 240-244.
20. Matheron, G. The intrinsic random functions and their applications. – Adv. Appl. Prob., 5. 1973. P. 439-468.
21. Pysmennyi, S., Peremetchyk, A., Chukharev, S., Fedorenko, S., Anastasov, D., & Tomiczek, K. (2022). The mining and geometrical methodology for estimating of mineral deposits. Paper presented at the IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1049(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1049/1/012029>
22. Peremetchyk, A., Kulikovska, O., Shvaher, N., Chukharev, S., Fedorenko, S., Moraru, R., & Panayotov, V. (2022). Predictive geometrization of grade indices of an iron-ore deposit. Mining of Mineral Deposits, 16(3), 67-77. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.067>

Рукопис подано до редакції 17.04.2023

УДК 624.042:624.044:624.071.32

В.І. АСТАХОВ, О.Ю. ЄРЬОМЕНКО, кандидати техн. наук, доценти

Криворізький національний університет

С.О. ВОЛКОВ, д-р філос. наук, керівник відділу загальнобудівельних робіт та генплану

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

ВИКОРИСТАННЯ КРИТЕРІЮ КРИТИЧНИХ РІВНІВ ВНУТРІШНЬОЇ ПОТЕНЦІЙНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЕФОРМАЦІЇ ТІЛА ПРИ ВИРІШЕННІ ЗАДАЧ БУДІВЕЛЬНОЇ МЕХАНІКИ

Мета. Розглянути методіку розв'язку задач будівельної механіки на основі критерію критичних рівнів енергії. На підставі розв'язку класичної задачі опору матеріалів визначити ефективність запропонованого методу розв'язку, виконати порівняння методіки розв'язку на основі критерію критичних рівнів енергії з традиційними методами.

Методи дослідження. Використано комплекс методів досліджень, який охоплює аналіз та узагальнення літературних джерел відповідно до мети роботи, формулювання концепцій та їх перевірка шляхом виконання практичних розрахунків.

Наукова новизна. Показано можливість дослідження процесів деформування конструкцій на основі поділу полів зовнішніх впливів і поля деформацій твердого деформованого тіла, як існуючих за власними законами. Введено поняття критичних рівнів енергії та показана періодична природа завдань про критичні рівні енергії та їх зв'язок зі станами самонапруги конструкцій. На прикладі розрахунку стержня на розтяг показана методика розрахунку конструкцій на критичних рівнях енергії, дано роз'яснення існуючих невідповідностей “класичної” теорії розрахунку та експериментальних даних.

Практична значимість. Гіпотеза про існування критичних рівнів потенційної деформації твердих деформованих тіл знайшла своє підтвердження як у теоретичному плані, так і реалізована у методиці вирішення практичних задач. Варіаційний критерій критичних рівнів енергії показав свою працездатність при вирішенні практичних задач. Критерій критичних рівнів енергії дає теоретично-математичну основу для формулювання завдань будівельної механіки з єдиних позицій у вигляді задачі на власні значення.

Результати. Критерій критичних рівнів енергії дозволив отримати нові результати, що уточнюють дані лінійної теорії розтягання стержневих конструкцій, а також показав свою ефективність порівняно з ітераційними процедурами геометрично нелінійних завдань. Внутрішня потенційна енергія має на критичних рівнях екстремальне значення та обмежена на області допустимих значень параметрів, що дозволяє ставити і вирішувати завдання граничного стану конструкції для будь-якої формулювання граничного стану у вигляді завдання на власні значення. Теорія критичних рівнів внутрішньої потенційної енергії деформованих тіл, дозволяє більш точно та ефективно вирішувати завдання оптимального проектування конструкцій.

Ключові слова: потенційна енергія, розрахунок, деформація, критичний рівень, розтягання, стержень.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Поява нових матеріалів та підвищення вимог до будівельних конструкцій потребує нових підходів до методик проектування та їх теоретичного обґрунтування. Незважаючи на високий рівень розробленості питань розрахунків конструкцій, існування програмних комплексів, що дозволяють вести розрахунки в будь-яких областях будівельного проектування, існують значні прогалини в розрахункових методиках і теоретичних побудовах. Так теорія граничних станів будівельних конструкцій поки що розвивається як ряд відокремлених теоретичних напрямів, які не мають єдиного теоретичного базису. Теорія прогресуючого руйнування представляє собою ряд практичних рекомендацій, що ґрунтуються на досвіді обстеження аварійних будівель.

Недостатня опрацьованість основних передумов теорії розрахунку конструкцій потребує їх уточнення та подальшого розвитку.

Аналіз досліджень і публікацій. Поняття критичного стану систем широко використовується в науці та техніці. Як правило, досягнення критичного стану означає, що параметри системи досягли своїх граничних значень, після перевищення яких, система або перестає існувати, або якісно змінює закономірності своєї поведінки.

Труднощі експериментального дослідження процесу руйнування змушують висувати гіпотези, які, пояснюють причини і механізм процесу, коли тверде деформоване тіло змінює свою поведінку під навантаженням. При цьому немає теорії, що дозволяє, не розбиваючи на стадії деформування матеріалу, описати процеси, які призводять до руйнації конструкцій. Відомі методики побудови варіаційних принципів описують процес деформування твердого тіла послідовно: у пружній, пластичній стадії деформування або руйнування тіла, де основою є екстремальні властивості енергії [1]– [4]. Очевидно, що це лише опис процесів деформування на деякій ділянці кривої стану рівноваги. При цьому деформування зразка конструкції та системи конструктивних елементів споруди йде за різними кривими стану рівноваги (законами деформування), що створює додаткові складності опису процесів граничних станів конструкції.

Основою погляду на процес втрати стійкості і втрати міцності, як двох сторін втрати конструкцією несучої здатності, є те що повна енергія системи на момент біфуркації стану має екстремальне значення. У теорії пружної стійкості відомі динамічний, енергетичний і статичний [5] критерії дослідження систем, схильних до біфуркації рівноважних станів. Найбільш повно описують процес втрати стійкості перші два, засновані на дослідженні варіацій Гамільтона та на повній енергії системи. Необхідною умовою є рівність нулю першої варіації повної енергії системи, що включає роботу внутрішніх та зовнішніх сил. Рівність нулю другої варіації дозволяє уточнити вид екстремуму і стан конструкції після проходження критичного рівня енергії [5, 6].

В будівельній механіці, як і в механіці твердого тіла, що деформується, спочатку була прийнята базова ідея про малість узагальнених переміщень конструкції, обумовлених деформаціями тіла. Тому протягом кількох століть розрахунки конструкцій велися за розрахунковою схемою, що не деформується. Продуктивність цієї ідеї полягала в тому, що всі закони та принципи механіки абсолютно твердого тіла можна було без особливих змін перенести на поведінку деформованих тіл [6–9]. Це дало значний прогрес у постановці завдань та побудові методів дослідження твердих деформованих тіл.

Проте вимога малості деформацій значно стримувала розвиток будівельної механіки при розрахунках конструкцій, що працюють при кінцевих значеннях деформацій і в непружній стадії деформування. З'явилися різні теорії нелінійної будівельної механіки, які і в даний час розвиваються у двох основних напрямках: урахування додаткових членів при розкладанні функції деформації в ряди, та покрокові та ітераційні процедури чисельних розрахунків конструкцій. І в тому, і в іншому випадку доводиться значні зусилля докладати, доводячи збіжність рішення для різних нелінійних завдань будівельної механіки [4].

Не зважаючи на значні успіхи механіки твердого тіла, що деформується, результатів, отриманих на основі вимоги стаціонарності повної енергії деформації тіла (задача Лагранжа)

$$\delta \Pi(\chi, \eta) = 0, \quad (1)$$

де області зміни зовнішніх $\eta \in \Omega_I$ та внутрішніх параметрів $\chi \in \Omega_I$, їх виявилися недостатньо для того, щоб зробити головні висновки про стан тіла, що деформується, яке знаходиться в рівновазі без порушення умов нерозривності деформацій і умов на поверхні тіла. Втрачено несучу здатність тілом чи ні, зруйнується чи ні, який залишковий ресурс несучої здатності і як дізнатись, наскільки його форма відповідає експлуатаційним вимогам? Цей і багато інших питань потребували введення гіпотез міцності, які висувують припущення про умови, за яких тіло зруйнується, або змінить свою поведінку (криву рівноважних станів). При цьому гіпотези міцності ніяк не пов'язані з перерахованими вище вимогами, означеними в (1). Внаслідок цього розрахункові процедури апіорі ставали ітераційними (метод проб та помилок) навіть у лінійній стадії деформування конструкції.

Відомо з експериментів, що на певних рівнях навантаження, або накопиченої внутрішньої енергії потенційної деформації, можлива стрибкоподібна зміна поведінки тіла, яку називають втратою міцності, стійкості та ін. Зважаючи на це можна говорити про існування критичних рівнів енергії та відповідних їм параметрів системи після перевищення яких якісно змінюється поведінка конструкції або змінюється розрахункова схема. Останнє визначається як зміна стану самонапруження [4]. Це може проявитися в якісній зміні форми або виду опору конструкції зовнішнім впливам. Наприклад, поздовжнє стиск стрижня змінюється поздовжнім згином, як це відбувається в теорії стійкості конструкції. При згинанні балки при граничних навантаженнях може утворитися пластичний шарнір, в результаті чого змінюється розрахункова схема.

В справедливості останніх тверджень можна переконатися розглянувши наступну задачу [4]. Нехай область існування функціоналу повної енергії деформації твердого тіла, що деформується Π можна розбити на області зовнішніх $\eta \in \Omega_I$ і внутрішніх параметрів $\chi \in \Omega_I$. Тоді згідно з принципом оптимальності Беллмана [10] екстремум вихідного функціоналу можна шукати як

$$\delta \Pi(\chi, \eta) = \delta \Pi(\chi, c) = 0, \quad (2)$$

де c - область зовнішніх параметрів, що визначають екстремаль.

Тоді, якщо існує екстремаль, яка визначається внутрішніми параметрами, маємо з урахуванням ортогональності екстремалей

$$-\delta \Pi(\chi) + \Pi(c) = 0, \quad (3)$$

де $\Pi(c)$ можна вважати сталою, оскільки варіюються внутрішні параметри. Знак обрано з урахуванням того, що варіюється внутрішня енергія.

Відповідно [11] вираз (2) можна записати у вигляді

$$\delta \Pi(\chi) = 0, \quad (4)$$

за умови, що за всіма j екстремальми

$$\delta \Pi(\chi) = \Pi(c), \quad j=1, 2, \dots, n \quad (5)$$

або у нормованому на одиницю вигляді

$$\sum_j \Pi_j^*(\chi) = 1. \quad (6)$$

Вираз (6) можна трактувати як умову повноти своїх функцій задачі (4). Відповідно до [11], [12] ця вимога відповідає умові рівності нулю і не від'ємного значення другої варіації функціоналу. Пропонований [4] критерій полягає у дослідженні першої варіації функціоналу внутрішньої потенційної енергії тіла в області зміни внутрішніх параметрів тіла на екстремальх із постійними значеннями зовнішніх параметрів. Постійність зовнішніх параметрів не виключає відсутності зовнішніх впливів, оскільки вираз (4) дозволяє змінювати змінні, що характеризують

внутрішні параметри системи. Такий стан у будівельній механіці називають станом самонапруження.

При навантаженні конструкцій до критичного рівня є безперервний ряд подібних стаціонарних станів, що відрізняються постійним множником. Кожен новий стан може бути отриманий як за рахунок збільшення зовнішнього навантаження (збільшення повної енергії системи), яке буде врівноважене внутрішніми зусиллями, так і при розгляді можливих форм деформованого стану тіла, коли навантаження стало чи відсутнє. При досягненні критичного рівня навантаження (критичного рівня внутрішньої потенційної енергії тіла) подальша зміна енергії системи може піти за рахунок накопиченої внутрішньої енергії. Необхідне мале збурення внутрішнього поля зусиль або деформацій, для подальшої зміни виду деформування системи, але при цьому зовнішні сили дійсної роботи не здійснюють, оскільки врівноважені внутрішніми зусиллями. Таким чином, на критичних рівнях енергії не має значення вид навантаження і його величина (якщо мати на увазі нормовані величини навантаження). Важливо, що за заданих умов є самоврівноважений стан системи, а подальша дійсна робота здійснюватиметься варіаціями внутрішніх зусиль чи деформацій [4].

Отримана постановка задачі говорить про те, що наявність критичних рівнів внутрішньої потенційної енергії деформованого тіла або системи тіл є об'єктивною реальністю, властивою будь-якій системі, що деформується, і може бути виявлені варіюванням внутрішніх параметрів. Тому дослідження енергії конструкції можна вести на полі ортонормованих внутрішніх параметрів системи, що визначають напружено-деформований стан і залежать тільки від фізико-механічних характеристик системи, умов на кордоні (умов спирання) та форми тіла [4]. Крім того, внаслідок однорідності математичної моделі внутрішньої потенційної енергії деформації тіла можна відмовитися від вимоги малості зміни параметрів проектування, і досліджувати систему на безлічі ортонормованих функцій параметрів системи за умови їх повноти.

Як показує експериментальна практика, завдання механіки твердого тіла, що деформується, здебільшого призводять до нелінійних залежностей. Побудова загальної нелінійної теорії, що охоплює всі стадії деформування матеріалу з урахуванням можливої втрати стійкості, складне завдання, що піддається вирішенню чисельними методами на основі ітераційних процедур лише з певним ступенем точності. В основі дослідження систем на критичних рівнях енергії лежить припущення, що будь-який критичний нелінійний стан визначається рішенням лінійного завдання. Нелінійні члени уточнюють співвідношення між фазовими змінними, що описують завдання [4]. Ця гіпотеза відповідає основним постулатам класичної механіки: постулату Галілея та постулату Ньютона.

Постановка задачі. Шляхом аналізу існуючих досліджень розглянути методику розв'язку задач будівельної механіки на основі критерію критичних рівнів енергії. На підставі розв'язку класичної задачі опору матеріалів визначити ефективність запропонованого методу розв'язку, виконати порівняння методики розв'язку на основі критерію критичних рівнів енергії з традиційними методами.

Викладення матеріалу та результати. Розглянемо класичний експеримент опору матеріалів про розтягнення металевого зразка з метою одержання діаграми рівноважних станів. До верхнього рухомого захоплення випробувальної машини прикладається зовнішня сила F , що розтягує (рис. 1). Площа поперечного перерізу - A , модуль пружності - E . Прийемо переміщення довільної точки осі стержня у вигляді $u = u(x)$, тоді деформація розтягання в точці, що розглядається, визначиться як $u' = du / dx$. Жорсткість стержня в початковий момент деформування позначимо r_0 , а параметр, що характеризує положення перерізу, який розглядається, в прольоті під час деформування, позначимо як ζ [4].

Визначимо положення перерізу, де виникають найбільші деформації, що призводять до руйнування зразка (наприклад, місце утворення "шийки").

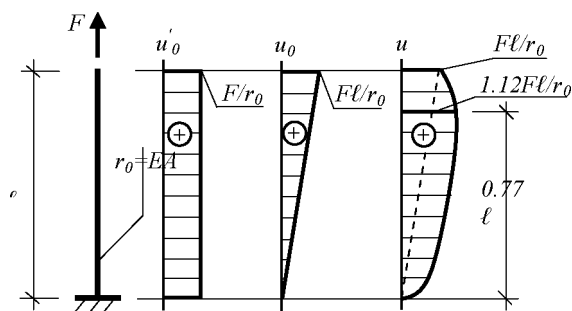


Рис. 1. Розрахункова схема стержня при роботі на розтяг, епюри переміщень

Поздовжні переміщення u ростуть уздовж осі стержня x , яка має початок координат у місці нерухомого закріплення стержня в захватах випробувальної машини. Згідно з класичною теорією опору матеріалів всі поперечні перерізи стержня мають однакові переміщення, що показано на епюрі відносних переміщень u'_0 . Епюра абсолютних переміщень перерізів стержня u_0 має трикутний вигляд із максимальним значенням на кінці стержня. Тоді утворення шийки на зразку має відбуватися завжди у місці верхнього рухомого закріплення. Але в експериментах цього не відбувається. Руйнування зразка (шийка) у переважній більшості випадків експериментів з'являється на відстані, близькій до величини третини довжини робочої зони зразка, відкладеної від рухомого закріплення. Тобто лінійна теорія не може пояснити реальну картину розподілу переміщень поперечних перерізів стержня при розтяганні.

На рис. 2 наведені експериментальні металеві, алюмінієві та фанерні зразки після руйнування, при випробуваннях на розтяг.

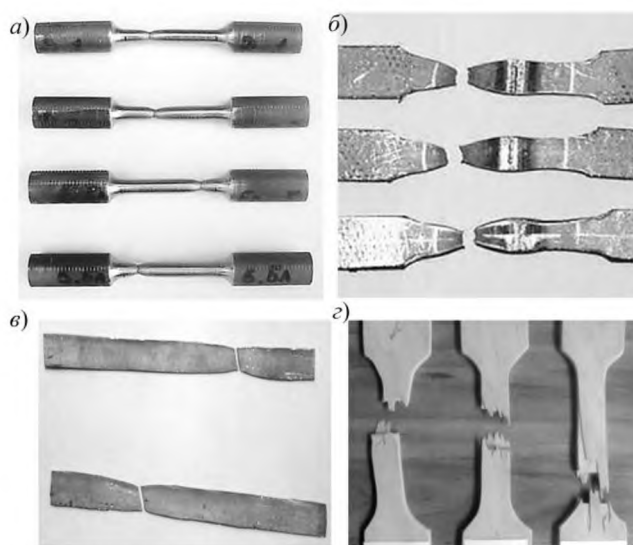


Рис. 2. Загальний вигляд зруйнованих експериментальних зразків при випробуваннях на розтяг: а – металеві циліндричні зразки; б – металеві плоскі зразки; в – зразки з алюмінію; г – зразки з фанери

Можна стверджувати, що переважна більшість зразків (порядку 70-80%) руйнуються в третині за довжиною. Твердження про те, що в місці утворення шийки були мікротріщини або інші дефекти матеріалу зразка навряд чи, можна вважати переконливим, оскільки такі дефекти повинні розподілятися випадковим чином і, відповідно, місця розриву розподілялися б за довжиною також випадково. Таким чином маємо невідповідність “класичної” теорії опору матеріалів та результатів експериментальних досліджень.

Означену задачу можна вирішити використовуючи теорію стану тіла на критичних рівнях енергії [4], основні гіпотези якої були описані вище. Зміна внутрішньої потенційної енергії при розтягуванні зразка від початкового ненапруженого самозрівноваженого стану до нового (або від одного критичного рівня до іншого) можна уявити лінійною частиною розкладання внутрішньої енергії деформації в ряд Тейлора по переміщенням. Зміну енергії від одного критичного рівня до іншого можна записати як

$$U(u, u', x) - U_0 = \frac{d^2 U_0}{du^2} u^2 + \frac{d^2 U_0}{du'^2} u'^2, \quad (7)$$

де u - переміщення довільного перерізу стержня, за яким ведеться спостереження, а u' - швидкість зміни переміщень по координаті того ж перерізу. Переміщення на початковому рівні енергії, що відображають нескінченно малі переміщення u_0 , визначаються лінійною теорією, яка отримала розвиток в опорі матеріалів, і представлені на рис. 1.

$$\frac{d^2 U_0}{du^2} = \frac{dN_0}{du} = r_0, \quad \frac{d^2 U_0}{du'^2} = \frac{d}{du'} \left(\frac{dU_0}{du'} \right) = \frac{d}{du'} (r_0 dx) = r_0 (u'')^{-1}, \quad (8)$$

де N_0 - внутрішнє зусилля в стержні на початковому рівні дії розтягуючого навантаження. Якщо вважати величину u деформацією елемента стержня, то $\chi = du''/dx$ - швидкість зміни деформацій за поздовжньою координатою. На початковому рівні деформування вона дорівнює нулю. При розкладанні у ряд буде отримана формула дійсної роботи системи на початковому рівні деформування. Для отримання складової енергії, що враховує швидкість зміни деформації, слід залишити визначення параметра χ до моменту визначення функції u на нелінійній ділянці деформування [4].

Повна зміна внутрішньої енергії від одного критичного рівня до іншого набуде вигляду

$$\Delta U(u, u') = \int_0^\ell \left(\frac{r_0 u^2}{2} + \frac{r_0 \chi^{-1} u'^2}{2} \right) dx. \quad (9)$$

Умову нормування переміщень запишемо у вигляді

$$\int u^2(x) dx = 1. \quad (10)$$

Тоді умова стаціонарності енергії дає рівняння Ейлера-Лагранжа вигляду

$$u'' + \eta^2 u = 0, \quad (11)$$

де коефіцієнт η має вигляд

$$\eta = \chi \frac{\lambda + EA}{EA}. \quad (12)$$

При одному нерухомому закріпленні, а другому рухомому граничні умови запишуться як

$$u(0) = 0, \quad u(\ell) + \ell u'(\ell) = 0. \quad (13)$$

Функція переміщень може бути подана у вигляді

$$u = c_1 \cos(x\sqrt{\eta}) + c_2 \sin(x\sqrt{\eta}). \quad (14)$$

Підставляючи (14) у граничні умови (13), можна отримати систему рівнянь визначення постійних. Розв'язавши систему рівнянь, отримують

$$c_1 = 0, \quad c_2 (\sin(\sqrt{\eta}\ell) + \ell\sqrt{\eta} \cos(\sqrt{\eta}\ell)) = 0. \quad (15)$$

Тоді власні значення знаходяться з рівняння

$$\operatorname{tg} \sqrt{\eta}\ell = -\sqrt{\eta}\ell. \quad (16)$$

Розв'язок рівняння (16) дає мінімальне власне значення

$$\sqrt{\eta}\ell \approx \frac{31}{48} \pi = 2,0289. \quad (17)$$

Нормована власна функція має вигляд

$$\bar{u}(x) = \sin \frac{31}{48} \frac{\pi x}{\ell}, \quad (18)$$

для першого власного значення

$$\eta_1 = 0,6458 \frac{\pi}{\ell^2}. \quad (19)$$

Функція розподілу переміщень на першому критичному рівні енергії має вигляд

$$u(x) = \frac{F\ell \sin \pi x / \ell}{EA \sin \pi / \ell}. \quad (20)$$

На рис. 1 показана справжня епюра u розподілу переміщень в стержні, що розтягується, на критичному рівні енергії.

Відстань до точки екстремуму переміщень $x_{ext} = 0,77\ell$. Отримане значення розташування небезпечного перерізу (місця ймовірного руйнування стержня) добре апроксимує результати експериментальних досліджень. На рисунку 1 позначено розташування небезпечного перерізу та вказано максимальну величину переміщення $u_k = 1,112 F\ell / (EA)$ [3].

Наведений розв'язок задачі про розтягнення стержня зосередженою силою дозволяє пояснити появу небезпечного перерізу в зразку, що розтягується, на відстані близько 1/3 – 1/5 його довжини від рухомого закріплення для класичного експерименту, що проводиться в курсі опору матеріалів. При цьому положення місця розриву не залежить від стадії руйнування матеріалу зразка (пластичне чи крихке руйнування); складу матеріалу конструкції (ізотропний метал, що має кристалічну структуру; фанера – композитний матеріал з шарів деревини та клею; тощо).

Висновки та напрямок подальших досліджень. Розглянуто підхід до вирішення задач будівельної механіки, який ґрунтується на критерії критичних рівнів енергії. Останній дозволяє представити завдання будівельної механіки у єдиній математичній постановці – у вигляді задач на власні значення.

На прикладі задачі про розтяг стержня отримані результати, які якісно збігаються з результатами експериментів, що проводяться в курсах опору матеріалів, і пояснюють невідповідності

класичної теорії експериментам. Розраховано відстані до місця появи «шийки» в зразку, що розтягується, і розподіл внутрішніх зусиль уздовж осі.

Безперечною перевагою розрахунку систем на основі дослідження внутрішньої енергії є можливість постановки та вирішення суттєво нелінійних задач будівельної механіки, задач на температурні впливи та інші впливи, що змушують відстежувати зміну їх величин та положення.

Дослідження функціоналу внутрішньої енергії деформації конструктивної системи призводить до математичної моделі завдань на власні значення. Спільність формулювання дозволяє стверджувати, що подібна постановка задачі охоплює всі види задач будівельної механіки: проектна, перевірна та оптимізаційна. Наведена методика може використовуватися у вивченні розвитку деформацій в основах будівель та споруд, фундаментних конструкцій.

Список літератури

1. **Баженев В.А., Перельмутер А.В., Шинков О.В.** Будівельна механіка. Комп'ютерні технології і моделювання. – К.: ПАТ «ВІПОЛ», 2013. – 896 с.
2. **Гольдштейн Ю.Б., Соломеш М.А.** Вариационные задачи статики оптимальных стержневых систем. - Л.: изд. Ленинградского ун-та, 1980.- 208 с.
3. **Золотов А.Б., Акимов П.А., Сидоров В.Н., Мозгалева М.Л.** / Математические методы в строительной механике (с основами теории обобщенных функций). М.: Издательство АСВ, 2008. - 336 с.
4. **Ступишин Л.Ю.** Критические уровни внутренней потенциальной энергии деформации твердых деформируемых тел: монография / **Л.Ю. Ступишин**; Национальный исследовательский московский государственный строительный университет, г. Москва, 2022. - 387 с. DOI 10.47581/2022/Stupushin.01.
5. **Баженев В.А.** Варіаційні принципи і методи будівельної механіки: Підручник. – К.: Каравела, 2012. – 720с.
6. **Тарапов И.Е.** Механика сплошной среды. Ч.2. Общие законы кинематики и динамики.-- Харьков: Золотые страницы, 2002.—516 с.
7. **Баженев В.А.,** Метод скінченних елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок./ – К.: КНУБА, 2000. –386 с.
8. **Лучко Й. Й., Мимлін С. В.** Динаміка стержневих систем та споруд. - Львів: Каменяр, 2018. - 524 с.
9. **Czichos H.** Physics of failure//Handbook of technical diagnostics / Berlin: Springer-Verlag, 2013. Pp. 23-40.
10. **Беллман Р., Энджел Э.** Динамическое программирование и уравнения в частных производных. М.: Мир, 1974. 207 с.
11. **Курант Р., Гильберт Д.** Методы математической физики. Т. I. М.: Гос-техиздат, 1951. - 476 с.
12. **Михлин С.Г.** Вариационные методы в математической физике. - М.: Наука, 1970. - 512 с.

Рукопис подано до редакції 17.04.2023

УДК 622.788.36

С.Г. САВЕЛЬЄВ, д-р техн. наук, проф., **О.В. БАБАЄВСЬКА**, асист.,
Т.П. ЯРОШ, канд. техн. наук, доц., **М.М. КОНДРАТЕНКО**, ст. викладач
Криворізький національний університет

АНАЛІЗ ПРИЙОМІВ ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ВОЛОГОСТІ ШИХТИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ОКАТИШІВ

Відзначено існування декількох прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів, більшість яких ґрунтуються на використанні водно-фізичних характеристик шихти або показниках гранулометричного складу грудкуватого матеріалу. Проведено аналіз використовуваних методик, що визначення характеристичних вологостей шихти, що застосовуються для визначення оптимальної вологості тонкодисперсних матеріалів, а також формул для її розрахунку. Результати аналізу вказують на певну перевагу застосування прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів, які базуються на характеристичних вологостях шихти, що піддається огрудкуванню, завдяки їх більшій універсальності. Вказано на доцільність формування стандартних методів визначення характеристичних вологостей матеріалів, які входять до складу шихти для виробництва залізрудних окатишів.

Метою роботи є порівняльна оцінка достовірності результатів визначення за різними методиками і формулами оптимальної вологості тонкодисперсних матеріалів, які використовуються при виробництві окатишів.

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

Наукова новизна роботи. На основі проведеного аналізу встановлено, що основні прийоми визначення оптимальної вологості шихти з тонкодисперсних матеріалів, яка використовується для виробництва залізорудних окатишів, мають приблизно однакову достовірність, але більшу перспективу мають такі, що базуються на застосуванні характеристикних вологоємностей і грудкуємого матеріалу.

Практична значимість роботи полягає у представленні практичних рекомендацій щодо використання прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів, що мають високу представницькість результатів і не вимагають багато часу на їх визначення.

Результати роботи дають підстави вважати, що розробка і застосування прийомів визначення оптимальної вологості залізорудної шихти для ефективного протікання процесу її грануляції є одним з важливих напрямків розвитку теорії і технології виробництва окатишів, подальший розвиток якого пов'язаний з встановленням стандартних методів визначення водно-фізичних характеристик (характеристичних вологоємностей) шихт, які піддаються огрудкуванню, і ефективним використанням їх для визначення вмісту вологи в шихті, який сприяє отриманню сирих окатишів кондиційної якості.

Ключові слова: вологоємність, матеріал, метод визначення, гранулометричний склад, окатиш, вологість

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. На сучасному етапі розвитку металургії чорних металів залізорудні окатиші залишаються, поряд з агломератом, основним компонентом шихти доменних печей, а також найбільш поширеною сировиною для процесів прямого відновлення заліза. На першій стадії технології виробництва цього виду металургійної сировини відбувається отримання сирих окатишів шляхом огрудкування зволоженої тонкодисперсної шихти. Ефективність цього процесу вирішальною мірою визначається величиною вологості шихти, що піддається огрудкуванню, яка повинна мати оптимальне значення. Тому питання, пов'язані з визначенням оптимальної вологості шихти, що піддається огрудкуванню, вже десятки років привертають увагу вчених-дослідників і виробничників, які працюють на фабриках огрудкування.

В той же час залишаються невизначеними і потребують уточнення деякі особливості застосування прийомів розрахунку значень оптимальної вологості шихти огрудкування, доцільності використання окремих методів в конкретних умовах виробництва. Таким чином аналіз прийомів визначення оптимальної вологості шихти для огрудкування сприятиме більш ефективному використанню цього важливого елемента технології отримання сирих окатишів, що забезпечить в цілому покращення техніко-економічних показників роботи фабрик огрудкування – підвищення якості окатишів і продуктивності випалювальних агрегатів.

Аналіз досліджень і публікацій. Найбільш поширене уявлення серед дослідників і виробничників щодо оптимальної вологості шихти в процесі огрудкування асоціюється з наявністю в шихті такого вмісту вологи, який сприяє отриманню сирих окатишів максимальної міцності [1; 2, с. 133]. В той же час відоме дещо інше розуміння цього терміну. Згідно авторитетного інформаційно-технічного довідника з найкращих доступних технологій в галузі видобутку і збагачення залізних руд [3, с. 75], вважається, що оптимальною вологістю є такий вміст вологи в шихті, який забезпечує максимальний вихід з процесу огрудкування сирих окатишів заданого розміру. Так чи інакше, обидва трактування оптимальної вологості шихти для огрудкування пов'язані з отриманням кращих результатів роботи агрегату, який виробляє сирі окатиші.

Теоретичним підґрунтям для розробки прийомів визначення оптимальної вологості тонкодисперсного матеріалу, яким є шихта для виробництва окатишів, є аналіз фізико-хімічної взаємодії рідкої та твердої фаз в процесі огрудкування. Подрібнені залізорудні матеріали є гідрофільними дисперсними системами, для яких характерна інтенсивна взаємодія з водою. Система «тонкоподрібнений залізорудний концентрат – вода» намагається знизити свою енергію шляхом зменшення поверхневого натягу на межі розділення фаз, а також за рахунок зменшення ступеню дисперсності частинок концентрату. Це означає, що дана система має термодинамічне прагнення до огрудкування [4, с. 9].

Поверхня будь-якої рідини і твердого тіла володіє силовим полем, здатним захоплювати і утримувати сторонні атоми і молекули. Аналогічні сили зчеплення з'являються між двома макроскопічними тілами, поверхні яких зближені до дуже малих відстаней. Однак дія цього ефекту не поширюється на частинки крупніше 0,005 мм тому, що мікрорельєф їх поверхні не дозволяє зближення на відстань, де проявляється взаємодія силових полів. На відміну від твердих частинок, рідина здатна змінювати свою поверхню, повторюючи рельєф поверхні твердої частинки.

В результаті виникає необхідний контакт – сила зв'язку частинки з рідиною досягає значної величини. Таким чином, шар рідини між двома частинками здатний зв'язувати сусідні частинки. Для цього необхідно, щоб достатня сила зчеплення була не тільки між рідиною і частинкою, але й між молекулами самої рідини. Такими специфічними властивостями має вода, яка для частинок залізорудних матеріалів є доволі сильною «клеючою» речовиною [5, с. 55, 56].

Міцність агрегату (грудки) визначається трьома чинниками:

міцністю контактної пари, що залежить від типу зволожувальної рідини, гранулометричного складу матеріалу і визначається відомою формулою Лапласа;

кількістю контактів в одиниці об'єму матеріалу;

кількістю води в точці контакту (*ММВ*, *МКВ*).

Максимальна молекулярна вологоємність матеріалу (*ММВ*) є величиною вологості, що відповідає максимальній товщині міцно сорбованого шару води.

Вологість матеріалу, що відповідає заповненню вільного об'єму контактної пари без утворення манжети між ними, є нерухомою капілярно-стиковою вологоємністю (*НКВ*) і характеризує нижню межу робочої вологості грудкуваного матеріалу.

Максимальна капілярна вологоємність (*МКВ*) – це величина вологості під час заповнення капілярів агрегату дисперсних частинок водою за збереження трифазної системи повітря – рідина – тверде (верхня межа робочої вологості матеріалу) [6, с. 222].

Вітчизняними і закордонними вченими теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена пряма залежність між величинами питомої поверхні шихти і капілярної сили в сирому окатиші та його опором роздавлюванню [7, с. 33, 34].

На міцність зчеплення часток впливають наступні фактори: 1) вміст води в залізорудній шихті; 2) гранулометричний склад сипкого матеріалу; 3) природа грудкуемого матеріалу; 4) умови утворення гранул. Міцність грудки P' підпорядковується залежності [8, с. 64]:

$$P' = kSp[(1 - \varepsilon)/\varepsilon], \quad (1)$$

де k – коефіцієнт, що враховує природу матеріалу; S – питома поверхня шихти; ρ – густина матеріалу; ε – пористість окатиша.

Вплив питомої поверхні шихти на міцність окатишів наведено на рис. 1 [6, с. 224].

Однак роль питомої поверхні залізорудного концентрату проявляється не тільки в позитивному впливі на зчеплення частинок. Тенденція до зростання міцності окатишів внаслідок збільшення кількості контактів може перекриватися негативним впливом звуження діапазону коливання розміру частинок і, отже, зниженням густини окатишів. Крім того, зростання питомої поверхні призводить до збільшення робочої вологості шихти, що спричиняє зростання пористості сухих окатишів і, отже, менш сприятливі умови для протікання процесу зміцнення. За результатами дослідження процесу огрудкування та зміцнення окатишів з лебединського концентрату різної питомої поверхні спостерігається екстремальний зв'язок між питомою поверхнею концентрату та металургійними властивостями обпалених окатишів [8, с. 64].



Рис. 1. Залежність міцності сирих окатишів від величини питомої поверхні шихти: 1 – неофлосовані; 2 – офлосовані до основності 0,8–1,0

Таким чином, треба розуміти [4, с. 9], що грудкуємість неможливо визначити однозначно, оскільки вона є результатом одночасної дії багатьох факторів, насамперед гранулометричного складу матеріалу, форми і властивостей поверхні зерен, хіміко-мінералогічного складу.

Суттєве зауваження щодо використання характеристичних вологоємностей для розрахунку коефіцієнта грудкуємість [9] пов'язане з застосуванням закону фільтрації Дарсі для визначення швидкості насичення матеріалу водою. За допомогою цього закону неможливо певною мірою описати швидкість насичення, зважаючи на те, що він є емпіричним і адекватно описує характер руху порової рідини лише за відносно малих градієнтів тиску, не враховуючи механічних впливів при грануляції.

Крім того, оцінка грудкуємості на основі характеристичних вологоємностей не враховує вплив на сили зчеплення факторів, що визначається станом шару зерен частинок шихти, і, насамперед, наявністю полярних радикалів і атомів з великим негативним електростатичним потенціалом. При тому, що теоретичний аналіз вказує на те, що магнетитовий концентрат піддається великому впливу електростатичних і магнітних сил [10].

Однак, попри всі зауваження щодо недоліків використання водно-фізичних характеристик для оцінки придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування, саме вони, наряду з гранулометричним складом, залишаються найбільш поширеним підґрунтям для встановлення коефіцієнтів грудкуємості й оптимальної вологості шихти, що піддається огрудкуванню.

Для характеристики гранулометричного складу залізорудного концентрату – основного компонента шихти для виробництва окатишів – звичайно використовують вміст у ньому певних часток (наприклад, менше 0,074; 0,050; 0,044 мм.) і питому поверхню. Практика огрудкування показує, що у випробуваних межах деяке збільшення частки дрібних часток у шихті сприятливо позначається на процесі грануляції і якості сирих і обпалених окатишів. Міцність окатишів тим вища, чим більше число контактів між окремими частками, кількість яких збільшується зі зменшенням розміру часток [11, с. 25, 26].

Сирі окатиші задовільної міцності можна одержати при подрібненні концентрату до крупності $\leq 0,2$ мм. Однак існують і більш жорсткі вимоги, відповідно до яких весь матеріал розмелюють, наприклад, до крупності $\leq 0,15$ мм, у тому числі 75 % матеріалу – до крупності $\leq 0,044$ мм. У деяких випадках вимоги до ступеня здрібнювання ще вище: 85-90 % матеріалу мають бути здрібнені до крупності $\leq 0,044$ мм [4, с. 10]. Поширеною є практика використання для виробництва окатишів концентрату, який має вміст фракції $<0,075$ мм на рівні 80 %, як, наприклад, в роботі [12].

Якщо для оцінки грудкуємості матеріалів користуватися величиною їх питомої поверхні, то для придатних матеріалів вона складає 1500–2500 $\text{см}^2/\text{г}$, тобто $\approx 2000 \text{ см}^2/\text{г}$, що відповідає вимогам до крупності: 100 % фракції $<0,15$ мм, в тому числі 75 % фракції $<0,04$ мм [4, с. 12].

За кордоном значення питомої поверхні зазвичай називають індексом Блейна, який має розмірність $\text{см}^2/\text{г}$. Як правило вважають, що будь-який матеріал, призначений для огрудкування, повинен мати індекс Блейна $>1200 \text{ см}^2/\text{г}$, хоча відомі [12] приклади отримання позитивних результатів при використанні залізорудного концентрату з індексом Блейна 1180 $\text{см}^2/\text{г}$.

Розробка показників грудкуємості на базі водно-фізичних характеристик матеріалу вимагає попереднього розгляду можливих зв'язків (станів) води в шарі дрібних частинок.

Свого часу академіком П.О. Ребіндером запропоновано класичну класифікацію форм зв'язку вологи з матеріалами засновану на величині її енергії зв'язку, згідно якої існують форми зв'язку трьох типів: хімічна, фізико-хімічна та фізико-механічна. Дещо інакше виглядає класифікація форм зв'язку капілярно-пористих тіл з поглиненою рідиною в залежності від величини і природи енергії зв'язку, представлена професором Д.А. Ковальовим зі співробітниками [13, с. 105]. Пропонується розрізняти чотири форми зв'язку води з дисперсними системами: хімічно зв'язану; капілярно зв'язану; адсорбційно зв'язану; осмотично зв'язану (вода, яка знаходиться в розбавлених розчинах). Для умов згрудкування залізорудних матеріалів найбільший інтерес представляє адсорбційно і капілярно зв'язана вода.

Характеризуючи різні стани води в шарі дрібного матеріалу ті самі автори розрізняють воду [13, с. 97] адсорбовану – міцно зв'язану; слабо орієнтовану – рихло зв'язану; вільну – капілярну і гравітаційну.

Міцно зв'язана вода, яка має максимальну гігроскопічну ($МГ$), і сумісно з максимальною кількістю рихло зв'язану воду, утворює категорію максимальної молекулярної вологоємності ($ММВ$) матеріалу. В свою чергу $ММВ$ і максимальна кількість вільної капілярної вологи, що утримується структурою, формують категорію максимальної капілярної вологоємності ($МКВ$). Величини $МГ$ і $ММВ$ характеризують енергію взаємодії поверхні часток з водою, а величина $МКВ$ – структуру пористого матеріалу (наприклад, структуру гранули) [13, с. 97, 98].

В тому ж навчальному посібнику [13, с. 142] вказано, що товщина плівки адсорбованої води знаходиться в межах 0,05–0,2 мм, тому не залишається місця для капілярної вологи. З цієї причини величина $ММВ$, що дорівнює 7–12 %, включає $МГ$, яка дорівнює 0,5–2,6 %, і найменшу капілярну вологоємність ($НКВ$).

Використання водно-фізичних характеристик шихти для визначення коефіцієнта грудкуємості K , а згодом і оптимальної вологості шихти започатковано наприкінці 60-х років минулого століття В.М. Вітюгіним зі співробітниками.

Зокрема В.М. Вітюгіним запропонований показник грудкуємості у такому вигляді, ч. од. [8, с. 64]

$$K = (HKB - W_{\text{вз}})/(МКВ - HKB), \quad (2)$$

де $МКВ$ – найбільша, а $НKB$ – найменша капілярна вологість; $W_{\text{вз}}$ – внутрішньозеренна вологість, яка не відіграє активної ролі в процесі гранулоутворення.

Відома також інша пропозиція цього дослідника щодо формули для визначення коефіцієнта грудкуємості [7, с. 34]

$$K = (МКВ - МMB)/МКВ. \quad (3)$$

На підґрунті характеристичних вологоємностей запропонована формула для орієнтовного визначення оптимального значення робочої вологості грудкуємого матеріалу ($W_{\text{онм}}^p$) [13]

$$W_{\text{онм}}^p = HKB + (W_{\text{макс}}^p - HKB)(1 - K_{\text{відн}}), \quad (4)$$

при цьому

$$W_{\text{макс}}^p = HKB + (HKB - MГ)(1 - K_{\text{відн}}); \quad (5)$$

$$K_{\text{відн}} = (HKB - MГ)/(МКВ - HKB). \quad (6)$$

Вважаючи, що характеристичні вологоємності матеріалу $МMB$ і $МКВ$ в достатньому ступені відображають властивості, зв'язані з процесом грануляції, В.І. Коротич з посиланням на В.М. Вітюгіна в підручнику [5, с. 60] наводить формулу для визначення оптимальної вологості матеріалу на основі цих параметрів, яка дещо схожа на формулу (4),

$$W_{\text{онм}} = HKB + (МКВ - HKB)(1 - K). \quad (7)$$

Нарешті в науковій монографії [15, с. 114] без будь-яких посилань наведена формула для визначення оптимальної вологості огрудкування

$$W_{\text{онм}} = HKB + (HKB - MГB)(1 - K)^2, \quad (8)$$

яка відрізняється від формули (5) лише зведенням у квадрат виразу у дужках.

В той же час відома [1] значно простіша формула для визначення оптимальної вологості шихти для огрудкування

$$W_{\text{онм}} = МКВ/2. \quad (9)$$

Вказані відмінності і розбіжності у визначенні оптимальної вологості свідчать про необхідність перевірки наведених формул.

Існує думка [16], що характеристичні вологоємності ($МКВ$, $НKB$ та $MГ$) не дають достовірної інформації про необхідну величину оптимальної вологості при огрудкуванні залізрудних шихт. Визначені за ними величини знаходяться поблизу верхньої межі оптимуму або навіть вище, що негативно позначається на кінцевих результатах виробництва окатишів. Для підвищення показників виробництва і при визначенні оптимальної вологи залізрудних шихт, що піддаються огрудкуванню, необхідно враховувати вплив відношення об'ємів води і пір на міцність сирих окатишів. Це дозволить здійснити огрудкування при вологості, що відповідає нижній межі оптимуму або близько до нього, що позитивно позначиться на міцності готових окатишів і енергетичних витратах.

Незалежно від розробки та дослідження методів визначення оптимальної вологості шихти, які базуються на використанні характеристичних вологоємностей, відбувались пошуки методів встановлення оптимальної вологості на підґрунті показників крупності матеріалу, що піддається огрудкуванню.

В межах зміни вмісту в шихті фракцій -50 мкм (f) 20–90 % та її питомої поверхні (S) 125–300 м²/кг, оптимальна вологість ($W_{\text{онм}}$) та допустимі її коливання ($\Delta W_{\text{онм}}$) за умов отримання достатньо міцних та пластичних окатишів описуються рівняннями, % [13, с. 142, 143]

$$W_{\text{онм}} = 6,055 - 0,072 \cdot f + 0,055 \cdot S, \text{ при } R = 0,846; \quad (10)$$

$$\Delta W_{\text{онм}} = 0,33 - 0,01 \cdot f + 0,004 \cdot S + 0,092 \cdot W_{\text{онм}}, \text{ при } R = 0,9. \quad (11)$$

За даними роботи [17] отримано наступну залежність оптимальної вологості шихти від величини питомої поверхні в межах від 160 до 300 м²/кг:

$$W_{\text{онм}} = 9,0 + 0,01(S_{\text{тут}} - 160). \quad (12)$$

Відповідно до цієї залежності при збільшенні питомої поверхні від 160 до 200 м²/кг оптимальна вологість огрудкування підвищується на 0,4 %.

Крім двох розглянутих шляхів визначення оптимальної вологості, заснованих на використанні показників характеристичних вологоємностей або крупності грудкуємих матеріалів, відома розробка експрес-методу визначення оптимальної вологості, яка базується на значенні наведеної порозності віброущільненого шару і питомої ваги матеріалу [18].

Постановка задачі. Задача представленого дослідження полягає в аналітичній порівняльній оцінці існуючих шляхів і методів визначення оптимальної вологості шихти, що піддається огрудкуванню, з метою встановлення прийомів, які найбільше відповідають реальним умовам процесу огрудкування при виробництві залізорудних окатишів з концентратів магнітного збагачення залізістих кварцитів.

Викладення матеріалу та результати. На початку дослідження було з'ясовано питання щодо реальних значень вологості шихти на фабриках огрудкування. Для магнетитових залізорудних концентратів, які є основною сировиною для виробництва окатишів на переважній більшості підприємств, вона перебуває в межах $9,2 \pm 0,2$ % [19]. Таку вологість мають концентрати практично на всіх вітчизняних і закордонних фабриках огрудкування (%): на Соколовсько-Сарбайській – 9,17, Качканарській – 9,08, Михайлівській – 9,11, Центрально-Криворізькій – 9,08, Північній – 9,4, Костомукшській – 9,3, Хіббінг і Хоговенс – 9,0–9,2. Зі зростанням питомої поверхні частинок від 140 до 180 м²/кг оптимальна вологість огрудкування збільшується від 9,1 до 9,4 %, але при цьому залишається в зазначених вище межах.

Наведені значення реальної вологості шихти відповідають умовам виробництва окатишів, зокрема якості вихідного концентрату, характерним для останніх років ХХ сторіччя. Зараз, у зв'язку з намаганнями і досягненнями збагачувальників у напрямку підвищення вмісту заліза в концентраті, його крупність значно зменшилася, що спричинило зростання робочої вологості шихти, яка піддається огрудкуванню. Так, магнетитовий концентрат Північного ГЗК з масовою часткою заліза на рівні 70,0 % містить близько 99 % фракції –54 мкм і має питому поверхню >3000 см²/г. Робоча вологість шихти за участю подібного концентрату знаходиться у межах $9,5 \pm 0,1$ %. Таким чином, можна вважати, що в сучасних умовах виробництва окатишів із залізорудних концентратів значення оптимальної вологості шихти знаходиться на рівні $9,4 \pm 0,2$ %.

Наступний етап дослідження стосувався оцінки суттєвості розбіжностей у визначенні терміну «оптимальна вологість шихти для огрудкування», а саме визначенні, який показник є більш представницьким критерієм оптимальності – максимальна міцність сирих окатишів чи максимальний вихід з процесу огрудкування сирих окатишів заданого розміру. І хоча обидва критерії спрямовані на покращення роботи агрегату, який виробляє окатиші, в окремих випадках вони можуть вступати в протиріччя один з одним. При порівнянні цих критеріїв оцінки приходимо до висновку, що більше переваг має показник міцності сирих окатишів, який є одним з вирішальних і незмінних ознак якості окатишів, в той час як вихід кондиційних по крупності окатишів є показником, що може бути відкоригованим наступною операцією класифікації окатишів. В той же час існує можливість «примирення» існуючих критеріїв оцінки шляхом їх поєднання, а саме: оптимальною вологістю шихти огрудкування вважати таку, що забезпечує максимальну міцність сирих окатишів за умови найбільшого виходу фракції кондиційної крупності.

Порівняльний аналіз схожих за структурою розрахункових формул (4), (7), (8) для визначення оптимальної (робочої) вологості шихти шляхом підстановки в формули відповідних значень характеристичних вологоємностей показав, що найбільш адекватною є формула (8), яка дає розрахункові значення вологості, які найбільше наближені до реальних показників. Тому саме ця формула була використана для порівняльної оцінки різних шляхів і методів визначення оптимальної вологості шихти, яка піддається огрудкуванню, що було зазначено головною метою дослідження.

Для аналізу прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів були використані необхідні для розрахунків характеристики дев'яти залізорудних концентратів руд різного походження і отриманих різними методами збагачення, які наведені в першому томі довідника «Сырье для черной металлургии» [6, с. 223, табл. 5.1]. Результати розрахунків оптимальної вологості двома шляхами (на основі характеристичних вологоємностей та характеристик крупності), кожен з яких представлений двома методами з використанням формул (8)–(10), (12), наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Характеристики залізорудних концентратів різного походження

Концентрати	Вміст Fe _{заг} , %	Вміст класів, %		S_{num} , см ² /г	HKB, %	МКВ, %	$W_{83\%}$, %	K, ч.од.	W_{opt}^* , %	W_{opt}^{**} , %	W_{opt}^{***} , %	W_{opt}^{****} , %
		<50 МКМ	<10 МКМ									
Флотаційні												
ПівдГЗК:												
1	64,60	95,2	25,0	2000	7,6	20,0	0,5	0,57	8,90	10,0	10,20	9,40
2	62,80	92,7	19,5	2000	7,3	18,0	0,5	0,64	8,20	9,0	10,38	9,40
3	61,30	89,8	16,6	1800	7,0	19,7	0,5	0,51	8,55	9,85	9,49	9,20
МихГЗК:												
флотаційний	63,60	93,1	36,3	2000	8,0	18,0	0,8	0,72	8,56	9,0	10,35	9,40
магнітно-флотаційний	63,0	87,0	7,9	1800	8,0	20,5	0,8	0,58	9,29	10,25	9,69	9,20
магнітний	59,70	84,6	5,5	1550	7,2	19,0	0,8	0,54	8,54	9,50	8,49	8,95
Магнетитові:												
ЛебГЗК	68,0	86,1	14,4	1700	7,0	19,3	0,4	0,54	8,42	9,65	9,21	9,10
СтГЗК	65,60	94,0	18,3	2000	7,0	18,0	0,4	0,60	8,06	9,0	10,29	9,40
МихГЗК	64,5	92,1	15,3	1800	7,0	19,0	0,5	0,54	8,37	9,50	9,32	9,20

* – оптимальна вологість, визначена за формулою (8);

** – оптимальна вологість, визначена за формулою (9);

*** – оптимальна вологість, визначена за формулою (10);

**** – оптимальна вологість, визначена за формулою (12)

Аналіз отриманих результатів по флотаційним концентратам Південного ГЗК показує в цілому відсутність чіткої закономірності впливу крупності на оптимальну вологість (як і на коефіцієнт грудкуємості). Однак, якщо для збільшення інтервалу розходжень характеристик видалити проміжний другий зразок флотаційного концентрату, то всі методи вказують на закономірне збільшення оптимальної вологості при зменшенні крупності матеріалу. При цьому найбільш реальні результати показує розрахунок за формулою (12), яка базується на характеристичній крупності матеріалу (питомій поверхні).

Схожі висновки витікають з аналізу результатів розрахунків по другій групі концентратів (Михайлівський ГЗК): якщо видалити проміжний результат по масовій частці заліза і відповідній крупності, то в цілому, крім результатів за формулою (9), отримуємо вірну залежність оптимальної вологості від характеристик концентрату. Але, на відміну від результатів по концентратах Південного ГЗК, в цій групі цілком логічні результати по всім трьом зразкам матеріалів показують методи засновані на показниках крупності, представлені в двох останніх стовпцях табл. 1.

Що стосується результатів розрахунків по третій групі концентратів магнітного збагачення залізистих кварцитів родовищ Курської магнітної аномалії, то, враховуючи різну збагачувальність сировини представлених комбінатів, аналіз результатів потрібно робити окремо по кожному ГЗК. Лебединський концентрат (найбільш багатий і в той же час найбільш «грубий» по крупності) кращим чином оцінюється методами з використанням показників крупності. По концентрату Стойленського ГЗК більш достовірні результати показує метод, заснований на водно-фізичному показнику матеріалу за формулою (9). Оптимальна вологість концентрату Михайлівського ГЗК, найбільш наближена до реального результату, представлена результатом розрахунку за формулою (12), яка базується на значенні питомої поверхні матеріалу.

Безвідносно до особливостей всіх представлених в таблиці 1 концентратів, в цілому занижене значення оптимальної вологості показують в переважній більшості результати розрахунків за формулою (8), в той час як непоодинокі випадки завищених результатів дають розрахунки за формулою (10). Найбільш пристойно виглядають значення оптимальної вологості розраховані за формулою (12), але ця формула має певні обмеження щодо області використання.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Проведений аналіз прийомів визначення оптимальної вологості шихти за двома основними шляхами, заснованими на водно-фізичних характеристиках і показниках крупності матеріалу, вказує на доцільність використання обох цих прийомів для прогнозування реальних (робочих) значень вологості без проведення дорогих і довгих прямих визначень цього важливого параметра технологічного режиму огрудкування. Порівняння вказаних прийомів свідчить про певну перевагу методів, які базуються на водно-

фізичних характеристиках матеріалів завдяки їх більшій універсальності і чутливості до вмісту і властивостей досліджуваних проб. Важливою умовою отримання представницьких результатів прийомками, які базуються на водно-фізичних характеристиках, є правильний вибір методів визначення характеристичних вологостей.

Напрямок подальших досліджень пов'язаний з розробкою стандартних методів визначення показників характеристичних вологостей тонокодисперсних рудних матеріалів.

Список літератури

1. **Серебряник Г.И.** Комкуемость тонкозернистых шихт. Сталь, 1984, № 8. – С. 8-10.
2. **Папушин Ю.Л., Смирнов В.О., Біленький В.С.** Дослідження корисних копалин на збагачуваність. Навчальний посібник. Частина 1. – Донецьк : Східний видавничий дім, 2006. – 334 с
3. Добыча и обогащение железных руд. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. ИТС 25-2017. – М.: Бюро МДТ. 2017. – 239 с.
4. **Маерчак Ш.** Производство окатышей. М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
5. **Коротич В.И.** Основы теории и технологии подготовке сырья к доменной плавке. М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
6. Сырье для черной металлургии: Справочное издание в 2-х т. Т. 1. Сырьевая база и производство окискованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / [Ладыгинцев М.Г., Чижикова В.М., Лобанов В.И. и др.] : под ред. В.М. Чижиковой. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 896 с.
7. **Бережной Н.Н., Булычев В.В., Костин А.И.** Производство железорудных окатышей. М.: Недра, 1977. – 240 с.
8. Производство агломерата и окатышей: справ. изд. / [Базилевич С.В., Астахов А.Г., Майзель Г.М. и др.] : под. общ. ред. Ю.С. Юсфина. – М.: Металлургия, 1984. – 216 с.
9. **Стойкова Я.А., Бережной Н.Н.** Анализ показателей комкуемости тонкодисперсных материалов, / Сборник научных трудов Донбасского гос. ун-та. – Алчевск: ДонГУУ. – 2012. – Вып. 38. – С. 140-146.
10. Савельев С.Г., Стойкова Я.А. Оценка комкуемости магнетитовых концентратов / IX Междунар. конгр. обогащения стран СНГ: (сб. материалов). – М.: МИСиС, 2013. – С. 498-501.
11. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей. Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, Л.К. Антоненко и др. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
12. **Mbele P.** Pelletizing of Sishen concentrate. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. vol. 112, n. 3. Johannesburg, Mar. 2012. http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2225-62532012000300013&script=sci_arttext&tlng=es
13. Теоретические основы производства окискованного сырья. Д.А. Ковалёв, Н.Д. Ванюкова, В.П. Иващенко и др. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. – 476 с.
14. Определение комкуемости и рабочей влажности шихт для производства окатышей. В.М. Витюгин, А.В. Витюгин, Н.Н. Бережной, В.И. Смирнов. Бюллетень ЦНИИЧМ, 1973, №23. – С. 29, 30.
15. Разработка технологий для производства железорудных окатышей с высокими металлургическими свойствами : научная монография / Б.П. Юрьев, Н.А. Спирин, О.Ю. Шешуков и др. ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н. Ельцина», Нижнетагильский технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (филиал) УрФУ, 2018. – 172 с.
16. **Бережной Н.Н., Федоров С.А., Бойковец В.Я.** Некоторые теоретические вопросы окомкования железорудных материалов. Сталь, 1987, №3. – С. 13-17.
17. **Hasnek H.A.** Pellet Production Using a Blend of Ores / Mining Eng. 1972, №31. P. 3-12.
18. **Витюгин В.М., Трофимов В.А.** Экспресс-метод определения оптимальной влажности тонкозернистых материалов перед окомкованием. Известия Томского политехнического института. Том 215, 1974. – С. 68, 69.
19. **Берман Ю.А.** Основные закономерности производства окатышей. Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1991. – 184 с.

Рукопис подано до редакції 17.04.2023

УДК 331.43:[622.7:549.6]

О.Є. ЛАПШИН, д-р техн. наук, проф., Г.М. ЯРОШЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ СТАНУ УМОВ ПРАЦІ В ЦЕХАХ ЗБАГАЧЕННЯ ТИТАНО-ЦИРКОНІЄВОЇ РУДИ ВИРОБНИЦТВА ВІЛЬНОГІРСЬКОГО ГМК

Мета. Метою дослідження є визначення стану умов праці та ефективність вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвої руди.

Методи дослідження. Фактичний аналіз умов праці на робочих місцях в цехах збагачення титано-цирконієвої руди. Аналіз літературних джерел з методів визначення шкідливих речовин при збагаченні руд.

Наукова новизна роботи полягає в розробці методик визначення концентрацій шкідливих речовин на робочих місцях та ефективності вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвих руд.

Практична значимість. В даній роботі наведені фактичні величини концентрацій шкідливих речовин при роботі обладнання, мікрокліматичні умови праці в різні періоди року та ефективність вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвих руд, які в подальшому будуть використані при розробці заходів з покращення умов та безпеки праці на робочих місцях.

Результати. В результаті опрацювання науково-дослідницьких матеріалів з розробки заходів боротьби зі шкідливими речовинами, які виділяються під час роботи промислового обладнання, встановлено наявність розбіжностей в методичних джерелах визначення їх концентрацій на робочих місцях, ефективності вентиляції в промислових цехах, зокрема в робочих зонах обслуговуючого персоналу. Недостатньо вивчені умови праці в несприятливі сезонні кліматичні коливання, а відповідно бракує рекомендацій з регулювання вентиляційних режимів під час максимальних навантажень роботи обладнання та в теплий і холодний періоди року.

Приведені вказівки з методів визначення вмісту шкідливих речовин в повітрі робочих зон, рекомендації з визначення метеорологічних умов в промислових приміщеннях, зокрема температури, вологості і швидкості повітря в сезонні періоди року.

Надані відомості з визначення ефективності вентиляції в промислових приміщеннях, які є актуальними для сучасних умов цехів збагачення титано-цирконієвих руд.

Рекомендовані методичні посилання були застосовані при визначенні стану умов праці та ефективності вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвих руд, а на їх підставі даються рекомендації з поліпшення умов праці, у першу чергу, підвищення ефективності вентиляції виробничих приміщень. Результати вимірювань вмісту шкідливих речовин в повітрі і мікроклімату в приміщеннях наведені в таблицях 2 і 3.

Ключові слова: умови праці, повітря, шкідливі речовини, пил, температура, вологість, швидкість, профзахворювання, руда, вентиляція

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. В результаті моніторингу статистичних даних та спостережень у цехах збагачення титано-цирконієвих руд виявлені концентрації пилу на робочих місцях працівників, які перевищують допустимі значення. Виявлено несприятливі мікрокліматичні умови праці особливо в сезонні періоди року. Так, температура повітря в цехах в теплі періоди року значно перевищує допустимі величини, а в холодні періоди року спостерігається температура нижче допустимої. Спостерігається також відхилення величин швидкості повітря в робочих зонах приміщень збагачення руди. Незадовільний стан умов праці з часом призводять до порушень функціонального стану організму, професійних хронічних захворювань працюючих, а також негативно впливає на безпеку і продуктивність праці.

Виходячи з таких обставин встановлення умов праці на робочих місцях та розробка рекомендацій щодо зменшення виділення шкідливих речовин в робочі зони та підвищення ефективності вентиляції цехів збагачення титано-цирконієвих руд є актуальною задачею і потребує додаткових наукових досліджень.

Аналіз досліджень і публікацій. Вивчаючи низку літературних джерел було виявлено, відомості з приводу досліджень умов праці на гірничорудних підприємствах. Так, розкриті основні правові, нормативні та організаційні заходи з виробничої санітарії та безпеки праці у гірничій промисловості [1,2]. Але у цих виданнях відсутні відомості щодо умов праці в цехах збагачення титано-цирконієвих руд та ефективності в них вентиляції.

У роботі з вентиляції промислових підприємств описані санітарно-гігієнічні умови в промислових приміщеннях, приведені методи, за допомогою яких визначаються фізико-хімічні властивості рудникового пилу та наявність шкідливих газів, що утворюються внаслідок розробки кар'єрів, транспортування та збагачення корисних копалин [3]. Разом із цим автори роботи не наводять даних про властивості пилу, утворюваного при збагачуванні титано-цирконієвих руд та ефективності вентиляції в приміщеннях.

В збірнику з лабораторних і практичних робіт з охорони праці цивільної безпеки даються методичні вказівки з практичних робіт стосовно дисциплін «Безпеки життєдіяльності», «Основ охорони праці» і «Безпеки гірничих робіт»[4]. Цей збірник не містить відомостей про шкідливість титано-цирконієвого пилу, немає у ньому рекомендацій також щодо ефективності вентиляції та кондиціонування повітря в приміщеннях.

В інших наукових працях висвітлено основні способи поліпшення умов праці в цехах гірничих підприємств, які більш сучасні або удосконалені [5, 7, 9]:

теплова коагуляція твердих часток у повітряному середовищі при викидах пилу;
очищення повітря в середині аспіраційного укриття перевантажувального вузла.

Підручник за редакцією Левченко О. Г. [8] вміщує у своєму другому розділі, підрозділі щодо повітря робочої зони виробничих приміщень, а саме:

- джерела та оцінка мікроклімату робочої зони;
- джерела та оцінка забруднення повітряного середовища шкідливими речовинами;
- заходи і засоби нормалізації повітря робочої зони.

Подана інформація в підручнику є загально-типовою, тобто несе більш ознайомчий характер, тому не може бути використана саме на виробництві збагачення титано-цирконієвих руд як підґрунтя для захисту здоров'я працюючих.

Автор в своїй праці [10] виклав методологічне забезпечення щодо безпеки життєдіяльності в різних умовах включаючи мирний та воєнний стан, висвітлив джерела небезпек, їх вплив та походження. Подано удосконалені методики з прогнозування та оцінювання обстановки в різних ситуаціях. На практиці застосовувати дані методики не є доцільним на збагачувальному виробництві, що зумовлюється особливостями технологічних процесів, які не були розглянуті в праці.

В працях [2, 6, 11] дуже добре описано основи гігієни праці, висвітлено найбільш вразливі місця щодо безпекової ситуації робочого середовища. Завдяки аналізу виробничої захворюваності стає зрозумілим, що найчастіше потерпають дихальні шляхи та органи дихання, що зумовлюється високим відсотком захворюваності. Проте в цих працях немає відомостей щодо відбору проб в місцях збагачення саме титано-цирконієвих руд, а також аналізу захворюваності в такому виробництві, тому постає подальша наукова задача щодо вирішення цього питання.

Постановка задачі полягають у:

розробці методичних рекомендацій з визначення величин шкідливих речовин, що виділяються при роботі збагачувального обладнання;

визначенні шкідливих речовин, що виділяються та їх концентрації на робочих місцях працюючих;

дослідженні ефективності існуючих систем вентиляції в сезонні періоди року;

розробці рекомендацій з поліпшення умов праці (зменшення шкідливих виділень при роботі обладнання та підвищення ефективності вентиляції в робочих зонах промислових приміщень).

Викладення матеріалу та результати. Збагачувальне виробництво філії «Вільногірський гірничо-металургійний комбінат» представляє собою технологічний комплекс з повним циклом операцій з транспортування і переробки рудних пісків з метою отримання товарних концентратів. Процес збагачення складається з наступних основних технологічних операцій: рудопідготовка і знешламлювання; концентрація колективного концентрату; доводочні операції.

До допоміжних операцій відносяться операції із попереднім грохоченням, зневодненням і сушкою продуктів збагачення при переході від мокрих (гравітаційних) до сухих (електричних і електромагнітних) технологічних операцій.

Встановлена виробнича потужність збагачувального виробництва складає 6,0 млн м³ переробки рудних пісків на рік. Згідно із звітним періодом минулого року збагачувальне виробництво переробило 6219059 тон продуктивних пісків та отримала з них товарних концентратів: циркону – 20164 т/р.; рутилу – 40598 т/р.; ільменіту – 127928 т/р.; дистен-силіманіту – 6329 т/р.; ставроліту – 23279 т/р. У відсотках відповідно: циркону – 9,2%; рутилу – 18,56%; ільменіту – 58,6%; дистен-силіманіту 2,98%; ставроліту – 10,66% (не видно титану). Хвости відділення одержання колективного концентрату представлені кварцовими пісками, які направляються на ділянку отримання формувальних пісків. Підприємство є постачальником кварцового піску, для виготовлення різних марок скла табл. 1.

Піски марки ВС використовуються для виробів з високою світло-прозорістю. Усі основні однойменні концентрати мають у своєму хімічному складі SiO₂ – діоксид кремнію, найбільше в цирконовому – 32 % та ставролітовому – 28 %.

Щодо хімічного складу повітря виробничого простору, наведеного в табл. 2, відмічається що концентрація шкідливих забруднюючих речовин в різних місцях не однакова. Такі дані зумовлюються різними видами технологічних

Таблиця 1
Хімічний склад кварцового піску
різних марок у відсотках, %

Склад	ВС-30-В	ВС-050-1
SiO ₂ , не більше	98,5	98,5
Al ₂ O ₃ +TiO ₂ , не менше	0,6	0,6
Fe ₂ O ₃ , не більше	0,03	0,05
Волога, не більше	0,5	<0,1

процесів: сухих, мокрих, попереднього грохочення, транспортування конвеєрним транспортом тощо.

Таблиця 2

Концентрація пилу та інших шкідливих речовин в повітрі виробничого середовища

Речовини	Вміст речовини, мг/м ³	ГДК, мг/м ³	Клас небезпеки
Пил нетоксичний (фіброгенної дії)	7 – 11,5	10	3
Азоту оксиди	2	5	4
Ангідрид сірчистий(порошковий)	0,8	10	4
Вапняк	3,5 – 7,2	6	3
Диоксид вуглецю	200 – 450	800	4
Титан та його діоксид	0,8 – 3,7	10	4
Циркон, цирконію діоксид	3 – 5,5	6	4
Диоксид кремнію кристалічний при: >70% вмісту пилу	1 – 1,15	1	3
10-70% вмісту пилу	1,15 – 2,2	2	3
Силікати: азбестоцемент, цемент, апатит, глина, тальк, слюда, мусковіт	2,5 – 4 3 – 4	6 4	4 4

Згідно хімічного аналізу бачимо, що група диоксиду кремнію, вапняк та звичайний пил фіброгенної дії мають вміст на рівні ГДК і вище, що спричиняє негативний вплив на організм людини. В результаті перебування впродовж 8 – 12 годин робочої зміни, працівники мають високий ризик отримати різні професійні захворювання дихальних шляхів та навіть шлунково-кишкового тракту (табл. 3).

Таблиця 3

Показники виробничих факторів робочого середовища

Фактори виробничого середовища і трудового процесу	Нормативне значення (ГДК)	Фактичне значення, °C	Тривалість дії фактора, % за зміну
Температура повітря, °C влітку взимку	17-25	6 – 29 до 29	70 – 85
Швидкість руху повітря, м/с	не більше 0,3	0,07 – 0,33	70-85
Вологість повітря, %	75	46 – 77	70-85

В роботах вітчизняних і зарубіжних авторів, які вирішують проблеми поліпшення умов праці на виробництві, підкреслюється важливість удосконалення методичних рекомендацій щодо проведення досліджень і випробувань, які здійснюються на підприємствах [6-10]. Серед дослідницьких методів, які використовувалися в роботі були наступні:

- методи відбирання проб повітря для його аналізу;
- методи визначення концентрацій пилу у повітрі;
- способи визначення ефективності вентиляції в цехах збагачення.

Дослідження забрудненості повітря і аналіз властивостей пилу проводилося за методикою розробленою в КНУ з частковим її зміненням в залежності від особливостей виробничого процесу [1]. Так, вміст пилу в повітрі здійснювався на робочих місцях і робочих зонах для встановлення забруднення повітря і відповідності її санітарним нормам та оцінки ефективності заходів знепилення, які застосовуються.

Відбирання проб повітря здійснювався в робочій зоні на відстані не більше 1- 1,5 м від робочого місця на висоті 1,5 м від підлоги. У випадку коли робоче місце не було фіксовано, відбирання проб проводилося у точках робочої зони, у яких працюючий перебуває більше 50 % зміни. Відбирання проб повітря, що надходило в приміщення проводилося у відкритих проїздах, дверях, в місцях його надходження в трубопроводи. З метою визначення забрудненості повітря в приміщенні при роботі обладнання у визначених місцях відбиралося не менше 5 проб. У випадках коли різниця між результатами вимірювань перевищувала 30 %, тоді вимірювання повторювалися.

Проби відбиралися за допомогою ежекційного респіратора АЕР-4 і фільтрів АФА за межами зон пливу викидів стисненого повітря і струменів, що виходять з різних апаратів, повітроп-

роводів тощо. Результати вимірів вмісту пилу в повітря приводилися за нормальних умов температури, атмосферного тиску і відносної вологості.

Запиленість повітря визначають масовим та лічильним методами, а також експрес-методами, що базуються на: зменшенні сили світлового потоку, який проходить через запилене повітря; вимірюванні електричного заряду пилових часток (електроіндукційний метод); ослабленні потоку α - або β -часток при їх проходженні через запилене повітря або через фільтр, на якому цей пил був осаджений (радіоізотопний метод). Найбільш поширеними приладами для експрес-вимірювання запиленості є ІЗВ-1, ІКП-1 та ін.

Оскільки нормування вмісту пилу в повітрі здійснюється в масових одиницях вимірювання ($\text{мг}/\text{м}^3$, $\text{г}/\text{м}^3$), тому за основу був прийнятий масовий метод, який виконувався згідно методичних вказівок [2]. Сутність цього методу полягає в наступному. Підбираються фільтри з високим коефіцієнтом очищення, наприклад ФГП-15 або АФА. Після визначення маси чистого фільтра він поміщається в алонж (патрон-пилоприймач). Алонж з фільтром приєднується до аспіратора через витратомір. Аспіратор підбирають таким чином, щоб він забезпечував необхідний тиск і витрату повітря. В якості аспіратора використовувався битовий пилосос.

При відборі проб повітря всмоктувальний отвір пило приймального патрона спрямляється назустріч вентиляційному струменю. Важливим є те, що при відборі проб швидкість всмоктування повітря в алонж дорівнювалася швидкості повітряного потоку, тобто виконувався принцип ізокінетичності. Тому в місцях відбору проб, де швидкість потоку перевищувала 1,5 м/с, алонж обладнувався спеціальною насадкою.

Час відбору проби визначався ступенем запиленості повітря і був таким, щоб маса пилу була не менше 5 % маси фільтра. Після відбору проби фільтр знову зважувався. Концентрація пилу в повітрі визначалася за формулою

$$C = (m_k - m_n) / V,$$

де m_k і m_n – відповідно кінцева і початкова маси фільтра, мг; V – об'єм повітря, яке пройшло через фільтр, м^3 .

Згідно цієї методики були проведені відбирання проб повітря для визначення його забруднення в приміщеннях цехів збагачувальної фабрики, а визначення маси чистих і забруднених фільтрів проводилося в лабораторії Криворізького національного університету (КНУ [2]).

Результати промислових і лабораторних досліджень показують, що концентрації пилу в приміщеннях збагачувальних цехах свідчать, що група діоксиду кремнію, вапняк та звичайний пил фіброгенної дії мають вміст на рівні ГДК і вище, що підтверджує актуальність визначення ефективності вентиляційних установок в приміщеннях збагачувального цеху, яка здійснюється отриманням об'єктивних даних з температури, вологості та рухомості повітря в робочій зоні цеху, а також вміст в ньому пилу і шкідливих газів (санітарно-гігієнічних умов) та порівняння їх з нормативними величинами.

В процесі випробування виявляється відповідність проекту діючої вентиляційної установки, визначається її продуктивність, швидкість руху повітря в трубопроводах, тиск, наявність підсмоктувань, якість монтажу. Особлива увага поділяється окремим елементам вентиляційної системи: фільтру для очищення повітря, засобам його кондиціонування, регулювання вентиляційних режимів і шумові характеристики тощо. Звертається увага на ефективність природної вентиляції, при цьому перевіряється кількість і площини витяжних ліхтарів, а також всіх вікон та дверей, що відкриваються, джерел виділення тепла. Одночасно визначаються місця вимірювання температури, вологості і швидкості повітря в приміщеннях в літній та зимовий періоди року.

Для ефективного функціонування вентиляційної системи розраховуються її аеродинамічні параметри у такій послідовності:

1. Складається вентиляційна система, на ділянках позначається необхідна кількість повітря.
2. Приймається швидкість руху повітря 4-6 м/с на кінцевих ділянках, 6-8 м/с у повітроводах, приєднаних до кінцевих ділянок, 8-10 м/с у повітроводах, не пов'язаних з кінцевими ділянками і віддалених від вентилятора, 10-13 м/с на ділянках наближених до вентилятора, але не приєднаних до нього, 14-15 м/с на ділянках, з'єднаних безпосередньо з вентилятором.
3. Визначаються розміри діаметрів повітроводів, які остаточно приймаються після зіставлення з діаметрами уніфікованих повітроводів і трійників.

4. Орієнтовну (приблизну) площу поперечного перерізу F , м^2 визначають за формулою

$$F = Q_d / 3600 v_{\text{рек}},$$

де Q_d – розрахункова кількість повітря на окремих ділянках вентиляційної системи, $\text{м}^3/\text{год.}$; $v_{\text{рек}}$ – рекомендована швидкість руху повітря, м/с .

5. Фактична швидкість повітря v_ϕ , визначається з урахуванням площі перерізу прийнятого стандартного повітроводу $v_\phi = Q_d / 3600 F_\phi$

6. Після визначення v_ϕ на ділянках, розраховуються питомі витрати тисків на тертя ΔP_n ,

$$\Delta P_n = \lambda \cdot P_o / d,$$

де P_o – динамічний тиск, Па .

7. Визначається втрата тиску на тертя $\Delta P_{\text{тр}}$ за формулами $\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_n l$; $P_o = \rho v^2 / 2$.

Далі приймаються коефіцієнти місцевого опору на окремих ділянках системи ζ , а потім обчислюються їх суми; визначають динамічний тиск P_o , втрати тиску на місцеві опори $\Delta P_{\text{м.о.}}$ за формулою $\Delta P_{\text{м.о.}} = P_o \sum \zeta$, і повні втрати тиску на ділянках ΔP .

8. Вибір вентилятора здійснюється за їх характеристиками: продуктивністю та напором (розрідженням).

Продуктивність вентилятора $Q_{\text{вент.}} = k_n Q_c$, $\text{м}^3/\text{год.}$ приймають за розрахунковою кількістю повітря для системи, де k_n – поправочний коефіцієнт; $k_n = 1,1$ – для повітроводів з металу при загальній їх довжині більше 50 м; $k_n = 1,15$ – для неметалевих труб великої протяжності; Q_c – розрахункова загальна кількість повітря у вентиляційній системі, $\text{м}^3/\text{год.}$

Втрати тиску, які повинен компенсувати вентилятор визначаються за формулою

$$P_{\text{вент.}} = k_p \Delta P_z$$

де $k_p = 1,1$ – коефіцієнт резерву; ΔP_z – загальні втрати тиску (у вентиляційній системі і вентиляційному обладнанні), Па .

Потужність, що використовується на валу електродвигуна визначається за формулою

$$N_e = Q_{\text{вент.}} \cdot P_{\text{вент.ф}} / 3600 \cdot \eta_e \cdot \eta_n,$$

де $P_{\text{вент.ф}}$ – фактичний тиск, який створюється вентилятором, Па ; η_e – ККД вентилятора; η_n – ККД передачі; $\eta_n = 1$ – при безпосередньому з'єднанні вентилятора з електродвигуном; $\eta_n = 0,95$ – при клиноременній передачі.

Установочна потужність електродвигуна з урахуванням необхідного запасу приймається за формулою $N_p = k_z N_e$, де k_z – коефіцієнт запасу, який залежить від потужності на валу електродвигуна; $k_z = 1,05-1,20$ – для осьових вентиляторів; $k_z = 1,1-1,5$ – для відцентрових вентиляторів.

У якості прикладу надається розрахунок системи місцевої відсмоктувальної вентиляції, наведену на рис. 1.

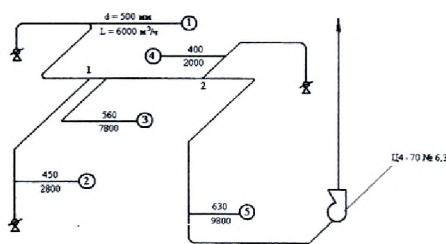


Рис. 1. Схема відсмоктувальної вентиляції

За відомими кількостями повітря на ділянках 1, 2, 4 визначають кількість повітря в усіх ділянках системи (табл. 4). Коефіцієнти ζ приймають з довідника.

Приймаємо швидкості руху повітря на ділянках з табл. 4, ці швидкості вказані в дужках. За номограмою у довіднику намічаємо діаметри повітроводів та уточнюємо їх при виборі трійників. Для ділянки 2, наприклад, діаметр 500 мм замінено на 450 мм. За прийнятими діаметрами повітроводів розраховуємо дійсні значення швидкості. Приймаємо питомі витрати тиску на тертя за номограмою та визначаємо витрати на тертя по всій ділянці. Приймаємо коефіцієнти місцевого опору. Для ділянки 1 та 2, що належить трійнику 1, ζ_n і ζ_o залежать від відношень: площі проходу до площі ствола трійника $F_n/F_c = 1$, витрат у відводі до витрат у стволі $Q_1/Q_3 = 0,64$, площі відводу до площі ствола $F_d/F_c = 0,65$. З урахуванням екстраполяції по F_n/F_c $\zeta_n = 1,5$, $\zeta_o = 0,3$. Для ділянок 3 та 4, що входять до складу трійника 2, в залежності від $F_n/F_c = 0,79$, $Q_4/Q_5 = 0,2$ та $F_d/F_c = 0,4$ $\zeta_n = 0,34$, $\zeta_o = -1,7$.

Необхідні витрати повітря може задовольнити вентилятор Ц4-70 № 6,3. На вході до вентилятора не треба встановлювати перехідні пристрої, а дифузор за вентилятором приймаємо з кутом розкриття 15° , що дає $\zeta_o = 0,21$. Розраховуються витрати тиску на місцеві опори та визначаються втрати тиску в циклах за формулою

$$\Delta P_{\Sigma} = \Sigma \Delta P_{\Delta \Sigma} + P_{\Delta \Sigma},$$

де $\Sigma \Delta P_{\Delta \Sigma}$ – втрати тиску на ділянках циклу, Па; $P_{\Delta \Sigma}$ – динамічний тиск повітря, Па, що випускається із вентиляційного пристрою циклу, що розглядається.

Таблиця 4

Розрахунок повітроводів вентиляційної системи

№ діл.	$Q_{\Delta \Sigma}$, тис.м ³ /г	d , мм	l , м	Елементи та пристрої системи	v , м/с	$P_{\Delta \Sigma}$, Па	Втрати тиску на тертя		ξ	$\Delta P_{\Delta \Sigma}$, Па	ΔP , Па
							ΔP_m , Па	$\Delta P_n \cdot l$, Па			
1	6.0	500	15	Зонт, дросель-клапан, 3 відводи 90°, трійник, повітровід	(4) 5,65	19,23	0,55	8,25	0,17-0,6 1,0-1,5 3,32	63,85	72,1
2	2.8	450	18	Зонт, дросель-клап., відвід 90°, трійник, повітровід	(6) 4,89	14,41	0,55	9,9	0,17-0,6 0,35-0,3	20,46	30,36
3	7.8	560	26	Трійник, повітровід	(8) 8,81	46,76	1,3	33,9	0,34-0,34	15,9	49,8
4	2.0	400	10	Зонт, дросель-клап., 2 відводи 90°, трійник, відвід, повітровід	(4) 5,41	11,72	0,51	5,1	0,17-0,6 0,7-1,7 0,23	-2,7	2,4
5	9.8	630	13	4 відводи 90°, дифузор, витяжна шахта	(10) 8,73	45,87	1,33	17,4	1,4-0,21 1,3	133,45	150,9

Наукова новизна запропонованої статті полягає в обґрунтуванні актуальності умов праці при збагаченні титано-цирконієвих руд та надані практичні рекомендації щодо підвищення ефективності вентиляції в приміщеннях, на що будуть спрямовані наступні дослідження.

Висновки та напрямок подальших досліджень. У роботі надані методичні рекомендації з визначення шкідливих чинників при збагаченні титано-цирконієвих руд та наведені концентрації вмісту пилу в повітрі.

Установлено недостатню ефективність вентиляції приміщень та наведено приклад для розрахунку аеродинамічних параметрів вентиляційної системи, дотримання яких дозволить покращити умови праці в робочих зонах цеху.

Список літератури

1. Лапшин О. Є. Охорона рудникової атмосфери : навч. посібник / О. Є. Лапшин, О. О. Лапшин, Д. О. Лапшина. – КР : КНУ, 2017. – с. 31-80.
2. Лапшин О. Є. Охорона праці в гірництві : Підручник / О. Є. Лапшин, О. О. Лапшин, Д. О. Лапшина. – КР : КНУ, 2018. – 256 с.
3. Лапшин О. Є. Вентиляція промислових приміщень : підручник / О. Є. Лапшин, О. О. Лапшин, М. В. Худик. – Кривий Ріг : КНУ, 2022. – с.101 – 105.
4. Лапшин О. Є. Збірник лабораторних і практичних робіт з охорони праці та пильної безпеки. / О. Є. Лапшин, О. О. Лапшин, О. В. Пищикова та ін. - Кривий Ріг. Вид. КНУ. 2021. – С.101 – 105.
5. Нестеренко О. В. Тепловая коагуляция твердых частиц в воздушной среде при выбросах пыли промышленными предприятиями / О. В. Нестеренко, В. Н. Назаренко, М. В. Домничев, И. С. Радченко, О. Б. Настич // Гірничий вісник. – 2013. – Вип. 96. – С. 199–202. – Библиогр.: с. 202.
6. Гурін А. О. Дистанційний відбір проб повітря при проведенні виробок / А. О. Гурін, В. А. Шаповалов, А. В. Давидов // Вісник Криворізького національного університету. – 2012. – Вип. 31. – С. 126–128.
7. Шаповалов В. А. Очистка воздуха внутри аспирационного укрытия перегрузочного узла / В. А. Шаповалов // Вестник Криворожского национального университета: сб. науч. стир. – Кривой Рог, 2018. – Вып. 46 – С. 118–122. – Библиогр.: с. 122
8. Левченко О. Г. Охорона праці та пильний захист : Підручник / О. Г. Левченко, О. І. Полукаров, В. В. Зацарний, Ю. О. Полукаров, О. В. Землянська. За ред. О. Г. Левченка. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 420 с.
9. Shapovalov V. A. The improvement of working conditions at the industrial workshops of mining enterprises / V. A. Shapovalov // Innovative development of resource-saving technologies of mineral mining and processing. 2nd international scientific and technical Internet conference (Petroșani, Romania, November 15, 2019) : book of abstracts. – Petroșani : Universitas Publishing, 2019. – P. 125–127.
10. Демиденко Г. П. Безпека життєдіяльності. навч. посіб./Г. П. Демиденко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2008. – 300 с.
11. Швагер Н.Ю. Основи гігієни праці / Н.Ю. Швагер, Т.А. Комісаренко. – КР. – КНУ. – 2017.

12. Швагер Н. Ю. Аналіз професійної захворюваності на гірничодобувних підприємствах Кривбасу /Н. Ю. Швагер, Д. П. Заїчна // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. –Кривий Ріг, 2018. – Вип. 46. – С. 99–104. – Бібліогр.: с. 104

Рукопис подано до редакції 18.04.2023

УДК658.562.012.7.681.26

А.А. АЗАРЯН, д-р техн. наук, Н. С. КРАПИВНИЙ, магістрант
Криворізький національний університет

ГРАВІТАЦІЙНИЙ МЕТОД ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ВМІСТУ ЗАЛІЗА В ПОДРІБНЕНІЙ ГІРНИЧІЙ МАСІ

Метою дослідження - є дослідження можливості оперативного контролю вмісту корисного компонента в окислених гематитових рудах в діапазоні від 30 до 68 відсотків вмісту заліза з гранулометричним складом -3мм.

Метод дослідження – гравітаційний.

Наукова новизна – встановлення стійкого кореляційного зв'язку між питомою вагою та вмістом заліза у подрібненій руді, а також використання у поєднанні нечіткої логіки, нейронних мереж для виявлення параметрів залежності і отримання максимально точного результату, та гравітаційного методу. Перевагою запропонованого методу в порівнянні з іншими геофізичними методами є швидкість та вартість експрес аналізу однієї проби, що приблизно на порядок нижче від існуючих. Крім того, цей метод не вимагає використання радіоактивних джерел випромінювання, що дозволяє спростити процедуру проведення аналізу та не потребує отримання дозволів та серйозного контролю за такого типу обладнанням, в свою чергу це на порядок підвищує безпеку та охорону праці на підприємстві.

Практичною значимістю запропонованого пристрою у гірничодобувному виробництві України є те, що він дозволить максимально швидко отримувати результати аналізу, знизить вартість аналізу однієї проби, та знизить втрати руд та засмічення підірваної гірничої маси, що розширить сировинну базу країни.

Результати проведених лабораторних досліджень показали, що за всіма вимогами оперативного контролю вмісту заліза в гематитових рудах - гравітаційний метод не поступається відомим геофізичним методам, таким як ядерно-фізичні, магнітометричні, ультразвукові, акустичні, радіометричні та інші, залежно від фізико-механічних властивостей мінералів. У статті наведено основні моменти роботи такого методу та вимоги до використання експрес-аналізу гематитових руд гравітаційним методом. Також представлена блок-схема алгоритму роботи такої системи та основні її компоненти, як електронні ваги, прес, манометр, кювета з пробой, персональний комп'ютер. В результаті досліджень також було розроблено ПЗ, яке забезпечує стабільну роботу системи та виконує усі обчислення та перетворення, його основні характеристики також було описано в даній статті.

Ключові слова. Питома вага, нейронні мережі, штучний інтелект, нечітка логіка, гравітаційний, гематитовий, гранулометричний, ущільнення.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Для оперативного контролю якості мінеральної сировини в гірничорудній промисловості залежно від фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей, застосовуються різні методи, такі як: електричні; ядерно-фізичні; магнітометричні; ультразвукові; акустичні; радіометричні та інші.

Традиційні методи мають як позитивні, так і негативні характеристики. В даний час відсутній універсальний метод оперативного контролю за якістю мінеральної сировини. При виборі методу оперативного контролю якості мінеральної сировини крім фізико-хімічних та фізико-механічних властивостей аналізують точність, простоту експлуатації, час та вартість аналізу однієї проби, техніку безпеки та ін.

При виборі методу контролю якості руди, у всіх існуючих способах оперативного контролю вмісту мінеральної сировини, на перше місце ставиться точність результату аналізу, так як це впливає як на ціну товарної руди, так і на конкурентоспроможність. Основними впливовими чинниками на точність оперативного контролю масової частки заліза в окислених рудах є: повний речовий склад руди; гранулометричний склад; вологість; температура навколишнього середовища; щільність проби.

Точний облік цих чинників дасть можливість визначити масову частку заліза в окислених рудах Кривбасу.

Аналіз досліджень і публікацій. За цією темою в технічній літературі є лише кілька публікацій, щодо контролю вмісту заліза за допомогою об'ємної ваги [6].

Постановка задачі. Для зниження собівартості оперативного контролю якості руд чорних металів шляхом зменшення вартості аналізу та часу проведення вимірювань необхідно враховувати всі фактори, що впливають на точність контролю з використанням нечіткої логіки.

Викладення матеріалу та результати. Загальний вигляд функціональної схеми методу наведено на рис.1.

Оскільки запропонований спосіб є непрямим методом контролю якості мінеральної сировини, то для встановлення можливості застосування в умовах гірничодобувного та переробного виробництва відбираються представницькі проби, в родовищі, де планується експлуатувати пристрої. Представницькі проби по черзі заповнюють кювету 3, ущільнюють за допомогою гідравлічного преса 1 під навантаженням 2т (за показниками манометра 2), зважують на точних електронних вагах 4. Після статистичної обробки результатів дослідження отримують еталонувальні залежності між вхідними та вихідними даними. Далі, зразкові залежності, записують в пам'ять персонального комп'ютера, розробляють програмне забезпечення, тестують і пристрій готовий до роботи.

Рис.1 Загальний вигляд функціональної схеми: 1 - гідравлічний прес; 2 – манометр; 3 - кювета з пробой; 4 - точні електронні ваги; 5 - монітор персонального комп'ютера

Блок схема алгоритму роботи ГІС-1 наведено на рис.2.

Принцип роботи пристрою полягає в наступному.

Після авторизації користувача та ініціалізації програмного забезпечення вимірювані проби, що по черзі заповнюються кюветами, ущільнюються за методикою наведеною вище, і ставляться на ваги. При цьому використовуючи еталонувальні залежності програмне забезпечення обчислює зміст корисного компонента та відображає на моніторі персонального комп'ютера. Результат обчислення Fe, дата та номер проби записуються до бази даних. У процедурі оперативного контролю за якістю мінеральної сировини використано «клієнт-серверну» технологію. Далі, оновлюється журнал та отримана інформація по мережі передається клієнту. Завдяки використанню бази даних, клієнт завжди може переглянути усі результати замірів та проаналізувати їх. В поточній версії ПЗ також доступна можливість виборки результатів аналізів за певний проміжок часу та / або певного користувача.

Якщо проба на електронних вагах відсутня, або завершується процедура контролю якості, або пристрій перебуває в режимі очікування.

На рис.3 наведено загальний вигляд зважування ущільненої проби з кюветою. Після ущільнення проби під навантаженням 2т. Проба разом із кюветою 3 зважується. Показання ваги в грамах передається на персональний комп'ютер, де за спеціальною програмою обчислюється вміст заліза та відображається на моніторі 5. Подальші процедури виконуються згідно з алгоритмом роботи ГІС-1

З метою підвищення точності оперативного контролю змісту корисного компонента досліджується можливість використання штучного інтелекту у поєднанні з нечіткою логікою. При цьому, за результатами лабораторних досліджень, для нечіткої логіки формуємо базу знань та функцію приналежності, а для штучного інтелекту визначаємо вхідні дані.

Весь діапазон досліджень вмісту корисного компонента можна розділили на 3 ділянки. Кожна ділянка характеризується діапазоном змін вмісту заліза, двома коефіцієнтами рівняння(a_i , b_i), похідної функції(G) та чутливістю(K).

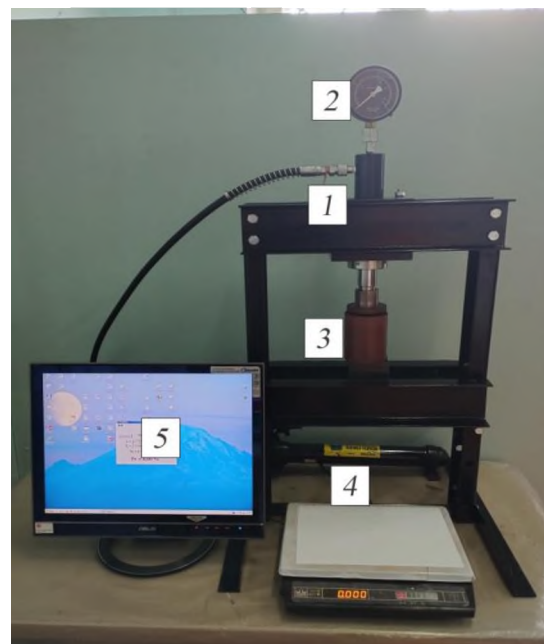




Рис.2. Блок схема алгоритму роботи ГПС-1

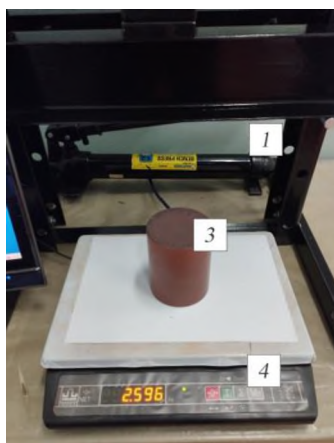


Рис.3 Загальний вид зважування ущільненої проби з кюветою

Таблиця база знань наведена нижче.

За результатами лабораторних досліджень отримано аналітичні залежності для трьох діапазонів вмісту заліза у руді, що дала можливість скласти таблицю бази знань (табл. 1).

З метою підвищення точності оперативного контролю вмісту заліза в товарній руді передбачається використання нейронно-нечітких мереж та штучного інтелекту. Вхідними параметрами для нейронних мереж та штучного інтелекту визначено: вага ущільненої проби; ціна одного відсотка в грамах; середнє значення діапазону вмісту заліза.

В якості мови програмування використовується JavaScript, що дозволяє досягти максимальної гнучкості та адаптувати готовий продукт до різних платформ.

Під діапазон, %	ai	bi	Гradient, %/гр, G	Чутливість, гр/%, K
Fe1 30-50	0,0145	22,189	0,025	6,5
Fe2 51-60	0,0534	51,056	0,045	20,0
Fe3 61-70	0,04	23	0,05	25,7

Для отримання даних про поточні проби руди будуть використані стандартні елементи візуальних інтерфейсів, такі як поля введення, кнопки, списки, що випадають.

Для візуалізації розрахунків будуть використані таблиці, а також побудовані на даних таблиці інтерактивні графіки.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Результати проведених лабораторних досліджень показали, що середньоквадратичне відхилення генеральної вибірки змінюється в діапазоні від 0,57 до 0,78.

З метою підвищення точності оперативного контролю вмісту заліза в товарній руді передбачається використання нейронно-нечітких мереж та штучного інтелекту.

Вхідними параметрами для нейронних мереж та штучного інтелекту визначено: вага ущільненої проби; ціна одного відсотка в грамах; середнє значення діапазону вмісту заліза.

Список літератури

1. Азарян А. А., Експрес-аналіз гематитових руд гравітаційним методом// А.А. Азарян, В.А. Азарян, А.М. Гриценко, та ін. Науково-технічний вісник «Гірничий вісник». – 2022 - №110 – с. 150-154. (Фахове видання категорії «Б» DOI: 10.31721/2306-5435-2022-1-110-150-154)
2. Azarian, A. A., Azarian, V.A. (2020). Geophysical methods for controlling the useful component content as the basis for the quality management system at mining and processing enterprises. Journal of Geology, Geography and Geoecology, 29(1), 3-15
3. Вілкул Ю.Г., Голярчук Н.И. Підвищення якості залізорудної сировини – основа виживання гірничорудних підприємств в умовах конкуренції. У збірці «Якість мінеральної сировини», Кривий Ріг, 1999
4. Р.С. Азарян, І.П. Васильчук, Е.В. Грібова. Вплив якості залізняку на фінансові показники діяльності залізорудних підприємств. У сб. «Качество мінерального сир'я», Кривий ріг, 1999
5. Г.В. Константинов. «Разработка системы управления якістю залізорудної сировини при переробці. Автореферат дисертації Кривий ріг, 2000
6. А.А. Темченко. «Стабілізація якості залізорудної сировини із застосуванням засобів оперативного контролю в кар'єрах. Автореферат дисертації, Кривий ріг, 1998 г.
7. Мінералогія Криворізького басейну, Київ, Наукова думання, 1977
8. Василенко, В.Є. Дослідження впливу вологості на точність контролю якості залізорудної сировини гамма-гамм методом. (). Збірник "Якість мінеральної сировини", Кривий Ріг, 2002, 230-237
9. Kozhevnikov, D.A., Khatmullin, I.Ph. (1990). A Method of Geometrical Factors in the Theory and Interpretation of Formation Density Logging Data. Nucl. Geophys. (4), 413 - 424
10. Belousov M.P., Gorbunov, M.A., Dudin, S.V., Ignat'ev, O.V., Morozov, S.G., Pulin, A.A. Analitika i kontrol', Portable scintillation gamma spectrometer STARK-01, 15, 429-438.

Рукопис подано до редакції 20.04.2023

УДК 622.271.4

Л.О. ШТАНЬКО, канд. техн. наук, провідний науковий співробітник,
В.І. АНТОНІК, канд. біол. наук, провідний науковий співробітник,
І.В. БАРАНОВ, канд. техн. наук, старший науковий співробітник,
Науково-дослідний гірничорудний інститут Криворізького національного університету

ВИЗНАЧЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ СКЛАДУВАННЯ ОКИСЛЕНИХ КВАРЦИТІВ ПРИ ПОДАЛЬШІЙ РОЗРОБЦІ КРУТОСПАДНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ РОДОВИЩ НА ПРИКЛАДІ КАР'ЄРУ № 3 ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»

Мета. Видобуток залізистих кварцитів відкритим способом супроводжується величезними обсягами виймання розкривних порід. До складу порід розкриву входять окислені кварцити, які необхідно складувати окремо з метою їх використання у якості залізорудної сировини в майбутньому. Однією з умов підтримання продуктивності кар'єру за рудою є своєчасне, у необхідному обсязі, виймання розкривних порід. Для її виконання потрібна наявність або ство-

рення вільних відвальних ємностей, а також визначення технології подальшого розміщення порід розкриття у відповідності кращім доступним технологіям і методам управління, які відомі на сьогодні.

Методи досліджень. Для досягнення зазначеної мети у роботі виконано аналіз наукових досягнень і практичного досвіду з розміщення та складування розкривних порід залізрудних кар'єрів. Також проаналізовано попередні проектні рішення, які пов'язані з можливим збільшенням продуктивності кар'єру за рудою та підтримання її на заданому рівні. Використані методи технологічної та економічної оцінки можливостей з подальшого складування окислених кварцитів при розробці Валявкінського родовища.

Наукова новизна, виконаних у роботі досліджень, полягає в подальшому розвитку теорії планування відвальних робіт при відкритому способі розробки залізрудних родовищ, що дозволяє враховувати конкретні гірничо-технологічні умови роботи кар'єрів і відвалів та підвищити їх ефективність.

Практична значимість. Враховуючи гірничо-технологічні умови, які склалися при відпрацюванні кар'єрів, можна визначити кращу технологічну схему, оптимальний варіант розміщення розкривних порід (окислених кварцитів), що дозволить підвищити ефективність видобутку залізрудної сировини та техніко-економічні показники роботи гірничовидобувного підприємства в цілому.

Результати. Запропонована технологічна схема розширення тимчасового складу окислених кварцитів на борту кар'єру та на території ліквідованої шахти. Тобто буде використовуватися територія земельних площ, яка вже порушена гірничими роботами. При впровадженні технологічної схеми складування окислених кварцитів можливо значно знизити відстань транспортування окисленої руди, знизити негативний вплив на оточуюче середовище без відчуження додаткових сільськогосподарських земельних площ. При цьому є можливість підтримання продуктивності кар'єру за рудою на найближчу перспективу.

Ключові слова: кар'єр, окислена руда, відвал, земельні площі, технологія, параметри, гірничі обладнання, технологічні показники.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Гірничо-металургійний комплекс є однією з складових основ економічного потенціалу України. Основним постачальником залізрудної сировини цього комплексу є гірничо-збагачувальні комбінати (ГЗК), які здійснюють видобуток бідних залізних руд відкритим способом. Необхідність вилучення великих обсягів розкривних порід є характерною особливістю цього способу та потребує значних витрат на їх розміщення у відвалах.

З початку розробки крутоспадних залізрудних родовищ виробнича потужність кар'єрів за рудою, як правило, встановлювалася максимальною за гірничими можливостями. Тому освоєння цих родовищ виконувалося відразу по всій площі з великою інтенсивністю розвитку гірничих робіт у глибину. Це зумовило розміщення розкривних порід у зовнішніх відвалах та порушення великих земельних площ як при відпрацюванні кар'єрів, так і при формуванні зовнішніх відвалів. У загальному обсязі розкривних порід значну частину займають кондиційні окислені кварцити, які будуть слугувати залізрудною сировиною в майбутньому.

На даний час глибина кар'єрів, що розробляють крутоспадні залізрудні родовища, перевищує 300 м. Стан гірничих робіт у кар'єрах характеризується постійним збільшення їх глибини, а відпрацювання кар'єрів – складними гірничотехнічними умовами. Необхідно зауважити, що у переважній більшості відвали за своєю основою вже займають проектну площу та вичерпують можливості подальшого розміщення порожніх порід. Тобто основною проблемою на сьогодні є те, що практично всі гірничовидобувні підприємства зазнають дефіциту відвальних ємностей для розміщення порожніх порід. Важливість проблеми посилюється ще й тим, що кондиційні окислені кварцити, які віднесені до розкривних порід, повинні розміщуватися окремо.

Аналіз досліджень та публікацій. Близько 90% потреб металургійних підприємств України забезпечують гірничо-збагачувальні комбінати Кривбасу. При проектуванні відкритих гірничих робіт одним із головних питань є раціональне розміщення розкривних порід, визначення параметрів відвалоутворення, а також наслідків екологічного впливу на навколишнє середовище. Розвиток відкритого способу розробки родовищ корисних копалин спричиняє значні порушення сільськогосподарських угідь. У проведених дослідженнях [1] було встановлено вплив основних параметрів і схем зовнішнього відвалоутворення на ефективність використання відведених земельних площ. При розміщенні розкривних порід у відвалах важливу роль відіграє визначення стійкого стану відвального масиву та його контроль. Особливість порушення стійкості відвалів обумовлена наявністю критичних деформацій гірських порід у зоні роботи гірничого обладнання. На основі досліджень стану стійкості бортів, гранулометричного складу, міц-

ності розкривних порід та вивчення режимів відвалоутворення були запропоновані способи керування стійкістю, методи контролю та можливості збільшення ємності відвалів [2-9].

На даний час все більше у наукових працях висвітлюються питання, які пов'язані з визначенням технологій складування некондиційної сировини та формуванням техногенних родовищ [10-13]. Зокрема це стосується визначення перспектив видобутку, складування та подальшої переробки окислених руд.

Постановка задачі. Криворізькі залізрудні родовища містять близько 50 млрд тонн окислених залізистих кварцитів. Їх переробка повинна була здійснюватися на Криворізькому гірничо-збагачувальному комбінаті окислених руд, будівництво якого було не закінчено, а на теперішній час його завершення ускладнюється фінансовою кризою. Тому на кожному ГЗК постійно виникає необхідність окремого складування окислених руд. Основною метою роботи є визначення можливостей подальшого складування окислених кварцитів, порядку їх відсіпання, технічних, технологічних рішень і техніко-економічних показників.

Викладення матеріалу та результати. ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (ПАТ «АМКР») – промислове підприємство з видобутку та переробки залізної руди. До його складу входять гірничо-збагачувальне, металургійне, прокатне, коксохімічне виробництва, а також шахтоуправління з підземного видобутку залізистих кварцитів. У свою чергу гірничо-збагачувальне виробництво містить у собі кар'єри, відвали, збагачувальні фабрики, хвостове господарство, об'єкти транспортного, енергетичного, ремонтно-допоміжного та інших господарств. Основними видами товарної продукції є залізрудний концентрат та агломерат.

Сировинною базою ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є запаси залізистих кварцитів Новокриворізького та Валявкінського родовищ, що розробляються кар'єрами № 2-біс та № 3.

Кар'єр № 3 рудоуправління Гірничого департаменту (РУ ГД) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» розробляє запаси Валявкінського родовища корисною копалиною якого є неокислені залізисті кварцити IV залізистого горизонту. При видобутку корисної копалини, крім пустих порід, вилучаються значні обсяги окислених кварцитів, які передбачалося складувати у відокремлені відвали з метою їх використання в якості залізрудної сировини в майбутньому.

Від денної поверхні до глибини горизонту +30 м, у кар'єрі, розробка велася уступами висотою 12 м. Нижче цієї відмітки до дна кар'єру висота уступів складає 15 м. На поверхні границі кар'єру знаходяться на кінцевому (проектному контурі). Гірничі роботи на теперішній час зосереджені на нижніх горизонтах і сході, а також на півдні та півночі кар'єру. Крім того, відбувається активне просування гірничих робіт по східному борту з формуванням кінцевих контурів кар'єру по окислених кварцитах.

На даний час основні видобувні роботи ведуться в центральній частині родовища зі сторони лежачого боку, в основному, в північному і, частково, східному напрямках. Східний борт кар'єру, в якому зосереджено близько половини запасів окислених руд, знаходиться в напівпогашеному стані через відставання розкривних робіт, а також через відсутність попиту на окислені кварцити.

Південний борт кар'єру знаходиться на тимчасовому постійному контурі, який визначився параметрами берм безпеки, необхідними для нормальних умов експлуатації вивізних залізничних колій перегону «Станція «Рудна-П» – Станція «Рудна»» та інших інженерних комунікацій. В кінцевому положенні сформований західний борт кар'єру, по якому відбувається тільки поглиблення гірничих робіт. Північний борт верхніми горизонтами, до відмітки -150 м, досягнув кінцевого контуру.

Станом на 01.01.2023 року позначка дна кар'єру складає -300 м. Фактичні (проектні) розміри кар'єру № 3 станом на 01.01.2023 р складають:

по верху: ширина – 1450 м (1450 м), довжина – 2200 м (2200 м);
по низу: ширина – 85 м (140 м), довжина – 360 м (410 м);
глибина – 390 м (500 м).

Склад окислених руд (автовідвал № 4) розташований на північно-східному борту кар'єру, в існуючих межах земельного відведення підприємства ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг».

З півдня склад обмежений територією Східно-борткової електропідстанції 5/6 кВ та екіпірувальним господарством залізничного транспорту. Зі сходу територія складу обмежена 100-метровою прибережною смугою річки Інгулець та трасою повітряної лінії електропередач напругою 35кВ. Ситуаційний план розміщення авто відвалу № 4 наведено на рис. 1.



Рис. 1. Розміщення автовідвалу № 4

На даний час частково сформовано яруси +120 м, +150 м і розпочато роботи з відсіпання ярусу +180 м. Подальший розвиток складу у північно-східному напрямку стримується відставанням робіт з перенесення ЛЕП. Нарощування висоти відвалу було зупинено у зв'язку з активізацією інструментальних спостережень процесів зрушення на східному борту відвалу. На території, що розглядається під розширення складу, частково розташовано відвал РУ ім.Ілліча. Цей відвал сформований з некондиційних окислених кварцитів IV залізного горизонту відпрацьованого кар'єру «Радянський», які аналогічні окисленим кварцитами кар'єру № 3 РУ ГД.

Аналіз сучасного стану відвалів окислених кварцитів показав неможливість подальшого розвитку відвальних робіт і нарощування висоти відвалу. Тому для підтримки продуктивності кар'єру №3 на досягнутому рівні необхідно додаткове виділення ділянки площею 23,3 га на північний захід від існуючого складу окислених руд, який на даний час вже займає 80 га.

Ділянка, що відводиться, порушена гірничими роботами та не придатна для ведення сільського господарства і не вимагає відчуження додаткових сільськогосподарських земель. Вона межує на заході з існуючим гірничим відведенням ПАТ «АМКР», що сприяє компактному розміщенню окислених кварцитів та їх успішній розробці в майбутньому. Раціональність цього рішення полягає у тому, що розширення тимчасового складу окислених кварцитів на східному борту кар'єру № 3 дозволить значно зменшити дальність транспортування окисленої руди у порівнянні з дальністю її транспортування у відвали «2-3». Враховуючи складний, порушений гірничими роботами рельєф, прийнято, що відсіпання складу буде виконуватися в декілька етапів у взаємозв'язку з відсіпанням існуючим складом, зі збереженням його технологічних і транспортних зв'язків.

Відвальна ємність на ділянці розміщення відвалу утворюється шляхом розширення західного укосу існуючого автовідвалу № 4 з утворенням майданчиків розвантаження на відвальних ярусах з відмітками +105 м, +120...+125 м, +150...+160 м, +170...+180 м. Формування складу передбачається за допомогою бульдозерного відвалоутворення.

Треба відмітити, що для визначення найбільш ефективної схеми доставки окислених кварцитів за умови економного витрачання енергоресурсів розглядалися два варіанти. Річний обсяг складування в обох варіантах складав 3700 тис. м³. Перший варіант містив у собі транспортування та складування всього річного обсягу окисленої руди тільки у відвалах «2-3». Другий передбачав складування окислених кварцитів у відвали «2-3» в обсязі 1620 тис. м³ та в автовідвал, що розширюється – 2080 тис. м³.

У першому варіанті доставка окислених кварцитів здійснюється комбінованим автомобільно-залізничним транспортом з їх навантаженням на перевантажувальних пунктах, розташованих на східному та західному бортах кар'єру.

У другому варіанті більше ніж у два рази зменшується обсяг транспортування цих кварцитів на відвали «2-3», а доставка в автовідвал № 4 здійснюється автотранспортом безпосередньо із вибою до відвальних ярусів. Технологічні показники варіантів, що розглядалися представлені в табл. 1.

З наведеної табл. 1 видно, що за другим варіантом потрібна менша кількість як екскаваторів, так і бульдозерів. Крім того у другому варіанті витрата енергоресурсів за показником «тонн умовного палива» менша на 38%.

Результати досліджень показали, що формування ярусів відвалу можна виконувати висотою від 10 м до 30 м під кутом істотного укосу 35-37°, що не призведе до втрати стійкості та появи зсувних явищ. В цілому кут укосу борту відвалу складатиме 17-27°, ширина берм безпеки – 28-60 м, висота відвалу в залежності від форми основи – 55-100 м.

Технологічні показники варіантів складування окислених кварцитів

Технологічні процеси та задіяне устаткування	Річний обсяг робіт (в цілику, тис. м ³)	Кількість обладнання, од.	Річна витрата енергії, тонн умовного палива (т.у.п.)
Варіант 1			
Перевантаження з авто на залізничний транспорт: екскаватор ЕКГ-8І бульдозер CAT D9R	3700	3 3	
Складування у відвалі: екскаватор ЕКГ-8І	3700	3	
Усього: екскаватори		6	3512,0
бульдозери		3	522,0
т.у.п.			4034,0
Варіант 2			
Перевантаження з авто на залізничний транспорт: екскаватор ЕКГ-12,5 бульдозер CAT D9R	1620		
		1	
		1	
Складування у відвали «2-3» екскаватор ЕКГ-8І	1620	1	
Складування у відвали «2-3» бульдозер CAT D10T	2080		
		1	
Усього: екскаватори		2	2069,0
бульдозери		2	412,0
т.у.п.			2481,0

Як було зазначено вище, складування окислених кварцитів виконується чотирма ярусами з використанням працюючого на даний час автомобільного транспорту та відвальної техніки. Транспортування породи до місця розвантаження здійснюється із застосуванням великовантажних автосамоскидів САТ-785С або БілаЗ-75145. В якості відвального обладнання використовується два бульдозери типу САТ, які забезпечать розміщення запланованого обсягу розкривних порід.

Була визначена схема маневрів для встановлення параметрів розвантажувальної площадки та розроблено паспорт автомобільної відсипки складу окислених руд, які наведені на рис. 2 та 3. Довжина фронту розвантаження складає: для самоскидів САТ-785С – від 46 до 55 м; для самоскидів БілаЗ-75145 – від 45 до 53 м.

Також було визначено, що відвальні бульдозери забезпечать укладання шару суглинків на ділянці відновлення водоохоронної зони з використанням навантажувача САТ-9920 з навантаженням в автосамоскиди та доставкою на площу, що відновлюється.

При розгляданні варіантів розміщення окислених кварцитів дотримувались максимального збереження існуючої технології та механізації виробничих процесів з формування складу.

Транспортування від вибоїв до розвантажувальних майданчиків на відвальних ярусах здійснюється по існуючих постійних і тимчасових автомобільних дорогах, що будуються. Зокрема через південно-східну виїзну траншею кар'єру та по технологічній автодорозі, яка розташована в південній частині існуючого складу окислених кварцитів.

Відвалоутворення окислених руд здійснюється з периферійним формуванням складу, при якому автосамоскиди розвантажуються вздовж відвального фронту в безпосередній близькості від верхньої брівки відвалу або під укіс. Далі порода зштовхується бульдозером під укіс ярусу відвалу. Для пилоподавлення на технологічних автомобільних дорогах передбачається поли-

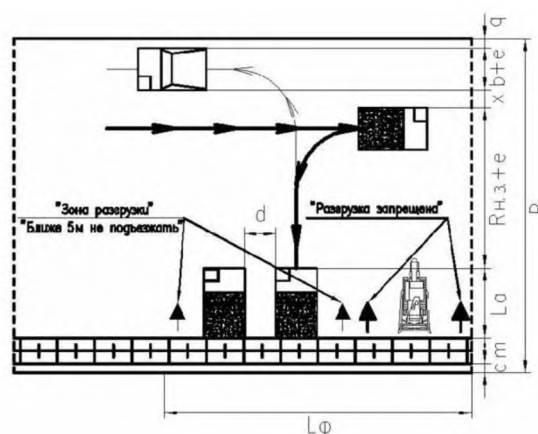


Рис. 2. Схема маневрів при розвантаженні автомобільного транспорту

вання водою проїжджої частини спеціалізованими поливозрошувальними автомобілями на базі БілАЗ-7548А.

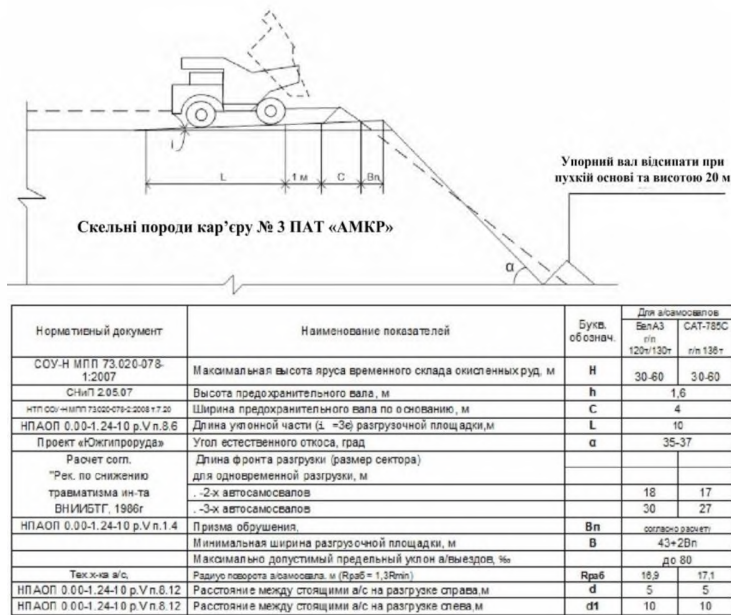


Рис. 3. Паспорт розвантаження автосамоскиду

лу здійснюються автосамоскидами вантажопідйомністю 16 т з розвантаженням на безпечній відстані від стволу.

Загальна площа ділянок на даний час під існуючим складом окислених руд складає 80,0 га. Загальна площа ділянки, що відводиться – 23,3 га. Таким чином, загальна площа ділянок під розміщення складу окислених руд буде складати 103,3 га. Враховуючи складний, порушений гірничими роботами рельєф, прийнято технологію поетапного відсипання складу:

I етап (3 роки) – на земельній ділянці площею 12,44 га з розміщенням окислених кварцитів і скельних порід в обсязі 6681 тис. м³ і 1357 тис. м³ відповідно;

II етап (1,5 роки) – на земельній ділянці площею 1,50 га, окислені кварцити та скельні породи – 3703 тис. м³ і 355 тис. м³ відповідно;

III етап (3 роки) – на земельній ділянці площею 3,81 га, окислені кварцити – 3703 тис. м³;

IV етап (3,5 роки) – на земельній ділянці площею 3,80 га, окислені кварцити – 3703 тис. м³;

V етап (0,5 року) – на земельній ділянці площею 1,75 га, окислені кварцити – 1226 тис. м³.

Таким чином у відвал буде заскладовано 27526 тис. м³ окислених кварцитів і 1712 тис. м³ скельних порід. Загальний період відсипання складу окислених руд складає 11,5 років з щорічним обсягом окислених руд 2404 тис. м³, що відповідає проекту «Реконструкція та розвиток кар'єрів № 2-біс та № 3 гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» для підтримки продуктивності з видобутку сирової руди 30 млн тонн на рік на період до 2020 року»).

Загальний вигляд складу окислених кварцитів на момент початку формування відвального ярусу +180 м наведено на рис. 4.

Висновки та напрямок подальших досліджень. За результатами досліджень було

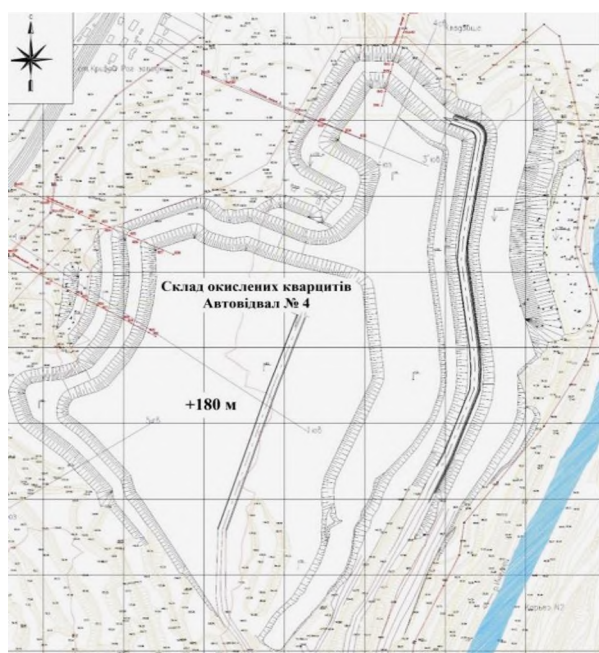


Рис. 4. Розвиток відвальних робіт до положення у відсипаному вигляді

визначено кращий варіант розміщення окислених кварцитів кар'єру № 3 РУ ГД ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Варіант з розширенням автовідвалу № 4, у зрівнянні з існуючим варіантом розміщення окислених руд, дає можливість зменшити витрату енергоресурсів на 38%. Крім цього запропонована технологічна схема складування окислених кварцитів дозволяє значно знизити відстань транспортування окисленої руди без відчуження додаткових сільськогосподарських земельних площ. Тобто будуть використовуватися земельні площі, які вже порушені гірничими роботами. При цьому є можливість підтримання продуктивності кар'єру за рудою на найближчу перспективу. У заключному етапі досліджень необхідно виконати оцінку впливу на оточуюче середовище запропонованого варіанту розміщення окислених кварцитів, вилучення яких необхідне для підтримки продуктивності кар'єру № 3 на досягнутому рівні.

Список літератури

1. Михайлов А.М. Влияние основных параметров и схем отвалообразования на эффективность использования земельного отвода / А.М.Михайлов, А.Г.Темченко, В.Г.Щека, П.С.Трушин // Респ. межведом. научн.-техн. сб. «Разработка рудных месторождений». – 1983. – Вып.35. – С.69-74.
2. Методические указания по расчету устойчивости несущей способности отвалов / Под ред. Г.Л.Фисенко. Л.: 1981. – 126 с.
3. Николашин Ю.М. Методика контроля состояния устойчивости отвалов в сложных горнотехнических условиях / Ю.М.Николашин, Ю.Н.Куцый, Н.В.Гайдукова // Разработка рудных месторождений: Научн.-техн. сборник. – 2004. – Вып.85. – С.134-137.
4. Несмашний Є.О. Збільшення ємності зовнішніх відвалів Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату / Є.О.Несмашний, В.С.Кравець, Г.І.Ткаченко // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. праць. – 2005. – Вип.9. – С.7-9.
5. Ткаченко Г.И. Прогнозирование и оценка состояния устойчивости внешних отвалов с помощью имитационного моделирования // Разработка рудных месторождений: Научн.-техн. сборник. – 2007. – Вып.91. – С.99-102.
6. Николашин Ю.М. Маркшейдерское и геомеханическое обеспечение безопасного наращивания отвалов смешанных пород на слабом основании / Ю.М.Николашин, Д.А.Шевченко, Н.В.Гайдукова // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. праць. – 2005. – Вип.9. – С.47-51.
7. Максимов О.В. Моделирование поверхонь сквозанния для оцінки стану стійкості багатоярусних зовнішніх відвалів / О.В.Максимов, Г.І.Ткаченко // Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. праць. – 2005. – Вип.8. – С.7-11.
8. Несмашний Є.О. Розроблення фізико-математичної моделі скошування бутів гірської породи з породних відкосів / Є.О.Несмашний, Г.І.Ткаченко, К.В.Герасимова // Гірничий вісник: Зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2020. – Вип.107. – С.101-106.
9. Євтехов В.Д. Природні й техногенні чинники стійкості гірничих масивів кар'єрів Північного ГЗК / В.Д.Євтехов, О.С.Демченко, Г.І.Єременко, Є.В.Євтехов, С.В.Саженєв // Гірничий вісник: Зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2022. – Вип.110. – С.72-79.
10. Ткаченко Г.І. Фізико-математична модель утворення поверхні зсуву в зовнішніх відвалах залізничних кар'єрів / Г.І.Ткаченко // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг, 2011. – Вип.28 – С.65-70.
11. Перегудов В.В. Перспективи переробки окислених руд Криворізького басейну на прикладі кар'єру ПАТ «ІнгЗК» / В.В.ПЕРЕГУДОВ, І.Є.Григор'єв, А.Ю.Гук, Ю.І.Григор'єв // Гірничий вісник: Зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2022. – Вип.110. – С.9-13.
12. Темченко А.Г. Ресурсозберігаючі технології гірничого виробництва / А.Г.Темченко // Кривий Ріг: «Мінерал», 2000. – 216 с.
13. Григор'єв І.Є. Визначення основних методичних принципів ціле направленої формування техногенних родовищ при комплексному освоєнні надр / Григор'єв І.Є., Григор'єв Ю.І., Усачов В.Е., Євтушенко М.С. // Зб. наук. праць НГУ, 2019. – Вип.56. – С.18-28.

Рукопис подано до редакції 21.04.2023

УДК 621.9.022.1

Л.А. БУГАЙ, ст. викладач, Криворізький національний університет

ЗНИЖЕННЯ ТРУДОЄМКОСТІ МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ ПРОДУКЦІЇ З ВИСОКОМАРГАНЦЕВИХ СТАЛЕЙ

Мета. Метою даної роботи є аналіз методів та засобів зниження трудомісткості операцій механічної обробки деталей з високомарганцевих сталей гірничо-збагачувального обладнання, а саме – визначення оптимальних режимів різання, періоду стійкості ріжучої крайки ріжучого інструменту при різних умовах обробки.

Методи дослідження. Були проведені дослідження стійкості змінних твердосплавних пластин з урахуванням різних факторів процесу різання. Результати роботи по оптимізації режимів різання, що застосовуються для обробки зносостійких високомарганцевих сталей отримані шляхом теоретичних і експериментальних досліджень. Теоретичні дослідження полягають у визначенні параметрів та шляхів оптимізації процесу механічної обробки. Експериментальні дослідження засновані на комплексному вивченні взаємозв'язку режимів різання, геометрії ріжучого інструменту з різними умовами обробки деталі броні конусної дробарки.

Наукова новизна. У результаті проведених досліджень були отримані дані про стан параметрів якості обробленої поверхні заготовок, що виготовлені зі зносостійких високомарганцевих сталей при обробці збірними різцями з різними інструментальними матеріалами та державками. Виявлені оптимальні режими різання при найбільшому періоді стійкості ріжучої крайки для пластин з різних сплавів на різних проходах. Досліджено залежності режимів різання від застосовуваного ріжучого матеріалу та геометричних параметрів різців.

Практичне значення. Термічна обробка сталі 110Г13Л впливає на її структуру. Для поліпшення обробки різанням виробів зі сталі 110Г13Л, її піддавали довгостроковому нагріванню. Структура сталі, ставала менш в'язкою і піддавалась різанню твердосплавним інструментом. Плазмово-механічна обробка покращує механічну обробку виробів зі сталі 110Г13Л, але має небезпечний вплив на стан верстатника. Високих результатів набули різці з механічним кріпленням пластин з кубічного нітриду бору (КНБ) вітчизняних та закордонних виробників.

Проведені дослідження дозволили з високою точністю визначити період стійкості різальних крайок змінних твердосплавних пластин і зробити їх порівняльний аналіз для раціонального використання часу і фінансових ресурсів. Встановлені раціональні режими різання та геометричні параметри різців.

Результати. Встановлено, що використання запропонованого ріжучого інструменту німецької корпорації «HANN – KOLB» дозволило скоротити трудомісткість механічної обробки деталей зі зносостійких високомарганцевих сталей майже до 5 разів.

Ключові слова: високомарганцеві сталі, режими різання, твердосплавні пластини, стійкість, трудомісткість обробки.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Для виготовлення деталей металургійного, гірничо-видобувного та гірничого обладнання Криворізького басейну, що працюють в умовах ударного стирання, застосовується сталь 110Г13Л. Сталь 110Г13Л відносяться до аустенітного класу, має специфічні властивості, які пов'язані з механічною обробкою, також сталь має високий зміст вуглецю і легована марганцем. При кристалізації, сталь дуже стійка і не зазнає евтектоїдного перетворення, бо має решітку гранецентрованого кубу (ГЦК). При виплавці сталі 110Г13Л додається феромарганець, який містить до 0,5% фосфору та 13% марганцю, що призводить до фосфідної евтектики, яка знижує усі механічні властивості сталі. Для типового представника аустенітних сталей, сталь 110Г13Л має високу в'язкість, пластичність при досить великій міцності. При низькій твердості сталь 110Г13Л має незвичайно високу зносостійкість при терті з тиском та ударами. Це вказує на зміцнення аустеніту при пластичній деформації в процесі роботи, що призводить до наклепу. Сталь 110Г13Л має підвищену здатність до наклепу набагато більшу, ніж сталі звичайні з такою твердістю. Висока пластичність сталі аустенітного класу проявляється також і в механічних показниках при збільшенні величин відносного подовження та поперечного звуження. У результаті наклепу збільшується опір зносу, що призводить до важкої обробки різальними інструментами. Вважається, що висока міцність сталі 110Г13Л при пластичній деформації обумовлена тим, що деформація здійснюється шляхом механічного двійникування аустеніту. Саме при цих явищах відбувається рух дислокацій, але вони призводять до релаксації внутрішніх напружень, запобігаючи локалізації пластичної деформації і утворенню тріщин. Тому зміцнення не приводить до крихкості і сталь добре працює при ударному навантаженні. Мала теплопровідність оброблюваного матеріалу призводить до підвищення температури в зоні контакту, а також до активізації явищ адгезії та дифузії, інтенсивного схоплювання контактних поверхонь і руйнування ріжучої частини інструменту. Ці явища не дозволяють у ряді випадків використовувати при обробці сталі 110Г13Л недостатньо міцні інструментальні матеріали. На погане тепловідведення при обробці сталі 110Г13Л, основне значення мають охолоджувальні властивості МОР. Підвищена здатність до стирання сплавів аустенітного класу викликає необхідність застосовувати інструментальні матеріали з високою міцністю, а також повинні мати високу зносостійкість. Знижена вібростійкість руху різання, обумовлена високим зміцненням сталі при нерівномірності протікання процесу пластичного деформування. Вібрації призводять до перемінних силових і теплових навантажень на робочі поверхні інструменту та руйнівальних процесів викришування ріжучих крайок інструментів. Термічна обробка теж впливає на оброблюваність сталі 110Г13Л.

різанням. Термічна обробка загартуванням, погіршує її оброблюваність, а температурні параметри призводить до фазових перетворень, які зміцнюють сплав. Після аналізу проблем які плинуть на процес механічної обробки різання, необхідно виявити шляхи зниження трудомісткості обробки сталі 110Г13Л [2,3, 13].

У сучасному машинобудуванні наявність високопродуктивного обладнання, різального інструменту, прийнятих оптимальних режимів різання, які не завжди забезпечують виготовлення виробу з високою ефективністю, але вони також впливають на технічні та економічні показники виробництва. Трудомісткість є одним із основних показників [технологічності](#) виробу, тому її зниження - одне з найважливіших етапів обробки сталі 110Г13Л, що поширено використовуються при виготовленні деталей броні конуса дробарок (рис.1).

Рис.1. Деталь броні конуса дробарки

Аналіз досліджень і публікацій. Високомарганцеві сталі характеризуються високою ступеню зміцнення під дією контактних навантажень, що призводить до низької оброблюємості різанням. В інституті найтвердіших матеріалів ім. В.М.Бакуля НАН України для обробки сталі 110Г13Л розробили пластини круглої форми із полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) на основі полікристалічного кубічного нітриду бора «Кіборіт», які дозволяють ефективно обробляти різні поверхні, як по корці, так і після її видалення. Режими різання при точінні поверхні по корці такі: швидкість різання 1,20-1,67 м/с, подача 0,3-0,4 мм/об і глибина різання 8-9 мм, а стійкість різця складала 120-180 хвилин. Торцева



поверхня з нерівними від плазмового різання літників оброблялась зі швидкістю різання 0,7-0,8 м/с, з подачею 0,25-0,35 мм/об і глибиною різання 6-7 мм, а стійкість інструменту складала 60-90 хвилин. Повна обробка конусної дробарки зі сталі 110Г13Л була виконана інструментом з пластинкою круглою формою RNUN 190700T. Період стійкості таких пластин становив 10-12. Обробка проводилась без ЗОР і введення в зону різання додаткових видів енергії. В порівнянні інструменту з твердосплавними пластинами при обробці сталі 110Г13Л, обробка пластинами з полікристалічного кубічного нітриду бора (ПКНБ) показала, що в 5-7 разів підвищилась продуктивність обробки сталі 110Г13Л і в 2-3 рази стійкість інструменту у порівнянні з обробкою твердосплавними різцями [5]. У роботі [4] представлені методи з інтенсифікації механічної обробки деталей із сталі 110Г13Л, а саме: підігрівання поверхні заготовки, охолодження поверхонь заготовки до наднизьких температур та попереднє пластичне деформування поверхонь заготовки. Після аналізу основних фізико-механічних властивостей сталі 110Г13Л були виявлені специфічні відмінності у механізмі деформування і руйнування цієї сталі, показані фактори, що ускладнюють механічну обробку високомарганцевих сталей. Перспективним напрямком вирішення вищевикладеної проблеми є застосування комбінованої обробки поверхонь деталей, виготовлених із сталі 110Г13Л, що полягає у попередній обробці пластичним деформуванням в напрямку, протилежному подальшій пластичній деформації, що виникає при обробці різанням. Саме цей напрям (ефект Баушингера – це зменшення опору кристалічного матеріалу пластичному деформуванню після попередньої малої пластичної деформації протилежного знаку, тобто виявом не пружності матеріалу в зоні переходу до пружно-пластичних деформацій), призводить до розміцнення поверхневих шарів сталі, що може призвести до зменшення зусиль різання і, з'являється можливість збільшити режими різання і відійти в певній мірі спрацювання від адгезії.

Велику номенклатуру металорізального інструменту в машинобудуванні складають інструменти, оснащені пластинами з твердих сплавів. Основним критерієм для змінних твердосплавних пластин виступає їх стійкість. Стійкість пластини – це здатність матеріалу, з якого вона виготовлена, зберігати свої фізичні властивості в певний період часу [1,5-12, 14,15]. Період стійкості змінних твердосплавних пластини залежить від марки твердого сплаву, її геометрії, матеріалу покриття, а також від умов різання. Застосування раціональних параметрів обробки і правильне застосування інструменту зі змінними пластинами неможливо без всебічного вивчення та проведення виробничих випробувань. Максимальне зниження трудомісткості меха-

нічної обробки сталі 110Г13Л буде досягнє при використанні сучасних інструментальних матеріалів, а також визначені оптимальних параметрів режиму різання.

Постановка задачі. Дослідження стійкості змінних твердосплавних пластин з урахуванням різних факторів процесу різання при обробці сталі 110Г13Л, коли відмова інструменту може привести до непоправного браку, є актуальним завданням. Тому метою даної роботи є аналіз зниження трудомісткості механічної обробки сталі 110Г13Л. Сформульована мета роботи обумовила необхідність розв'язання такої задачі, як визначення оптимальних режимів різання при найбільшому періоді стійкості ріжучої крайки пластини різця при різних умовах обробки сталі 110Г13Л.

Виклад матеріалу і результати. Сталь Гадфільда марки 110Г13Л згідно з ДСТУ 8781:2018 має такі механічні характеристики: $\sigma_b = 800 \dots 1000$ МПа, $\sigma_t = 250 \dots 400$ МПа, $\delta = 35 \dots 45\%$, $\psi = 40 \dots 50\%$, 170...230 НВ, КСЧУ = 1,6...2,1 МДж/м².

Структура сталі 110Г13Л представляє собою зерна аустеніту з карбідом, який виділився по границях зерен, оточеними феромагнітним трооститом. Сталь з такою неоднорідною структурою не має великої в'язкості та погано опирається зношенню. Для підвищення в'язкості і надання більшої схильності до наклепування виробу зі сталі підлягають закалюванню від 1100-1150 °С з охолодженням у воді. При такому нагріванні карбіди марганцю переходять у твердий розчин, а при швидкому охолодженні вони не встигають виділитись і мікроструктура сталі стає гомогенною аустенітною, без карбідів і троостита. Твердість сталі 110Г13Л після загартування не перевищує 200НВ, але в процесі відпускання при 300-600 °С завдяки перетворенню аустеніту в мартенсит твердість збільшується і при 450 °С досягає максимальної 400НВ. При подальшому нагріванні мартенсит починає розпадатись на феритно-цементитну суміш і твердість знижується. Для поліпшення оброблюваності різанням виробу зі сталі 110Г13Л піддавали довгостроковому нагріванню при 550-600 °С. Після такої обробки сталь набувала структури сорбіта, ставала менш в'язкою, менше наклепувалась і піддавалась різанню твердосплавним інструментом. На машинобудівних підприємствах Кривбасу для обробки високомарганцевих сталей тиривали час поширене використання пластин металорізального інструменту з твердого сплаву ВК8. Після необхідної механічної обробки виріб знову загартовували на аустеніт. Для масивних відливок, які використовуються в гірничому машинобудуванні тривалість витримки при температурах до 600 °С складала десятки годин, що неприйнятно в заводських умовах.

Для покращення механічної обробки застосовується плазмово-механічна обробка (ПМО), що складається з комплексного розміцнення поверхні різання перед різцем стиснутою електричною дугою плазмотрона при роботі на токарних і карусельних верстатах. Плазмово-механічна обробка дає можливість підвищити швидкість різання, подачу та підвищити стійкість різців з твердосплавними пластинами у 3-4 рази. Недоліком плазмової обробки є супроводження процесу різання сильним світловим випромінюванням, значним шумом, виділенням шкідливих металічних парів.

Для подальшого підвищення продуктивності і зниження трудомісткості механічної обробки деталей з високомарганцевих сталей 110Г13Л освоєна високошвидкісна чистова обробка різцями з механічним кріпленням змінних пластин з кубічного нітриду бора (КНБ). При механічній обробці інструментом з КНБ виявили наступну закономірність - чим вище твердість оброблюваного матеріалу, тим суттєво проявляються переваги зі зносостійкості і ріжучим якість різців з пластин з полікристалів КНБ. Лезовий інструмент із полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) на основі нітриду бора BN здатний замінити дефіцитний вольфрам, що входить в твердий сплав пластин при обробці марганцевих сплавів на технологічних операціях чорнових, напівчистових та чистових, забезпечуючи високу якість і продуктивність обробки за рахунок використання високих швидкостей різання. Дослідження показали що при точінні броні зі сталі 110Г13Л інструментом з КНБ зусилля різання набагато нижчі, ніж при обробці різцями ВК8 (майже на порядок), що дозволяє збільшити строк служби унікальних верстатів моделей 1540, SC-43, БСД50. Недоліком для широкого впровадження різців з пластинами з КНБ є наявність ливарних раковин при чорновій обробці по кірці та недостатньої жорсткості верстатів. Різці викришуються і для подальшого використання в роботі непридатні.

У машинобудівній галузі для механічної обробки важкооброблюємих матеріалів велика кількість фірм пропонують свої новітні розробки в області обробки високомарганцевих сталей.

Випробовування проводились на токарно-карусельному верстаті моделі 1540. Об'єктом до-

слідження обрані деталі броні конуса дробарки, які виготовлені з високомарганцевих сталей марки 110Г13Л. Були проведені дослідження зношення (стійкості) збірних різців з механічним кріпленням пластин виробництва німецької корпорації «НАНН – KOLB», при обробці виробів з високомарганцевих сталей марки 110Г13Л. В якості об'єкта дослідження для визначення оптимальних режимів різання були обрані змінні ріжучі пластини з CBN форми RNMN190700 німецької корпорації «НАНН – KOLB». Стійкість даних пластин та визначення оптимальних режимів різання були досліджені при чорновій, напівчистовій та чистовій обробці деталей броні конусної дробарки.

Результати випробовувань та оптимальні режими різання при найбільшому періоді стійкості ріжучої крайки для пластин з різних сплавів на різних проходах приведені в табл. 1.

Таблиця 1

Результати досліджень, та оптимальні режими різання

Показники	Чорновий прохід	Напівчистовий прохід	Чистовий прохід
Ріжуча пластина	RNMN190700		
Тип сплаву	WG250		WG200
Державка різця	DRGNR4040P19KC07		DRGNR4040P19KC07
Оптимальні режими різання			
Швидкість різання (V), м/хв	70-80		100-120
Подача (S), мм/об	0,3-0,4		0,4-0,5
Глибина різання (t), мм	0,5-1,0		0,1-0,3
Середня стійкість ріжучої кромки (T), год.	30		30

Аналізуючи період стійкості ріжучих крайок пластин різців, що досліджувались при обробці деталей броні конусної дробарки в середньому в 1,7 разів вище, ніж при обробці різцями з напаяними пластинами ВК8. Оптимальні режими різання, що приведені в табл. 1, можливо корегувати у процесі напрацювання досвіду в роботі. Використання ріжучого інструменту, різців з механічним кріпленням пластин круглих форм німецької корпорації «НАНН - KOLB», дозволило скоротити трудомісткість виготовлення розглянутих деталей зі сталі 110Г13Л, данні приведені в табл. 2.

Таблиця 2

Порівняння трудомісткості обробки деталей

Деталь, що оброблюється	Операції	Трудомісткість обробки, н/год		Зниження трудомісткості (кількість разів)
		напаяні різці ВК8	складальні різці «НАНН - KOLB»	
Броня конусної дробарки	Обробка токарна деталі	45,8	9,2	4,98

Висновки та напрямки подальших досліджень. Зроблені дослідження дозволили визначити період стійкості різальних крайок змінних твердосплавних пластин і зробити їх порівняльний аналіз для раціонального використання часу і фінансових ресурсів. Зокрема встановлені раціональні режими різання при обробці поверхонь деталей ріжучими пластинами з CBN RNMN190700 німецької корпорації «НАНН – KOLB». Використання запропонованого ріжучого інструменту німецької корпорації «НАНН - KOLB» дозволило скоротити трудомісткість механічної обробки деталей броні конусної дробарки майже до 5 разів, які виготовлені зі сталі 110Г13Л,

Список літератури

1. Беженар М.П. Матеріали на основі кубічного нітриду бору. НАН України, НТШ. – К.: Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2018.
2. Пахольок А.П. Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали: [підруч. для студ. вищ. навч. закл.] / А.П.Пахольок, О.А.Пахольок. — Львів: Світ, 2005. — С.172
3. Хільчевський В.В. Матеріалознавство і технологія конструкційних матеріалів //Хільчевський В.В., Кондратюк С.Є., Степаненко В.О., Лопатько К.Г. К.: Либідь, 2002. — С.328
4. Федотська Л. П. [Сучасний стан і перспективні методи обробки високомарганцевих сталей](#) // Вісник КДІТУ. Випуск 6/2006 (41). Ч. 1. С. 31—37.
5. Клименко С.А. Точение деталей из труднообрабатываемых материалов инструментом, оснащенным ПСТМ. // Клименко С.А., Копейкина М.Ю., Мановицкий А.С., Мельничук Ю.А., Манохин А.С. НАН Украины Киев. – К: Институт сверхтвердых материалов, 2011, выпуск 14 – С.504-507.

6. Янюшкин А.С., Лобанов Д.В., Рычков Д.А. Методика сравнительного анализа конструкций сборного режущего инструмента. Механика XXI века. 2009. №8.
7. Яцун Е.И., Кудряшов Е.А., Смирнов И.М., Павлов Е.В. Совершенствование инструментального обеспечения процессов точения конструктивно сложных деталей. СТИН. 2017, №9. С.23-28.
8. Захаренко П. В. Технологические особенности механической обработки инструментом из поликристаллических сверхтвёрдых материалов. // Захаренко П. В., Волкогон В. М., Бочко А. В. и др. К., 1991;
9. Шульженко А. А. Синтез, спекание и свойства кубического нитрида бора. // Шульженко А. А., Божко С. А., Соколов А. Н. и др. К., 1993;
10. Новиков Н. В. Киборит: получение, структура, свойства, применение // Новиков Н. В., Шульженко А. А., Беженар Н. П. и др. СМ. 2001. № 2;
11. J. Barry, G. Akdogan, P. Smyth et al. Application areas for PCBN materials // Industrial Diamond Rev. 2006. Vol. 66, № 3;
12. Беженар Н. П. Кубический нитрид бора, материалы на его основе // Неорган. материаловедение. Материалы и технологии. К., 2008. Т. 2, кн. 1;
13. Алієв І. С., Беженар М. П., Бейгельзімер Я. Ю. та ін. Наукоємні технології одержання матеріалів та виробів, включно наноструктурних, з новим рівнем показників якості // Фізика и техника высоких давлений. 2011. Т. 21, спецвып.;
14. Туркевич В. З., Беженар Н. П., Петруша И. А. Сверхтвёрдые композиционные материалы на основе кубического нитрида бора // Физ.-тех. пробл. современ. материаловедения. К., 2013. Т. 2.
15. Мазур М.П. Основи теорії різання матеріалів: підручник [для вищ.навч. закладів] / М.П.Мазур, Ю.М.Внуков, В.Л.Доброскок, В.О.Залога, Ю.К.Новосьолов, Ф.Я.Якубов; під заг. ред. М.П.Мазура. – 2-е вид. перероб. і доп. – Львів: Новий світ 2000, 2001. – С.422.

Рукопис подано до редакції 24.04.2023

УДК 622.7: 534

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет
Н.В. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Львівський національний університет ім. Івана Франка
С.М. ГРИЩЕНКО, канд. пед. наук, ст. дослідник, Державний податковий університет
І.А. ГАПОНЕНКО, канд. техн. наук, наук. співробітник,
А.А. ГАПОНЕНКО, Є.Ю. БОБРОВ, аспіранти, Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО АКУСТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Метою дослідження є моделювання процесів електромагнітного акустичного перетворення для конструювання безконтактного із досліджуванним середовищем ультразвукового вимірювального каналу.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного та імітаційного моделювання, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

Наукова новизна полягає у дослідженні механізмів електромагнітного акустичного перетворення для формування ультразвукових пружних хвиль.

Практичне значення полягає в обґрунтуванні застосування електромагнітних акустичних перетворювачів для визначення фізико-механічних властивостей феромагнітної гірської породи.

Результати. У феромагнітних провідних матеріалах одночасно присутні три механізми акустичного перетворення: сила Лоренца, магнітострикційна сила і сила намагнічування. Звичайний електромагнітний акустичний перетворювач складається з джерела постійного магнітного поля, джерела змінного магнітного поля та деякого обсягу досліджуваної середовища, де відбуваються процеси перетворення енергії електромагнітного поля в енергію пружних коливань його частинок. Конструкція та конфігурація зазначених джерел визначають режими перетворення для формування різних типів хвиль, таких як поздовжні та поперечні об'ємні хвилі, збуджувані перпендикулярно поверхні зразка похилі поперечні хвилі та спрямовані моди (включаючи складні для збудження горизонтальної поляризації). Амплітуда та частота пружних ультразвукових коливань, сформованих електромагнітним способом, при розповсюдженні їх у гірському масиві залежить від вмісту та структури розподілу феромагнітного компонента, фізико-механічних характеристик та стану досліджуваної середовища, тобто мінералогічних структурно-текстурних особливостей порід, що його складають. Цей процес обумовлений поглинанням та розсіюванням енергії ультразвукових хвиль і відповідно несе інформацію щодо середовища розповсюдження. Моделювання зазначеної процедури вимірювань відбувалось у два етапи: спочатку визначалися особливості формування магнітного поля у феромагнітній гірській породі під впливом електромагнітного імпульсу, а потім імітувалася генерація ультразвукових сигналів у досліджуваній середовищі та вплив на їх характеристики випадкових збурень. Запропонований підхід дозволяє дослідити метод неруйнівного безконтактного вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

Ключові слова: електромагнітний акустичний перетворювач, моделювання, руда, феромагнітний компонент.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Електромагнітні акустичні перетворювачі (ЕМАП) збуджують і приймають акустичні хвилі з застосуванням електромагнітного зв'язку із досліджуваним середовищем і широко використовуються в галузі неруйнівного контролю різних виробів [1-4]. ЕМАП мають суттєві переваги перед п'єзoeлектричними перетворювачами: контроль ведеться через повітряний зазор без застосування контактної рідини; відсутня механічне зношування поверхонь перетворювача; на результати вимірів мало впливають нерівності поверхні об'єкта контролю. Ці якості ЕМАП дозволяють розглядати їх як перспективні елементи ультразвукових вимірювальних каналів для визначення характеристик феромагнітних гірських порід. Однак для розробки конструкції реальної вимірювальної системи необхідно виконати її моделювання та оцінити можливі варіанти алгоритму функціонування.

Аналіз досліджень і публікацій. Звичайний електромагнітний акустичний перетворювач складається з джерела постійного магнітного поля, джерела змінного магнітного поля і деякого обсягу досліджуваного середовища, де відбуваються процеси перетворення енергії електромагнітного поля в енергію пружних коливань його частинок. Конструкція та конфігурація зазначених джерел визначають режими перетворення для формування різних типів хвиль, таких як поздовжні та поперечні об'ємні хвилі, збуджувані перпендикулярно поверхні зразка похилі поперечні хвилі та спрямовані моди (включаючи складні для збудження горизонтальної поляризації) [5].

У роботі [6] розглянуто проблеми, що виникають у промислових задачах, для яких ЕМАП вважаються найкращим рішенням. Наголошується, що з'явилися нові підходи за чотирма основними напрямками: моніторинг поведінки дислокацій на місці, визначення анізотропних пружних постійних, картування точкової пружності (RUM) та еволюція акустичної нелінійності.

У роботі [7] розглянуто теоретичні аспекти конструювання електромагнітних ультразвукових перетворень. Наведено модель електромагнітних ультразвукових хвилеводів, описано механізм впливу спрямованих хвиль на дефекти досліджуваного середовища, проаналізовано методи електромагнітної ультразвукової товщинометрії, хвилеводної дефектоскопії та засоби виявлення тріщин газопроводів.

Повністю аналітичний метод, що поєднує електромагнітне та ультразвукове моделювання для дослідження масиву електромагнітних акустичних перетворювачів (ЕМАП) представлений у роботі [8]. Аналітичне рішення задачі про вихрові струми для меандрової котушки, що використовується в ЕМАП, адаптоване до класичного рішення W.E. Deeds і C.V. Dodd, яке спочатку призначалося для круглих котушок. Рішення, отримане внаслідок цієї нової адаптації, використовує екстраполяцію великого радіуса і демонструє кілька переваг порівняно з методом кінцевих елементів (МКЕ), особливо у високочастотному режимі. Розрахована щільність сили Лоренца потім використовується у ультразвуковому моделюванні для визначення розподілу поверхневих хвиль. Отримані результати полегшують оптимізацію конструкції ЕМАП.

Існуючі розробки в галузі електромагнітного акустичного перетворення зосереджені в основному на дефектоскопії та оцінці якості металевих виробів і для визначення можливості їх використання для неконтактного вимірювання характеристик гірських феромагнітних порід необхідні додаткові дослідження.

Постановка завдання. Завданням дослідження є моделювання процесів електромагнітного акустичного перетворення для конструювання безконтактного із контрольованим середовищем ультразвукового вимірювального каналу та обґрунтуванні можливості його використання в процедурі визначення характеристик залізної руди.

Викладення матеріалу і результати. У феромагнітних провідних матеріалах одночасно присутні три механізми акустичного перетворення: сила Лоренца, магнітострикційна сила і сила намагнічування.

Механізм перетворення сили Лоренца у феромагнітних середовищах аналогічний тому, що відбувається в неферомагнітних провідних матеріалах [9], але через різні електромагнітні параметри матеріалів величина сили Лоренца різна. Рис.1 ілюструє процес генерації ультразвукових хвиль на основі сили Лоренца [10]. Повна напруженість магнітного поля в середовищі є

суперпозицією змінного магнітного поля та статичного магнітного поля постійного магніту [11]. Високочастотний змінний струм J_c у котушці створює змінне електричне поле, яке генерує в досліджуваному середовищі індукційний струм. Індуковані вихори формують сили Лоренца F_L у середовищі під дією статичного магнітного поля зміщення B_s постійного магніту. Залежно від фізико-механічних характеристик середовища це викликає його пружну деформацію та періодичну вібрацію частинок з яких воно складається. Вібрація поширюється у середовищі у вигляді ультразвукових хвиль.

Процес збудження ультразвукових хвиль на основі сили Лоренца можна описати наступною системою рівнянь [10]

$$\begin{cases} \nabla \times H_d = J_c; \\ B_d = \mu H_d; \\ \nabla \times E_e = -\partial B_d / \partial t; \\ J_e = \gamma E_e, \end{cases} \quad (1)$$

де H_d – напруженість змінного магнітного поля; B_d – магнітна індукція змінного магнітного поля; μ – відносна магнітна проникність середовища; E_e – напруженість електричного поля, створюваного індукцією змінного магнітного поля; γ – електропровідність середовища; J_e – густина вихрових струмів у середовищі.

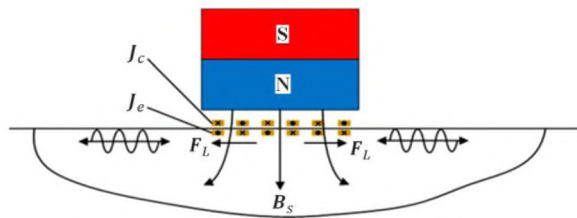


Рис. 1. Принципова схема механізму електромагнітної генерації ультразвукової хвилі на основі сили Лоренца

Таким чином, сила Лоренца F_L в середовищі визначається векторною сумою статичної сили Лоренца F_s і динамічної сили Лоренца F_d [10]

$$F_L = F_d + F_s = J_e \times B_d + J_e \times B_s. \quad (2)$$

З виразу (2) випливає, що сила Лоренца F_L тісно пов'язана із щільністю вихрових струмів, інтенсивністю магнітної індукції змінного магнітного поля та напруженістю статичного магнітного поля. Збільшення сили Лоренца збільшує амплітуду пружних коливань частки досліджуваного середовища.

Аналітичні рішення для кільцевої котушки над шаруватим провідником запропоновано у [12,13]. Основними рівняннями для розрахунку індукованого вихрового струму є

$$\begin{aligned} \nabla^2 A &= -\mu J_c + \mu \gamma \frac{\partial A}{\partial t} + \mu \zeta \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} + \mu \nabla \left(\frac{1}{\mu} \right) \times (\nabla \times A), \\ E_e &= -j\omega A, \end{aligned} \quad (3)$$

де A – векторний потенціал; μ , γ і ζ – проникність, провідність і діелектрична проникність середовища відповідно; J_c – густина прикладеного струму, ω – кутова частота змінного струму, E_e – напруженість електричного поля.

Аналітичне рішення для розрахунку векторного потенціалу має такий вигляд [13]

$$\begin{aligned} A(r, z) &= M \int_0^\infty \frac{1}{a^2} \left(\int_{r_1}^{r_2} x J_1(x) dx \right) J_1(ar) (e^{-al} - e^{-a(l+h)}) \frac{e^{a_1 z}}{a+a_1} da, \\ M &= \mu_0 N J_c; \\ a_1 &= \sqrt{a^2 + j\omega \mu_1 \gamma}, \end{aligned} \quad (4)$$

де N – витки котушки, a та x – змінні інтегрування, $J_1(x)$ та $J_1(ar)$ – функції Бесселя першого роду, μ_0 і μ_1 – проникність повітря та досліджуваного середовища відповідно, l , h , d , r_1 , r_2 – геометричні параметри вимірювального каналу.

Магнітострикційна сила та сила намагнічування змінюються нелінійно з прикладеним магнітним полем.

Під дією змінного магнітного поля акустичні хвилі порушуються механічними коливаннями, які викликаються періодичним розтягуванням та стисненням матеріалу. Сила намагнічування F_M створюється змінним магнітним полем відповідно до виразу [14]

$$F_M = \mu_0 M \nabla H, \quad (5)$$

де μ_0 – магнітна проникність у вакуумі, M – вектор намагніченості.

Електромагнітне перетворення у феромагнітних матеріалах також включає магніто-стрикційний ефект. Для феромагнітних матеріалів магнітострикційна залежність може бути виражена як [14]

$$T_{\sigma} = C_{\epsilon} G_{\epsilon} - N^T H, \quad (6)$$

$$B = D_M^T T_{\sigma} + \mu_0 K_{\mu}^T H, \quad (7)$$

де G_{ϵ} - матриця деформації, T_{σ} - матриця тензора напруг, K_{μ}^T - матриця оборотної магнітної проникності матеріалу, μ_0 - магнітна проникність вакууму, H - динамічна напруженість магнітного поля, B - магнітна індукція, D_M^T - п'єзoeлектрична матриця жорсткості, C_{ϵ} - матриця жорсткості, N^T - магнітна матриця зворотного тиску.

Рівняння (6) описує прямий магнітострикційний ефект, тобто механічну деформацію (зміщення), викликану прикладеним магнітним полем. Рівняння (7) описує зворотний магнітострикційний ефект, тобто зміну щільності магнітного потоку і електричного сигналу, що реєструється датчиком під дією механічної деформації. Напруженість магнітного поля H та магнітострикційна сила f_M пов'язані залежністю [14]

$$f_M = -\nabla_t(N^T H). \quad (8)$$

Таким чином, механізм формування ультразвукових хвиль у феромагнетику під дією електромагнітного імпульсу може бути представлений у вигляді суми трьох доданків

$$F = F_M + F_L + f_M. \quad (9)$$

Перший доданок у виразі (9) - сила намагнічування, друге - сила Лоренца, а третє - магнітострикційна сила. Однак у більшості випадків F_M можна знехтувати, оскільки ця сила відносно мала.

Зазначені механізми електромагнітного формування ультразвукових пружних хвиль у феромагнітному середовищі використовуються при розробленні електромагнітних акустичних перетворювачів (ЕМАП).

Формування пружних коливань представляють набором рівнянь у частинних похідних, що описують деформування матеріалу та навантаження внутрішнім напруженням [13, 15, 16]

$$\rho(x) \frac{\partial v_{ij}}{\partial t}(x, t) = \sum_{j=1}^d \frac{\partial T_{ij}}{\partial x_j}(x, t) + f_i(x, t); \quad (10)$$

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = \sum_{j=1}^d \sum_{i=1}^d c_{ijkl}(x) \frac{\partial v_{kl}}{\partial x_l} + \theta_{ij}(x, t), \quad (11)$$

де ρ - масова щільність, c_{ijkl} - 4-й тензор жорсткості досліджуваного зразка; f_i та θ_{ij} є джерелом сили та джерелом швидкості тензора деформації відповідно.

Параметрами, які потрібно обчислити, є швидкість v_i та тензор напруги T_{ij} . Рівняння (10) є другим законом Ньютона: коли до тестового зразка прикладається сила, виникають напруга та деформація, а також зміщення частинок. Рівняння (11), засноване на законі Гука, описує співвідношення тензора швидкості напружень і тензора швидкості деформації, коли відбувається деформація.

Ці процеси добре відображає модель Баттерворта - Ван Дайка (BvD), в якій присутні основні параметри ультразвукових перетворювачів [17,18]. Модель використовує аналогію механічних та електричних параметрів ультразвукового перетворювача (табл.1).

З урахуванням цієї аналогії для моделювання ультразвукового перетворювача зручно використовувати теорію електричних кіл (рис. 2) [17-19].

Таблиця 1

Аналогія механічних та електричних параметрів ультразвукового перетворювача [19, 20-22]

Механічний параметр	Символ механічний		Символ електричний	Електричний параметр
Маса	m	$\leftrightarrow$	L	Індуктивність
Демпфування	d	$\leftrightarrow$	R	Індуктивність
Постійна пружності	c	$\leftrightarrow$	$1/C$	1/Ємність
Сила	F_0	$\leftrightarrow$	V_0	Напруга
Переміщення	x	$\leftrightarrow$	Q	Заряд
Швидкість	$\dot{x} = \frac{dx}{dt} = v$	$\leftrightarrow$	$\dot{Q} = \frac{dQ}{dt} = i$	Струм
Прискорення	$\ddot{x} = \frac{d^2x}{dt^2} = a$	$\leftrightarrow$	$\ddot{Q} = \frac{d^2Q}{dt^2} = \frac{di}{dt}$	Швидкість зміни струму

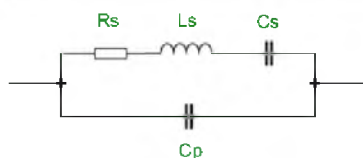


Рис. 2. Модель ультразвукового перетворювача Баттерворта - Ван Дайка (BvD)

На рис. 2 наведені: послідовно з'єднані R_s , L_s , C_s – механічна (акустична) гілка, що описує сам перетворювач, C_p – паралельна електрична гілка, яка описує електричні з'єднання [17, 18].

Комплексний імпеданс перетворювача визначається виразом

$$Z = R + jX, \quad (12)$$

де R - активний опір, X - реактивний опір.

Імпеданс гілки Z_s із послідовно з'єднаними R_s , L_s , C_s обчислюється за формулою

$$Z_s = R_s + j \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \right), \quad (13)$$

де ω - кутова частота, R_s - резистор, L_s - індуктивність, C_s - ємність послідовної гілки моделі BvD (рис. 2).

Імпеданс паралельної гілки Z_p визначається ємністю C_p

$$Z_p = \frac{1}{j\omega C_p}. \quad (14)$$

Об'єднання рівняння 12 з рівняннями 13 та 14 дає

$$Z = \left[\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \right) - jR_s \right] / \left[j\omega R_s C_p + j \left(\omega^2 L_s C_p - \frac{C_p}{C_s} - 1 \right) \right]. \quad (15)$$

При роботі ультразвукового перетворювача в режимі генерації на його резонансній частоті він підключається до джерела збудження з низьким імпедансом, наприклад, до генератора сигналів. При цьому паралельна ємність C_p і тим самим ультразвуковий перетворювач замикається накоротко. На резонансній частоті короткого замикання f_s величина імпедансу мінімальна, ультразвуковий перетворювач споживає максимальну енергію і формує максимальне механічне зміщення. Резонансна частота короткого замикання f_s розраховується за формулою [19,23]

$$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s C_s}}. \quad (16)$$

При роботі ультразвукового перетворювача на резонансній частоті в режимі прийому його підключають до високоомного входу підсилювача. Таким чином, ультразвуковий перетворювач працює як розімкнений ланцюг при високому імпедансі, що відповідає імпедансу підсилювача. Резонансна частота холостого ходу f_0 розраховується за формулою [19,23]

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_s \frac{C_s C_p}{C_s + C_p}}}. \quad (17)$$

Обидва рівняння (16) і (17) для більшості ультразвукових перетворювачів дають хороші наближення щодо їх резонансів f_s та f_0 [19].

Амплітуда та частота сформованих пружних ультразвукових коливань при розповсюдженні їх у досліджуваному середовищі залежить від вмісту і структури розподілу феромагнітного компонента в гірській породі, фізико-механічних характеристик і стану гірського масиву, тобто мінералогічних структурно-текстурних особливостей порід, що його складають. Цей процес обумовлений поглинанням і розсіюванням енергії ультразвукових хвиль і відповідно несе інформацію стосовно середовища розповсюдження.

Параметри пружних коливань (амплітуда і частота), прийнятих приймальним ЕМАП, вимірюються впродовж фіксованого проміжку часу. Величина цього проміжку визначається заздалегідь в процесі лабораторних досліджень таким чином, щоб вона була найкоротшою, але при цьому забезпечувала отримання достатньої інформації для визначення основних характеристикних ознак гірських порід.

Моделювання зазначеної процедури вимірювань відбувалась у два етапи: спочатку визначались особливості формування магнітного поля у феромагнітній гірській породі під впливом електромагнітного імпульсу, а потім імітувалось генерація ультразвукових сигналів у досліджуваному середовищі, та вплив на їх характеристики випадкових збурень.

Магнітне поле, створюване ЕМАП, моделювалось за допомогою програмного пакета Femm [24]. На рис. 3 показані результати вирішення методом кінцевих елементів осесиметричної задачі формування магнітного поля частотою 220 кГц у середовищі, характеристики якого

відповідають гірській породі, що включає феромагнітний компонент. Отримане рішення включає 5631 вузлів, 10915 елементів.

На рис. 4 наведена залежність величини магнітної індукції B від відстані l сердечника магнітної системи перетворювача до поверхні досліджуваного середовища.

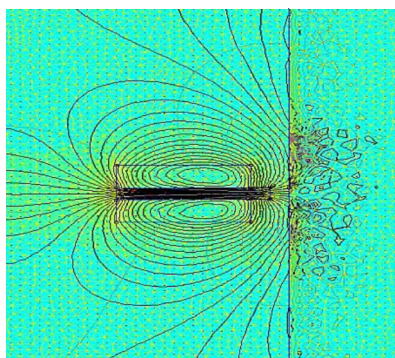


Рис. 3. Результати моделювання магнітного поля, створюваного ЕМАП у досліджуваному середовищі: осесиметричне рішення, частота 220 кГц

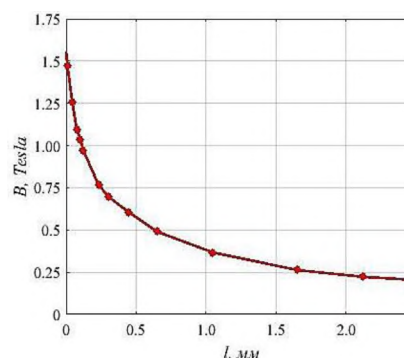
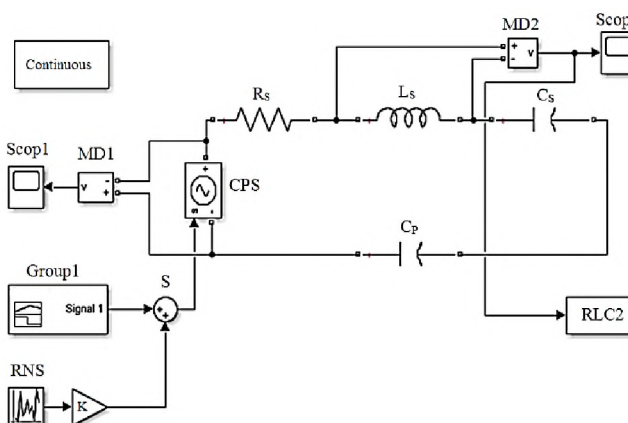


Рис. 4. Залежність величини магнітної індукції B від відстані l сердечника електромагніту до досліджуваного середовища

Моделювання процедури формування ультразвукових хвиль проводилось із застосуванням графічного інтерфейсу Powergui FFT Analysis Tool програмного пакету Simulink/Matlab [25]. На рис. 5 наведена схема, яка досліджувалась в процесі моделювання (відповідає моделі ультразвукового перетворювача Баттерворта - Ван Дайка (BvD)).

Рис. 5. Блок-схема моделі RLC2: Scop1, Scop2 - осцилографи, Group1 - конструктор сигналів, CPS - керуване джерело живлення, RNS - джерело випадкового шуму, MD1, MD2 - вимірювальні пристрої, R_s - резистор, L_s - індуктивність, C_s , C_p - ємності, K - масштабуючий блок, RLC2 - вихід моделі у робочу область Matlab

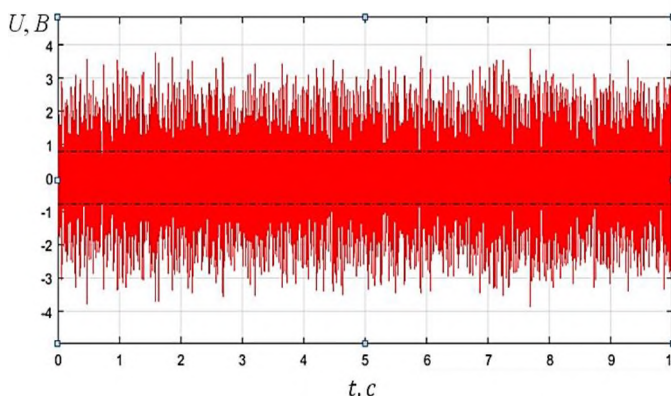


На сформований сигнал частотою 220 кГц накладався випадковий шум різної інтенсивності, проводилась обробка сигналу методом швидкого перетворення Фур'є (FFT) і застосовувались різноманітні методи аналізу отриманих результатів. На рис. 6 наведена реалізація одного із вимірювань на екрані Scop2 (штрихові лінії виділяють середньоквадратичне значення (std) сигналу).

Наявність зазначених особливостей гірського масиву призводить до модуляції ультразвукового сигналу, який в ньому розповсюджується. Формування частот, які відрізняються від частоти основного входного сигналу, є результатом спотворення форми сигналу у часовій області після певної відстані поширення. Ультразвукова хвиля перетворюється через нелінійність середовища розповсюдження, і за рахунок цього формуються інші частоти у її спектрі.

Рис. 6. Вигляд аналізованого сигналу на екрані Scop2

Для кількісної оцінки нелінійних спотворень сигналу, що пройшов через досліджуване середовище, обчислювався коефіцієнт нелінійних спотворень THD (Total Harmonic Distorsions) – величина, що визначається ставленням середньоквадратичного значення всіх вищих гармонік U_n сигналу до напруги першої гармоніки U_1 (основної або фундаментальної)



$$THD = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \quad (18)$$

Виконаний розрахунок THD включає всі інтергармоніки аналізованого сигналу. Вплив змін інтенсивності випадкового шуму на обчислене повне гармонійне спотворення аналізованого сигналу характеризують дані, наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати моделювання впливу змін інтенсивності випадкового шуму на характеристики вихідного сигналу моделі

Параметр	min	max	mean	median	mode	std	range	THD
$K = 1.00$	-3.8627	3.8631	2.2780e-05	-1.9145e-04	-3.8627	0.7935	7.7260	53.82
$K = 0.75$	-2.8965	2.8965	3.0076e-05	2.2771e-04	-2.8965	0.5953	5.7930	53.06
$K = 0.50$	-2.0002	1.9788	1.8948e-05	-2.0719e-04	-2.0002	0.3980	3.9790	46.37
$K = 0.25$	-1.4970	1.3871	-1.0172e-05	1.3191e-04	-1.4970	0.2037	2.8841	45.20

Таким чином, модель електромагнітного акустичного перетворювача дозволяє надати кількісну оцінку впливу нелінійного спотворення сформованого ультразвукового сигналу та випадкового шуму на результати вимірювань.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Запропонований підхід щодо моделювання формування ультразвукових хвиль у феромагнітному провідному середовищі на основі електромагнітного акустичного перетворювача дозволяє дослідити метод неруйнівного безконтактного вимірювання характеристик гірських порід із відповідними властивостями. Сукупність результатів вимірювань параметрів аналізованого сигналу характеризує як лінійні, так і нелінійні характеристики середовища, що моделюється. Для реалізації цього методу акустичного перетворення не потрібна наявність проміжної рідини, чи спеціальних пристроїв для введення пружних коливань у гірський масив, що сприяє розширенню сфери його застосування.

Напрямок подальших досліджень є розробка, моделювання та обґрунтування методу розпізнавання технолого-мінералогічних характеристик феромагнітних гірських порід залізрудного родовища із застосуванням ультразвукового вимірювального каналу на основі електромагнітних акустичних перетворювачів.

Список літератури

1. Furuya Y., Torizuka S., Takeuchi E., Bacher-Höchst M., Kuntz, M. Ultrasonic fatigue testing on notched and smooth specimens of ultrafine-grained steel. *Mater. Des.* 2012, 37, 515–520.
2. Clough M., Fleming M., Dixon S. Circumferential guided wave EMAT system for pipeline screening using shear horizontal ultrasound. *NDT E Int.* 2017, 86, 20–27.
3. Trushkevych O., Edwards R.S. Characterisation of small defects using miniaturised EMAT system. *Ultrasonics* 2019, 107, 102140:1–102140:9.
4. Thring C.B., Fan Y., Edwards R.S. Focused Rayleigh wave EMAT for characterisation of surface-breaking defects. *NDT E Int.* 2016, 81, 20–27.
5. Aliouane S., Hassam M., Badidi Bouda A., Benchaala A. Electromagnetic Acoustic Transducers (EMATs). Design Evaluation of their Performances. <https://www.ndt.net/article/wcndt00/papers/idn591/idn591.htm>.
6. Masahiko Hirao, Hirotugu Ogi. Electromagnetic Acoustic Transducers. - *Springer Series in Measurement Science and Technology* (SSMST), 2017. – 380 p. DOI: 10.1007/978-4-431-56036-4.
7. Huang Songling, Li Weibin, Wang Qing. *Electromagnetic ultrasonic guided waves*. CERN Document Server. - 2016-01-01.
8. Yuedong Xie, Liyuan Yin, Rodriguez G. Sergio, Wuliang Yin. A wholly analytical method for the simulation of an electromagnetic acoustic transducer array - *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*. - August 2016, 51(4):375-389. DOI: 10.3233/JAE-150137.
9. Hirao M., Ogi H. EMATs for Science and Industry: Noncontacting Ultrasonic Measurements; Springer: Boston, MA, USA, 2003; pp. 39–67.
10. Lan J., Zhang J., Jia X., Gao R. Optimization Design of Surface Wave Electromagnetic Acoustic Transducers Based on Simulation Analysis and Orthogonal Test Method. *Sensors*. 2022; 22(2):524. <https://doi.org/10.3390/s22020524>.
11. Li Y., Liu Z., Miao Y., Yuan W., Liu Z. Study of a spiral-coil EMAT for rail subsurface inspection. *Ultrasonics*, 2020, 108, 106169.
12. C. V. Dodd, W. E. Deeds, Analytical solutions to eddy current probe-coil problems, *Journal of Applied Physics*, vol. 39, no. 6, pp. 2829–2838, 1968.
13. Yuedong Xie, Sergio Rodriguez, Wenbo Zhang, Zenghua Liu, Wuliang Yin. Simulation of an Electromagnetic Acoustic Transducer Array by Using Analytical Method and FDTD. - *Journal of Sensors*. Volume 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/5451821>.
14. Suzhen Liu, Ke Chai, Chuang Zhang, Liang Jin, Qingxin Yang. Electromagnetic Acoustic Detection of Steel Plate Defects Based on High-Energy Pulse Excitation. - *Appl. Sci.* 2020, 10, 5534; doi:10.3390/app10165534.
15. E. Bossy. SimSonic Suite User's Guide for SimSonic3D, 2012.

16. **J. Virieux.** P-SV wave propagation in heterogeneous media: velocity-stress finite-difference method, *Geophysics*, vol. 51, no.4, pp. 889–901, 1986.
17. **S. Butterworth.** On Electrically-maintained Vibrations. In: *Proceedings of the Physical Society of London*. Vol. 27. 1914, pp. 410–424.
18. **K. S. Van Dyke.** The Piezo-Electric Resonator and Its Equivalent Network. In: *Proceedings of the Institute of Radio Engineers* 16.6 (June 1928), pp. 742–764. ISSN: 0731-5996. DOI: 10.1109/JRPROC.1928.221466.
19. Luftgekoppelte Ultraschallwandler für die industrielle Anwendung. Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.) genehmigte Dissertation von Alexander Unger aus Cottbus: 19. Juni 2019, Darmstadt - D 17. URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-89745.
20. **G. Sessler, R. Lerch, D. Wolf.** Technische Akustik. 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-23430-2.
21. **W. P. Mason.** Electromechanical Transducers and Wave Filters. 2nd ed. D. van Nostrand Company, Inc., 1942. URL: <https://archive.org/details/in.emet.dli.2015.13601>.
22. **H. F. Olson.** Acoustical Engineering. 1st ed. D. van Nostrand Company, Inc., 1957. URL: http://cyrille.pinton.free.fr/electroac/lectures_utiles/son/Olson.pdf.
23. **W. Weißgerber.** Elektrotechnik für Ingenieure 2. 6th ed. Vieweg, 2007. ISBN: 978-3-8348-0191-3.
24. **Meeker D.** Finite Element Method Magnetics. Version 4.0. User's Manual, January 26, 2004 // <http://femm.berlios.de>, 2003.
25. <https://de.mathworks.com/products/matlab.html>.

Рукопис подано до редакції 24.04.2023

УДК: 624.131.1:69.04

О.О. ЛАПШИН, д-р техн. наук, проф., В.О. ЯРОШЕНКО, аспірант
Криворізький національний університет

ІНЖЕНЕРНА ГЕОЛОГІЯ ТА ГЕОТЕХНІКА В КОНТЕКСТІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ БУДІВЕЛЬ, СПОРУД ТА КОМУНІКАЦІЙ

Мета. Метою статті є ознайомлення з організацією і складом робіт при інженерно-геологічних та інженерно-геотехнічних вишукуваннях, основними задачами передпроектних інженерно-геологічних вишукувань, інженерно-геологічної розвідки, а також зі складом та змістом типових звітів з інженерних досліджень.

Методи дослідження. Аналіз літературних джерел щодо питання інженерно-геологічних та інженерно-геотехнічних вишукувань. Вивчення нормативних документів, державних будівельних норм з огляду питання інженерних вишукувань.

Наукова новизна полягає в: узагальненні та структуруванні інформації щодо організації та складу робіт при інженерно-геологічних, геотехнічних вишукуваннях та надання її широкому загалу; описі основних задач рекогносцирувальних маршрутних обстежень, як основних робіт які передують початку будь-якого об'єкту будівництва; узагальненні та структуруванні інформації щодо основних характеристик ґрунтів та їх розрахунків; описі методів визначення основ, підвалів та фундаментів.

Практична значимість. В даній статті приведені й структуровані матеріали стосовно інженерно-геологічних, геотехнічних робіт, аналізу нормативних документів стосовно даного питання, що можуть слугувати основою для розробки превентивних методів та засобів зменшення шкоди при просіданні земної поверхні, а також інженерного захисту територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів тощо.

Результати. За результатами опрацювання літературних науково-дослідницьких джерел і нормативних документів було вивчено та описано: як стійкість порід впливає на процес будівництва; ведення передпроектних робіт; проведення досліджень. Детально описано для чого потрібні рекогносцирувальні маршрутні обстеження. Вказано, що таке геофізичні дослідження, яку роль вони виконують та приведення діючих державних будівельних норм з їх видів та об'ємів робіт. В результаті виявлено, що геофізичні роботи повинні йти завжди на випередження усіх інших інженерно-геологічних робіт. Описано основні фізичні розрахункові характеристики ґрунтів.

Вказана підбірка методів та їх принципи, за якими можна визначати процеси осідання основ, підвалів та фундаментів. Описана методика розрахунку осідання основ наближеним методом, запропонована професором І. О. Розенфельдом.

Ключові слова: інженерна геологія, будівництво, зсуви, обвал, просідання поверхні, ґрунт, вишукування, геотехнічні роботи, стійкість, землетрус.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. В результаті розробки родовищ корисних копалин впливають серйозні порушення балансу в природі, зокрема порушення стійкості земної поверхні. При будь-якому виді розробки родовищ – відкритому чи шах-

тному способам, в першу чергу необхідно приділяти особливу увагу стійкості ґрунтів, стічним та підземним водам.

Особлива тенденція обвалів спостерігається на Криворіжжі – великому промисловому місті, де знаходиться найбільша в Європі шахта «Родіна» та ще багато інших. На практиці існує багато прикладів обвалення земної поверхні, подекуди зі смертельними випадками. Так от наприклад у 2010 році, в результаті недостатньої стійкості ґрунтів, на шахті ім. Орджонікідзе стався обвал при проведенні планових підривних робіт площею приблизно 16 га, як наслідок 4 одиниці автотранспорту провалилися під землю та 1-чоловік загинув. Вже наступного року відбулося таке природне явище як землетрус, близько 4 балів, зі значною площею просідання земної поверхні, на щастя ніхто не постраждав.

В результаті таких спостережень та вивчення статистичних даних постають наукові задачі в розробці методів за для запобігання подібних випадків, та рекомендацій щодо більш ретельного вивчення питання стійкості земної поверхні.

Аналіз досліджень і публікацій. Ознайомившись та зробивши аналіз державних стандартів України [1, 3-6] було ознайомлено із загальними положеннями цих стандартів, порядком лабораторних випробувань, а також вивчено встановлення методів польового визначення характеристик міцності та деформованості ґрунтів при їх дослідженні для будівельних робіт. Окрім основ та підвалин будинків та споруд, вивчено:

- методи статистичної обробки результатів випробувань;
- методи лабораторного визначення гранулометричного та мікро-агрегатного складу;
- методи польових випробувань статистичним та динамічним зондуванням.

Згідно із державними будівельними нормами [2, 7] перед початком будівництва споруд або конструкцій промислового значення виконується низка регламентованих геофізичних робіт. Такі роботи проводяться з метою визначення структурно-тектонічної будови, простягання та глибини залягання ґрунтів різного літологічного складу, а саме текстури, структури та походження, їх властивості, виявлення інженерно-геологічних процесів та можливих геофізичних аномалій, сейсмічної активності і таке інше.

Вивчаючи матеріали літературних джерел [8-10] було визначено основи інженерної геології, а саме: походження гірських порід та їх відмінні ознаки; геологічні та інженерно-геологічні процеси; основи гідрогеології та ґрунтознавства, поняття закону ущільнення; методи інженерно-геологічних досліджень.

За допомогою підручників [9, 10] було вивчено механіку ґрунтів та основні принципи проектування основ та фундаментів.

Постановка задачі дослідження полягає у:

- науковому обґрунтуванні взаємозв'язку розробки родовищ корисних копалин зі стійкістю земної поверхні;
- розкритті значення організації інженерно-геологічних та інженерно-геотехнічних вишукувань в період експлуатації будівель та споруд;
- розкритті задач рекогносцирувальних маршрутних обстежень;
- ознайомлення з основними розрахунковими характеристиками ґрунтів та з вимогами при плануванні та виконанні гідрогеологічних досліджень;
- ознайомлення з методами визначення просідань основ та фундаментів.

Викладення матеріалу і результати. Перед початком будівництва об'єктів різного призначення збираються та обробляються матеріали інженерно-геологічних вишукувань минулих років, при цьому обов'язково розглядаються результати геолого-знімальних робіт найбільших масштабів, результати проведення стаціонарних спостережень за режимом підземних вод та інших геологічних процесів, а також слід вивчати і брати до уваги аерокосмічні матеріали, матеріали науково-дослідницьких робіт та науково-технічної літератури, в яких будуть надані відомості про природні та техногенні фактори щодо інженерно-геологічних умов конкретного регіону.

Для будівельного майданчика майбутньої споруди проводиться аналіз можливих забруднень підземних вод, обов'язково перевіряється наявність старих фундаментів а також фундаментів сусідніх споруджень, підземних комунікацій. Особлива увага приділяється досвіду будівельних робіт та експлуатації споруджень та комунікацій з аналогічними геологічними умовами.

В результаті зібраних матеріалів та їх обробки в програмі інженерно-геологічних вишукувань виконується оцінка ступеню вивченості території яка досліджувалася і на її основі формується робоча гіпотеза про інженерно-геологічні умови та встановлюється категорія складності цих умов.

Насамперед складності які можуть виникати в тій чи іншій місцевості пов'язані з регіональними особливостями інженерно-геологічних умов, до того ж вони повинні враховуватись в територіальних будівельних нормах, де більш диференційовано підходять до обліку ландшафт-кліматичних та структурно-геологічних особливостей кожного окремого регіону.

Врешті, після обробки науково обґрунтованої типізації (або генералізації) всіх факторів формується остаточне теоретичне уявлення про складність інженерно-геологічних умов, які впливають на умови будівництва, і які закріплюють у вигляді карт, схем інженерно-геологічної розбивки на сектори, відповідно до тих чи інших умов складності.

Рекогносцирувальні маршрутні обстеження являють собою вид робіт, який може бути як самостійним так і допоміжним, що залежить від комплексу природних умов, наявності варіантів проектних рішень та складності об'єкту будівництва.

До основних задач рекогносцирувальних обстежень та маршрутних спостережень належить: огляд місця вишукувальних робіт; опис природних і штучних оголень гірських порід; візуальна оцінка рельєфу; опис наявності води, штучних водних об'єктів (із виміром рівнів води); опис типів ландшафтів; опис зовнішніх проявів геодинамічних процесів; опис місцевого населення (про надзвичайні ситуації, які мали місце); опис проявів геологічних та інженерно-геологічних процесів (включно описання геоботанічних індикаторів, гідрогеологічних та екологічних умов).

Інженерно-геологічну рекогносцировку проводять з метою оцінки складності геологічних умов, прохідності місцевості та інших критеріїв, які впливають на проведення подальших досліджень, збирання даних для складання програми робіт. Окрім цього рекогносцировку проводять для оцінки якості, уточнення та доповнення зібраних матеріалів щодо району будівництва, порівняння оцінки інженерно-геологічних умов на визначених варіантах майданчика будівельних робіт та трас комунікацій. Проводиться попередня оцінка фізико-геологічних процесів та явищ, можливих змін геологічного середовища в процесі будівництва та експлуатації об'єктів які проектуються.

В ході рекогносцирувального обстеження ведеться відбір контрольних зразків ґрунту або проб води для лабораторних досліджень, проте попередньо перед цим здійснюється планування місць розміщення контрольних ділянок для комплексних досліджень та уточнення результатів попереднього дешифрування аеро-фотознімків.

В результаті усіх вищезазначених робіт складається звіт в якому схематична інженерно-геологічна карта з позначеними лініями маршрутів, точок спостережень контурів виділених об'єктів дослідження буде основним документом.

Геофізичні дослідження для розробки передпроектної документації на великих площах або трасах значної протяжності, у місцях з розвитком небезпечних інженерно-геологічних процесів та в особливих умовах (шельф, урбанізовані та відпрацьовані території), а також у ході моніторингу можливих змін геологічної та екологічної обстановки рекомендується проводити у складі першочергових робіт.

В інженерно-геологічних дослідженнях, геофізичні дослідження мають частковий ряд особливостей:

отримана інформація має інтегральний характер, тобто відноситься саме до визначеного об'єму порід а не до точки опробувань та дозволяє відстежувати геологічні межі безперервно;

в окремих випадках інформація про характеристики масиву може бути отримана переважно за допомогою геофізичних методів, наприклад таких як оцінка неоднорідності масиву, виділення границь залягання покрівлі скельних порід, визначення динамічних модулів пружності тощо;

в більшій кількості випадків геофізичні дослідження ведуться без порушення цілісності геологічного середовища, яке вивчається та може виконуватися велику кількість разів з будь-якою періодичністю без змін умов спостереження, що дає змогу ефективно використовувати їх для перевірки отриманої інформації та проведення моніторингу змін геологічного середовища;

дозволяють проводити дистанційні спостереження, у тому числі в період спостережень, та оцінювати стан порід і локалізувати зони його змін, які прогнозуються, наприклад напруження, суцільність, вологість і таке інше.

Геофізичні методи допомагають успішно вирішити завдання локального характеру з вивчення геологічної будови та граничної неоднорідності показників властивостей ґрунтів. Суттєва і дуже особлива роль геофізики полягає у вирішенні задач сейсмічного мікрорайонування, які охоплюють значні площі. На рисунку (рис. 1), можна ознайомитися з рекомендованими видами та об'ємами геофізичних робіт, які затверджені державними будівельними нормами та мають діючий статус.

С. 54 ДБН А.2.1-1:2008

ДОДАТОК К (рекомендований)

ГЕОФІЗИЧНІ МЕТОДИ В КОМПЛЕКСІ ВИШУКУВАЛЬНИХ РОБІТ

Завдання досліджень	Комплекс геофізичних методів	
	основні	допоміжні
Інженерно-геологічні вишукування		
1 Рельєф покріпів скельних ґрунтів	електророзвідка методами: ГПЗ; ЕП; ВЕЗ УО; сейсморозвідка МПХ	електророзвідка методами: ВЕЗ МДС; ЧЕМЗ; ДЕМП; сейсморозвідка МВХ; правірозвідка
2 Розчленовування геологічного розрізу (встановлення меж між шарами різного літологічного складу й стану в скельних і дисперсних породах)	ВЕЗ; МПХ; ГПЗ; різні види каротажу: - акустичний; - електричний; - радіоізотопний; - геополаритонний	ВЕЗ МДС; ВЕЗ ВП; ЧЕМЗ; ВСР; безперервне сейсмоакустичне профілювання на акваторіях
3 Місце розташування, глибина залягання і форми локальних неоднорідностей: - зона тріщинуватості та тектонічних порушень; - карстові порожнини і підземні виробки; - поховані останці та локальні перевищення в скельній основі; - льодяні і сипльовисті ґрунти; - мікмералотні води і талики	ГПЗ, ВЕЗ УО; ВЕЗ МДС; КВЗ; ПП; МПХ; ВСР; сейсморозвідка міксердоловального простору, витратометрія, різні види каротажу; еманційно-газова зйомка ГПЗ; ЕП; ВЕЗ; КВЗ; ВСР; расхорометрія, резистивіметрія ГПЗ; ВЕЗ УО; ВЕЗ МДС; ЕП; правірозвідка, магніторозвідка ГПЗ; ЕП; ВЕЗ МДС; МПХ; різні види каротажу ГПЗ; ЕП; ВЕЗ МДС; МПХ; термометрія	ВЕЗ ВП; ВЕЗ МДС; радіохвильове просвічування; радіокіп; ДЕМП; магніторозвідка; термометрична зйомка сейсмоакустичне просвічування; радіохвильове просвічування; правірозвідка ДЕМП; сейсмічне просвічування ВЕЗ ВП; ДЕМП; ЧЕМЗ; мікрометаліт зйомка, правірозвідка ПП; ВЕЗ ВП

Рис. 1. Рекомендовані види та об'єми геофізичних робіт

Геофізичні роботи виконують у комплексі з гірничопрохідницькими, геотехнічними та гідрогеологічними роботами або передують їм.

Геофізичні методи використовують з метою вивчення стану ґрунтів, картування аномальних зон, прогнозування розвитку природних і техногенних процесів, визначення глибини закладення та стану фундаментів, пошуку похованих фундаментів, конструкцій, порожнин. При складних інженерно-геологічних умовах зазвичай рекомендовано виконувати геофізичні роботи випереджуючи усі інші види робіт

Як відомо, основними фізичними характеристиками, які визначаються дослідним шляхом є питома вага частинок

ґрунту (кН/м^3), питома вага ґрунту (кН/м^3), пластичність (долі одиниці), вологість (долі одиниці), коефіцієнт фільтрації (м/добу). Усі інші характеристики розраховуються із загально визначених формул (табл.1).

Перейдемо до практичних методів визначення осідань основ та фундаментів. Як виявляється існує чимало методів визначення осідань основ та фундаментів. До таких відносяться метод пошарового підсумування, в основу якого покладені такі принципи:

просідання поверхонь викликане лише дією вертикальних напруг, інші напруги не враховуються;

ґрунт є суцільним, ізотропним, лінійно деформованим тілом;

напругу визначають під центром підошви фундаменту;

відмінністю у стискуванні окремих шарів ґрунтів нехтують, при визначенні напруги;

процеси деформації розглядають тільки в межах товщі, що стискується;

бічне розширення ґрунту в основі неможливе;

незалежно від виду ґрунту, коефіцієнт розширення ґрунту дорівнює 0,8;

фундаменти не мають жорсткості.

Запропонований метод, професором М. О. Цитовичем у 1934р., еквівалентного шару ґрунту заснований на такому принципі, що основу розглядають як лінійно деформований напівпростір, в якому деформації прямо пропорційні напругам та можуть бути визначенні із допомогою теорії пружності.

Таблиця 1

Основні розрахункові фізичні характеристики ґрунтів

Назва	Визначення	Умовні позначення	Формула розрахунку	Одиниця виміру	Граничні межі
Вологість на границі пластичності	вологість, при якій ґрунт переходить із твердого стану в пластичний	w_p		долі одиниці	0,09 – 0,90
Вологість на границі текучості	вологість, при якій ґрунт переходить із пластичного стану в текучий	w_L		долі одиниці	0,15-5,0
Число пластичності	діапазон вологості, в якому ґрунт знаходиться в пластичному стані	I_p	$I_p = w_L - w_p$	долі одиниці	0 – 4,0
Показник текучості	характеристика природного стану ґрунту за пластичністю	I_L	$I_L = W - w_p / I_p$	долі одиниці	-
Питома вага сухого ґрунту	вага одиниці об'єму ґрунту у висушеному стані	γ_d	$\gamma_d = \gamma / (1 + W)$	кН/м³	12,18
Пористість	об'єм пор у загальному об'ємі ґрунту	n	$n = 1 - \gamma_d / \gamma_s$	долі одиниці	0 – 0,80
Коефіцієнт пористості	доля яку складає об'єм пор від об'єму мінеральної частини ґрунту	e	$e = \gamma_s / (\gamma - \gamma_s) - 1$	долі одиниці	0 – 1,5
Ступінь вологості	відношення природної вологості до вологості повної вологості (ступінь заповнення пор водою)	S_r	$S_r = W / e$	долі одиниці	0 - 1
Показник неоднорідності гранулометричного складу	співвідношення діаметру часток, менше яких у ґрунті міститься відповідно 60% та 10% (за масою часток)	C_u	$C_u = d_{60} / d_{10}$	долі одиниці	1- 15
Ступінь щільності пісків	природний ступінь щільності відносно гранично-щільного і гранично-пухкого станів	I_D	$I_D = (e_{max} - e) / (e_{max} - e_{min})$	долі одиниці	0 - 1
Питома вага ґрунту виваженого водою	вага одиниці об'єму ґрунту у виваженому стані	γ_{sb}	$\gamma_{sb} = \gamma_s - \gamma_w / (1 + e)$	кН/м³	7 - 12

Існує метод розрахунку просідання основ з урахуванням сусідніх фундаментів, в даному випадку назва говорить сама за себе, його застосовують якщо поруч розташовані інші фундаменти які будуть впливати на просідання.

Розрахунок осідання основ методом лінійно деформованого шару виконується в окремих випадках, коли виконуються умови:

шар ґрунту з модулем деформації > 100 МПа;

ширина або діаметр фундаменту ≥ 10 м, а модуль деформації при цьому складає ≥ 100 МПа.

Розглянемо розрахунок осідання основ наближеним методом, запропонований професором І. О. Розенфельдом, відповідно до якого

$$S = 1,44 \mu (p - \sigma_{zg0}) / (1 + \mu E_m)$$

де μ - співвідношення сторін фундаменту $\mu = l/b$ (для стрічкового фундаменту $\mu = 10$); p - середній тиск по підшві фундаменту; σ_{zg0} - природна напружка в ґрунті на рівні підшви фундаменту; E_m - середнє значення модуля деформації ґрунтів, що залягають нижче від підшви фундаменту.

На рисунку (рис. 2). Можна побачити схему для визначення середнього значення модуля загальної деформації

$$E_m = \sum_{i=1}^n E_i h_i z_i / H_c^2$$

де E_i - модуль деформації i -го шару; h_i - товщина i -го шару; z_i - відстань від середини i -го шару до межі товщі ґрунту, що стискається; $H_c = kb$ - потужність товщі, що стискається.

Значення коефіцієнта k залежить від співвідношення сторін фундаменту μ (табл. 2).

Таблиця 2

Залежність коефіцієнта k від μ

Н	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	≥ 6 (стрічка)
К	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	2,9	5,5

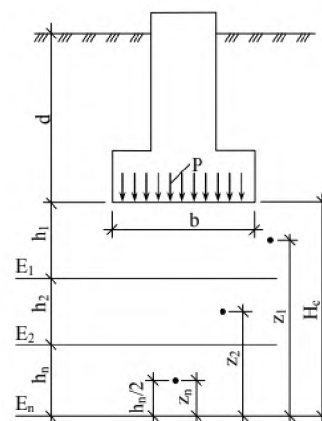


Рис. 2. Схема визначення середнього модуля загальної деформації, за методом І. О. Розенфельда

Висновки та напрямок подальших досліджень. В роботі наведена коротка характеристика організації та складу робіт при інженерно-геологічних і інженерно-геотехнічних вишукуваннях. Надані основні відомості щодо геофізичних досліджень та характеристик ґрунтів. У статті наведені методи, якими можна визначити осідання основ та фундаментів.

Список літератури

1. ДСТУ Б В.2.1-7-2000 (ГОСТ 20276-99) Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи польового визначення характеристик міцності і деформованості.
2. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд.
3. ДСТУ Б В.2.1 – 5-96 «Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи статистичної обробки результатів випробувань»
4. ДСТУ Б В.2.1-3-96. Основи і підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Лабораторні випробування. Загальні положення.
5. ДСТУ Б В.2.1-19:2009. Основи та підвалини будинків і споруд. Ґрунти. Методи лабораторного визначення гранулометричного (зернового) та мікроагрегатного складу».
6. ДСТУ Б В.2.1-9:2016. Ґрунти. Методи польових випробувань статичним і динамічним зондуванням.
7. ДБН А.2.1 – 1 – 2008. Інженерні вишукування для будівництва
8. Білецький В. С. Мала гірнича енциклопедія: у 3 т./ за ред.В. С. Білецького — Д., 2004.— Т. 1: А — К. — 640 с.
9. Суярко В. Г. Інженерна геологія (з основами геотехніки)/ В.Г. Суярко, В. М. Величко, О. В. Гаврилюк, В. В. Сухов, О. В. Нижник, В. С. Білецький, А. В. Матвеев, О. А. Улицький, О. В. Чусенко. За заг. ред. проф. В. Г. Суярка. — Х: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2019. — 278 с.
10. Зоценко М.Л. Інженерна геологія. Механіка ґрунтів, основи і фундаменти/ М. Л. Зоценко, В. І. Коваленко, А. В. Яковлєв, О. О. Петраков, В. Б. Швець, О. В. Школа, С. В. Біда, Ю. Л. Винников. — П.: ПНТУ, 2003. — 13 – 554 с.
11. Oleksandr Ye. Lapshyn, Oleksandr O. Lapshyn, and Mykola Khudyk / The tragic consequences of the collapse of the earth's surface within the mining allotment of Ordzhonikidze mine // E3S Web Conf., - Volume 166, 2020., URL: <https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/26/contents/contents.html>

Рукопис подано до редакції 24.04.2023

УДК 625.861

О.І. ВАЛОВОЙ, канд. техн. наук, проф.,
В.В. АФАНАСЬЄВ, М.О.ВАЛОВОЙ, кандидати техн. наук, доценти
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХВОСТІВ СМС ІНГУЛЕЦЬКОГО ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО КОМБІНАТУ ДЛЯ БУДІВНИЦТВА ТА ВІДНОВЛЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ КОЛІЙ

Мета. Визначення фізико-механічних властивостей піска і щебню з хвостів. Точкові проби хвостів відібрано з терміналу окремої технологічної лінії грохочення. Лабораторні випробування хвостів проведено згідно зі зернового складу, вмісту зерен лещадної і голчатої форми, насипної щільності і пустотності, подрібнення (марки за міцністю).

Методи дослідження. До випробувань використовували лабораторну пробу, яку висушували до постійної маси, з котрої брали аналітичні проби. Просіювали ручним засобом через сита з отворами нормативних розмірів. Результати випробування полягали у визначенні залишку на кожному ситі.

Наукова новизна. Експериментальним шляхом були отримані фізико-механічні показники, дані про хімічний та гранулометричний склад щебеню та піску з відходів збагачення залізних руд.

Практична значимість. Для уникнення деформацій під залізничним навантаженням забезпечують загальну стійкість верхньої будови залізничної колії, стійкість і міцність основного майданчика земляного полотна (упільнення, укоси, берми, укладання геотекстильних матеріалів, запас на осадку). Ці передбачені заходи економічно не завжди є доцільними. З другого боку, запаси нерудних будівельних матеріалів (граніт, то що), які є у залізничному кар'єрі, обмежені, видобуток – епізодичний. У зв'язку з цим для будівництва і відновлення земляного полотна на слабких основах і для верхньої будови залізничних колій актуальним є використання хвостів.

Результати. Щебень з хвостів рекомендовано застосовувати для підсилення слабких основ при будівництві земляного полотна залізничних колій. Щебень з хвостів рекомендовано застосовувати для верхньої будови залізничних колій. За рахунок використання відходів при будівництві залізниць у залізобетонних блоках можливо суттєве покращення екологічного стану підприємства на відвалах та в кар'єрі. Нова розроблена конструкція верхньої будови залізничної колії є екологічно захищеною від утворення пилу, допускає роботи з виправлення колії, заміни шпал і рейок.

Ключові слова: щебень, залізничні колії, відходи збагачення, міцність

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Будівництво і відновлення залізниць в умовах існуючого кар'єру та відвалів розкривних гірських порід Інгулецького гірничозбагачувального комбінату (ПАТ «ІнгЗК») виконується безперервно і цілорічно. При погонному навантаженні від локомотива та думкару виявляються залишкові опади, підняття, зміщення, пошкодження або руйнування земляного полотна та його елементів від природних, техногенних впливів та поїздного навантаження. Утворюються нерівності позовного профілю довжиною болем 25м. Виникають відхилення конструктивного геометричного положення рейкової колії від проєктованого, що нормується. Мають місце відмови в роботі, які полягають у порушенні працездатності рейкошпальних ґрат верхньої будови колії локомотивом при його сходженнях (відрив, перелом підрейкової основи). У цих випадках верхня будова залізничної колії виконується з утопленою баластною призмою і проводяться часті ремонти. Для будівництва залізничних колій [5] комбінат використовує скальні щільні гірські породи кар'єру (граніт, тощо), які попутно розробляють, та хвости сухої магнітної сепарації (СМС) [2].

Хвости СМС мають крупність 0-70 мм. Утворюються у поточному виробництві рудозбагачувальної фабрики комбінату, де виконано термінал для тимчасового їх зберігання, з якого відбувається відвантаження для внутрішнього використання при будівництві залізничних колій. Нереалізована частина відходів СМС вивозиться у відвал розкривних порід. Для розподілення хвостів СМС в технологічній лінії фабрики створена окрема технологічна лінія грохочення, де отримують фракції щебінь 0-5мм, 5-10мм, 10-20мм, 20-40 мм. Хвости СМС після розподілу фракцій складають у відкритих конусних терміналах технологічної лінії грохочення і використовують разом з хвостами СМС крупністю 0-70 мм.

Аналіз досліджень і публікацій. Для уникнення деформацій під залізничним навантаженням забезпечують загальну стійкість верхньої будови залізничної колії, стійкість і міцність основного майданчика земляного полотна (ущільнення, укосу, берми, укладання геотекстильних матеріалів, запас на осадку). Ці передбачені заходи економічно не завжди є доцільними. З другого боку, запаси нерудних будівельних матеріалів (граніт, то що), які є у залізничному кар'єрі, обмежені, видобуток - епізодичний. У зв'язку з цим для будівництва і відновлення земляного полотна на слабких основах і для верхньої будови залізничних колій [1] актуальним є використання хвостів СМС.

Постановка задачі. Визначення зернового складу. Для визначення фізико-механічних властивостей приймали пісок і щебінь з хвостів СМС ПАТ «ІнгЗК». Точкові проби хвостів СМС відібрано з терміналу окремої технологічної лінії грохочення (рис. 1).

Лабораторні випробування хвостів СМС проведено згідно [2] зі зернового складу, вмісту зерен лещадної і голчатої форми, насипної щільності і пустотності, подрібнення (марки за міцністю).

Викладення матеріалу та результати. Визначення зернового складу. До випробувань використовували лабораторну пробу, яку висушували до постійної маси, з котрої брали аналітичні проби. Просіювали ручним засобом через сита з отворами нормативних розмірів [2] (рис. 2). Результати випробування полягали у визначенні частинного залишку на кожному ситі.



Рис. 1. Хвости СМС у відкритому конусному терміналі технологічної лінії грохочення ПАТ «ІнгЗК»



Рис. 2. Просіювання навішування класу 0-70 мм на стандартному наборі сит

Зерновий склад суміші 0 – 70 мм з хвостів СМС представлено у табл. 1.

Таблиця 1

Зерновий склад хвостів 0-70 мм СМС, маса проби 5675 г

Найменування залишку	Залишки, за масою на ситах										Дно
	40	20	10	7,5	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	-0,16
на ситі, мі, г	59	2212,5	2828,5	385,5	129,5	33,5	3,5	-	-	19	4
аі, %	1	39	49,8	6,8	2,3	0,6	0,1			0,3	0,1
Повний, m повн, %	1	40	89,8	96,6	98,9	99,5	99,6	-	-	99,9	100

Суміш піску 0 – 5 мм з хвостів СМС, котра по залишкам на ситах і модулю крупності перевірялась на відповідність будівельному піску за нормативними документами [2, 4/ приведено у табл. 2.

Обробка результатів. Для класу 0 -70 мм з хвостів СМС максимальний відсоток щебіню у фракції 40-70 мм (1%), 20-40 мм (39%), 10-20 мм (49,8%), відповідає [2], п. 5.5. Пісок 0 -5 мм з хвостів СМС за $M_{кр} = 3,1$ є підвищеної крупності, а за повним залишком на ситі № 063, у відсотках за масою, 53% відповідає крупному піску [2].

Визначення вмісту зерен лещадної і голчатої форми. Визначення вмісту зерен лещадної і голчатої форми у щебені з хвостів СМС ПАТ «ІнГЗК» [3/ приведено у табл. 3.

Обробка результатів: вміст зерен лещадної (голчатої) форми у щебені 5 -40 мм з хвостів СМС ПАТ «ІнГЗК»: $P_{пл} = 0,14/1000 \times 100\% = 0,1\%$, $P_{пл} = 1479/5000 \times 100\% = 3\%$. Група щебіню 5 -40 мм за формою зерен з хвостів СМС ПАТ «ІнГЗК»: 5-10 мм – 2 (поліпшена); 10-20 мм –2 (поліпшена); 20-40 мм – (звичайна).

Таблиця 2

Зерновий склад піску 0-5 мм з хвостів СМС, 1755г

Сита, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	-0,16
мі, г	724	131	218	166	214	229
аі, %	44	7	12	9	12	16
mповн, %	44	51	53	72	84	100
Модуль крупності, $M_{кр}$	3,1					

Таблиця 3

Вміст зерен лещадної (голчатої) форми у щебені 5 -40 мм з хвостів СМС

Найменування залишку	Залишки, за масою на ситах		
	5-10	10-20	20-40
m, г	10000	1000	5000
Кубічн., г	6995	688	524
m1, г	0,14	12	148
$P_{пл}$, %	0	1	0

Визначення насипної щільності. Щебін з хвостів СМС насипали в попередньо зважений вимірювальний циліндр, після чого зважували циліндр зі щебенем [3]. Зважування мірного циліндру зі щебенем (m1) на настільних електричних вагах показано на рис. 3. Результати визначення насипної щільності і пустотності щебіню фракції 5-40 мм з хвостів СМС ПАТ «ІнГЗК» приведено у табл. 4, 5, де кожної фракції щебіня співпадав мірний циліндр ємності V за [3] п. 4.17.2.1. При цьому було прийнято дві аналітичні проби сумішей щебіня (1) і (2). Насипна щільність суміші піску 0-5мм; 0,16-5мм з хвостів СМС ПАТ «ІнГЗК» приведена у табл. 6.



Рис.3. Зважування вимірювального циліндру зі щебенем на настільних електричних вагах

Обробка результатів. По визначенню насипної щільності і пустотності суміші (1) щебіня 5-40 мм з хвостів СМС ІнГЗК: $\rho_n(5-10) = 1700 \text{ кг/м}^3$; $V_{п(5-10)} = 6\%$; $\rho_n(10-20) = 1800 \text{ кг/м}^3$; $V_{п(10-20)} = 2\%$; $\rho_n(20-40) = 1800 \text{ кг/м}^3$; $V_{п(20-40)} = 2\%$.

Обробка результатів. По визначенню насипної щільності і пустотності суміші (2) щебіня 5-40 мм з хвостів СМС ІнГЗК: $\rho_n(5-10) = 1580 \text{ кг/м}^3 = 1600 \text{ кг/м}^3$; $V_{п(5-10)} = 40\%$; $\rho_n(10-20) = 1800 \text{ кг/м}^3$; $V_{п(10-20)} = 2\%$; $\rho_n(20-40) = 1520 \text{ кг/м}^3$; значення

наважки за [3/ збільшуємо на 5%: $\rho_n(20-40) = 1,52 + 1,52 \times 0,05 = 1600 \text{ кг/м}^3$. $V_{п(20-40)} = 40\%$.

Хвости СМС ПАТ «ІнГЗК» складаються з щільної гірської породи, насипна щільність щебіня з якої 1600...1800 кг/м³.

Таблиця 4
Насипна щільність суміші (1) щебіня 5-40 мм
з хвостів СМС

V	5л	10л	20л
Фракція	5-10	10-20	20-40
m1/m	948/542	19969/1440	878/2880
ρн	1,7	1,8	1,8

Таблиця 5
Насипна щільність суміші (2) щебіня 5-40 мм
з хвостів СМС

V	5л	10л	20л
Фракція	5-10	10-20	20-40
m1/m	840/542	19450/1440	16650/1440
ρн	1,6	1,8	1,6

Таблиця 6
Насипна щільність суміші піску 0-5мм; 0,16-5мм з
хвостів СМС

V	1л	1л
Фракція	0-5мм	0,16-5мм
m1	1959	170
m	215	215



Рис. 4. Встановлення циліндру з наважкою
щебіня з хвостів СМС під прес

Обробка результатів: по визначенню насипної щільності суміші піску 0-5мм; 0,16-5мм з хвостів СМС ІнГЗК: $\rho_n(0-5)=1700 \text{ кг/м}^3$; $\rho_n(0,16-5)=1500 \text{ кг/м}^3$.

Визначення подрібнення щебіня з хвостів СМС. Встановлення циліндру з наважкою щебіня фракції 20-40 мм з хвостів СМС під прес показано на рис. 4. Наважку щебіня з хвостів СМС ІнГЗК під навантаженням 200 кН показано на рис. 5, зважування наважки щебіня з хвостів СМС ІнГЗК після дроблення – на рис. 6.



Рис. 5. Наважка щебіня з хвостів СМС ІнГЗК
після навантаження



Рис. 6. Зважування наважки щебіня з хвостів
СМС ІнГЗК після дроблення

Результати визначення дроблення щебіня з хвостів СМС ІнГЗК приведено у табл. 7.

Обробка результатів з визначення дроблення щебіня фракції 20-40 мм з хвостів СМС ІнГЗК: $D_r = (m - m_1) / m = 6,3\%$. Для щебіня з хвостів СМС ПАТ «ІнГЗК» приймаємо марку дроблення 1400.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Для верхньої будови залізничної колії кар'єру та відвалів оптимальними для ПрАТ «ІнГЗК» є хвости СМС з наступними фізико-механічними властивостями: за міцністю відповідають щебеню для будівельних робіт; за щільністю – 1600 кг/м^3 ; містять зерен лещадної та голчастої форми менш ніж 35%; являють собою якісну суміш щебеню 10-70 мм (84...99%), мінімально «подрібнені» крупністю 0 -1,25 мм (0,1...2%) [1].

Таблиця 7
Подрібнення щебіня 20-40 мм з хвостів СМС

Фракція, мм	20-40
m, г	2727
m1, г	2554

За рахунок використання відходів СМС при будівництві залізниць у залізобетонних блоках можливо суттєве покращення екологічного стану підприємства ПАТ «ІнГЗК» на відвалах та в кар'єрі.

Нова розроблена конструкція верхньої будови залізничної колії є екологічно захищеною від утворювання пилу, допускає роботи з виправлення колії, заміни шпал і рейок.

Список літератури

1. Патент № 151112 України, МПК (2009), E01B 2/00 Верхня будова залізничної колії/ авт. Валоной О.І., Афанасьєв В.В., Валоной М.О., Гавриленко О.Ю., Волков С.О. - опубл. 08.06.22, Бюл.№ 23.
2. ДСТУ Б В.2.7-33-2001 Пісок кварцево-залізистий і тонкодисперсна фракція для будівельних робіт з відходів гірничо-збагачувальних комбінатів України. Технічні умови. Наказ держбуду України від 31 жовтня 2001 р. № 206.
3. ДСТУ Б В.2.7-71-98 Будівельні матеріали. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт.
4. ДСТУ Б В.2.7-32 95 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Наказ від 31.10.1995 № 211.
5. СНІП 32-01-95 Залізнична колія 1520 мм. Наказ Мінбуду Росії від 18 жовтня 1995 р. № 18-94.

Рукопис подано до редакції 25.04.2023

УДК 622.235:622.271

Д.Ю. МАЛИХ, гірн. інж., заст. ген. директора з виробництва,
ПАТ «Інгулецький гірничо-збагачувальний комбінат»

Г.І. ЄРЕМЕНКО, канд. техн. наук, доц., Д.А. ТІТОВ, магістр, Академія гірничих наук України

УТОЧНЕННЯ РОЗРАХУНКУ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД СВЕРДЛОВИННИМИ ЗАРЯДАМИ З ДИФЕРЕНЦІЙОВАНО РОЗПОДІЛЕНОЮ ВР В ЇХ РЯДАХ

Основною метою дослідження є уточнення розрахунків при математичному моделюванні взаємодії свердловинних зарядів, у яких частини вибухової речовини розосереджені по довжині свердловини інертним матеріалом, які підриваються послідовно. При цьому проаналізовано особливості динамічного навантаження скельного масиву, який підривається, в залежності від послідовності відривання цих зарядів та їх частин. Це уточнення стосується удосконалення методики параметричних розрахунків і спрямоване на вирішення актуальної проблеми – зниження питомої витрати вибухових речовин для руйнування скельних гірських порід.

Методами дослідження є аналіз геомеханічних процесів математичним моделюванням динамічного напруження породного масиву вибухом на відкритих гірничих розробках.

Наукова новизна дослідження полягає в уточненні закономірностей взаємодії енергії вибуху свердловинних зарядів спеціальної конструкції з оточуючим їх скельним масивом.

Практичне значення. Подальший розвиток і виробниче застосування результатів досліджень забезпечить значне зниження собівартості залізничної продукції за рахунок підвищення ефективності бурових і вибухових робіт у залізничному кар'єрі.

Результати. Для теорії і практики ведення вибухових робіт важливо знати особливості формування і взаємодії силових полів свердловинних зарядів ВР, що підривають із затримкою. Основну роль в процесі руйнування гірського масиву за цих умов відіграє конструкція підривних свердловинних зарядів. Підбором мас зарядів з різним співвідношенням їх частин в свердловинах послідовних рядів і варіюванням тривалості затримки між вибухами можна регулювати процес вибухового навантаження в залежності від конкретних гірничо-геологічних умов ведення вибухових робіт. За рахунок зміни способів формування і порядку підривання зарядів ВР в руйнованому обсязі, можна впливати на процес руйнування, знаючи особливості формування силових полів. З огляду на часові та геометричні характеристики породного масиву, можна припустити, що його напружений стан буде повністю відповідати фізичним параметрам інтегральної зони, за яких втрата енергії вибухових хвиль мінімізується. Отримані результати можуть бути використані для розробки вибухових технологій, заснованих на руйнуванні гірського масиву, приведенного попередньо в напружений стан від вибуху зарядів ВР, конструкція яких пропонується авторами даного дослідження.

Ключові слова: гірська порода, вибух, вибухове руйнування, скельне середовище, свердловинні заряди.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Одним з основних показників ефективності роботи буро-підривного комплексу є якість дроблення підірваної гірни-

чої маси. Складові технології ведення буро-підричних робіт (БПР) значною мірою впливають на характер розподілення енергії вибуху в руйнованому масиві гірських порід і, як наслідок, – на інтенсивність його дроблення. Власне, проблема полягає в незадовільному гранулометричному складі підірваної гірничої маси і на підвищення якості цього показника спрямовано більшість завдань сучасної гірничої науки.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Основні положення теорії вибухового руйнування кристалічних масивів [1-4] і досвід практики БПР [5-7] переконливо доводить, що одним з найменш досліджених теоретично і не вирішених практично питань є нерівномірний розподіл енергії вибуху в об'ємі масиву, особливо при формуванні навантаження крайової зони уступу, оптимізувати що стає можливим при цілеспрямованому використанні ефектів розвитку тензора напружень динамічної зони руйнування, створюваної силовими полями взаємодіючих свердловинних зарядів приконтурних рядів [8-10]. Саме це й зумовило, що в дослідження закладалася ідея можливості штучного створення та продуктивного використання динамічних ефектів, які проявляються при взаємодії свердловинних зарядів, для вирішення чого задачі досліджень формувалися згідно з нею.

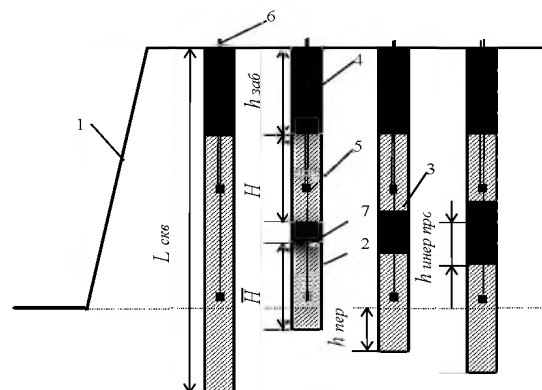
Постановка задачі. Сучасні методи ведення вибухових робіт об'єднує те, що уступ гірських порід, який руйнується, піддається вибуховому впливу від раніше виконаних вибухів. Вочевидь, що наявність негабаритної фракції, зазвичай, пов'язана з тим, що гірський масив, який руйнується, має неоднорідну цілісність через утворення в його верхній частині хаотичної штучної системи структурних порушень і заколів від дії раніше виконаних вибухів, як на верхніх, так і на суміжних уступах. Цей фактор необхідно по-новому враховувати під час визначення параметрів БПР, враховуючи значні непродуктивні втрати енергії вибуху. Основну роль в процесі руйнування гірського масиву за цих умов відіграє конструкція підричних свердловинних зарядів. Підбором мас зарядів з різним співвідношенням їх частин в свердловинах послідовних рядів і варіюванням тривалості затримки між вибухами можна регулювати процес вибухового навантаження в залежності від конкретних гірничо-геологічних умов ведення вибухових робіт. За рахунок зміни способів формування і порядку підривання зарядів ВР в руйнованому обсязі, можна впливати на процес руйнування, знаючи особливості формування силових полів.

Викладення матеріалу та результати. Суттєво зменшити негативний вплив енергії вибуху на законтурний масив найбільш реально шляхом зміни традиційних способів ведення БПР. Для розв'язання даного завдання авторами й було розроблено представлений нижче спосіб руйнування гірських порід свердловинними зарядами з дозовано диференційованою вздовж свердловини ВР розосередженого заряду.

У вибуховій справі розроблено багато технологічних прийомів, що дозволяють керувати процесом розподілу енергії вибуху в породному масиві, залежно від конкретних гірничо-геологічних умов ведення БПР. Для отримання необхідного результату варіюють просторовим розташуванням зарядів ВР у гірському масиві, конструкцією зарядів, а також – часом та послідовністю їх підривання.

Розроблений спосіб полягає в тому, що при підготовці рудного тіла для руйнування бурять свердловини 2 і формують у них заряди ВР 3, як показано на рис. 1. Свердловини на уступі 1 буряться відповідно до розробленого паспорта БПР, виходячи з технології гірничих робіт і фізико-механічних властивостей гірських порід.

Рис. 1. Спосіб руйнування гірських порід свердловинними зарядами з лінійно диференційованою ВР: 1 – уступ; 2 – свердловини; 3 – заряд ВР; 4 – забійка; 5 – проміжний детонатор; 6 – хвилеводи; 7 – інертний проміжок



У розробленому способі буріння свердловин і формування свердловинних зарядів, здійснюють при виконанні умови

$$H \geq \bar{H}, \quad (1)$$

де H – довжина верхнього заряду ВР (м); $\bar{H}$ – довжина нижнього заряду ВР (м).

Довжина кожного наступного інертного проміжку та перебурювання, починаючи з друго-

го ряду, визначається з рівняння

$$h_i = \bar{h}_i = h_0 + m(i - 2), (i = 2, 3, \dots); \quad (2)$$

$$m = 0,025 f, \quad (3)$$

де h_0 – мінімально допустима довжина інертного проміжку за паспортом БПР (м); h_i – довжина інертного проміжку i -ї свердловини (м); $\bar{h}_i$ – довжина перебуру i -ї свердловини (м); m – коефіцієнт лінійної диференціації зарядів ВР; f – коефіцієнт міцності порід.

На рис. 2 подано зв'язок між коефіцієнтом лінійної диференціації зарядів ВР і коефіцієнтом міцності гірських порід.

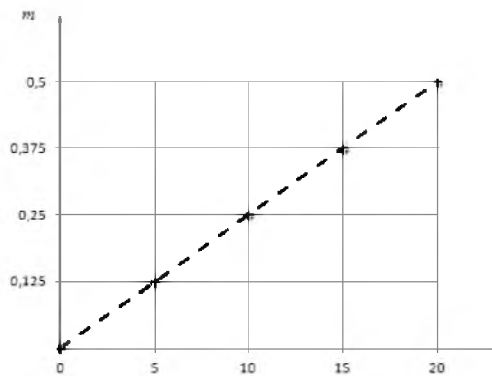


Рис. 2. Залежність між коефіцієнтом лінійної диференціації зарядів ВР (m) і коефіцієнтом міцності порід (f)

Довжина перебуру першої свердловини береться згідно з паспортом БПР для конкретних гірничотехнічних умов. Довжина забійки 4 для першого та для всіх наступних свердловин 2 – величина постійна, обумовлена чинним паспортом. Згідно з паспортом визначаються і параметри заряду ВР для першої свердловини.

У свердловинних зарядах 3, починаючи з другої свердловини 2, використовують інертні проміжки 7, із подальшим їх збільшенням за аналогічним алгоритмом, як і для випадків формування перебурування.

При цьому співвідношення між довжиною верхнього заряду ВР та нижнього заряду має бути більшим або однаковим. В усіх свердловинних зарядах ВР 3, у верхній і нижній частинах, установлюють проміжні детонатори 5. Використовуючи при розрахунках свердловинних зарядів коефіцієнт m лінійної диференціації, можна формувати заряди так, щоб знизити одночасно негативний вибуховий вплив, як на нижній лежачий, так і на суміжний уступ. Це досягається за рахунок перерозподілу енергії ВР у руйнованому уступі порід.

Слід зазначити, що використання коефіцієнта лінійної диференціації m дозволяє дуже легко проводити розрахунок параметрів свердловинних зарядів ВР при впровадженні розробленого способу (рис. 3).

Дослідимо процес руйнування гірського масиву при вибухових навантаженнях. Під час вибуху свердловинного заряду в масиві, руйнування відбувається в області, що безпосередньо прилягає до вибухової камери. Рівняння руху границі останньої згідно з [11] має вигляд

$$\frac{da'}{d \ln a} + a_i (a')^2 + \gamma_2 a^{4\gamma_1} \left(\frac{\varepsilon^{-2\nu_1} - 1}{2\nu_1} + \ln \left(\frac{(1+h) \cdot a'}{\varepsilon'_0 \cdot a} \right) - \varepsilon^{-2\nu_1} \ln \left(\frac{1+n}{\varepsilon'_0} \cdot \varepsilon^{\frac{2}{1+n}} \cdot \frac{a'}{a} \right)^{2\nu_1} \right) = \frac{\beta_1}{\rho_0} P(a) + \gamma_1, \quad (4)$$

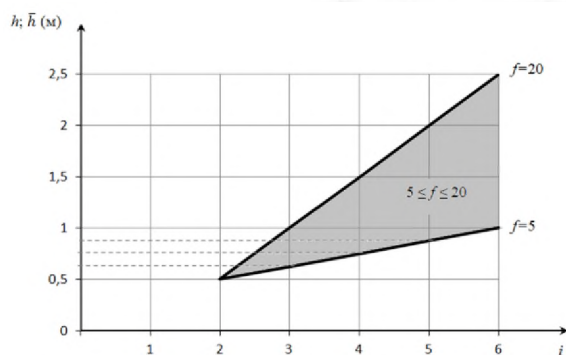


Рис. 3. Розрахунок параметрів свердловинних зарядів ВР (i – номер свердловини)

Аналітичне рішення, що визначає радіус порожнини в поточний момент часу згідно з (4)

$$a''^2 = \frac{c_1}{a^{\alpha_1}} + \frac{\gamma_1}{\alpha_1} + \frac{\beta_1 P}{\rho_0 (\alpha_1 - 3\gamma)}, \quad (5)$$

де c_1 – стала інтегрування; α_1 , β_1 , γ_1 , γ_2 – функції, що залежать від A , k , δ – швидкості дилатації середовища, коефіцієнта зчеплення й кута внутрішнього тертя відповідно.

Значення n визначено як $n = (1-A)/(1+A)$.

З віддаленням від центру вибуху напруження зменшується, у результаті чого навколо заряду після зони «перемелювання» утворюється зона радіальних тріщин. Однією з моделей такої системи є система паралельних тріщин [2, 12]. Принцип крихкого руйнування тіла, згідно з яким розвиток тріщин відбувається тільки, якщо швидкість звільнення енергії пружної деформації перевищить приріст поверхневої енергії тріщини, був сформульований у [13]

$$\frac{\partial \Delta U}{\partial t} > 4\gamma, \quad (6)$$

де ΔU – зміна пружного потенціалу внаслідок наявності тріщини; γ – поверхнева енергія одиниці вільної поверхні.

Значення ΔU дорівнює добутку середньої площі області концентрації напружень на середнє значення щільності пружного потенціалу, пропорційному $P^2 \cdot E^{-1}$, тобто

$$\Delta U = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot l^2 \cdot P^2 \cdot E^{-1}, \quad (7)$$

де l – довжина тріщини (м); P – значення тиску, за якого відбувається розвиток тріщини (Па).

Так як початковий пружний потенціал середовища не залежить від довжини тріщини l , то згідно з останньою формулою

$$2E\gamma = \sqrt{\frac{2}{\pi}} P^2 l. \quad (8)$$

З останнього рівняння одержимо залежність навантаження від довжини тріщини, Па.

$$P^2 = \frac{2(\pi E \gamma)^2}{l}, \quad (9)$$

На початку зі збільшенням навантаження P довжина початкової тріщини l_0 залишається незмінною, поки не досягається значення P , після чого починається процес розвитку тріщини.

Однією з перших робіт, присвячених опису процесу розвитку тріщин і відповідаючою реальним умовам руйнуванням твердшого середовища, була робота [14].

З умови, що

$$\frac{\partial W}{\partial l} = \frac{\partial \Pi}{\partial l} + \frac{\partial T}{\partial l} \quad (10)$$

була отримана формула, яка визначає швидкість розвитку тріщини

$$V = K \sqrt{\frac{E}{P}} \times \left(1 - \frac{l}{l_0}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

де W – потенціальна енергія деформації; Π – поверхнева енергія; l_0 – довжина рівноважної тріщини; K – емпірична константа; T – кінетична енергія.

Надалі в роботах [15, 16] вираз набув вигляду

$$\frac{\partial W}{\partial l} = \frac{\partial \Pi}{\partial l} + \frac{\partial T}{\partial l} - \left(\frac{\partial}{\partial t}\right) \int \rho \left(\frac{u \partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{v \partial^2 v}{\partial t^2} \right) dx dy, \quad (12)$$

де u і v – потенціали вектора зміщення.

Кінетична енергія при вибуху серії зарядів ВР визначається [17, 18] як, Дж

$$T = T_1 + T_2, \quad (13)$$

де T_1 – енергія, отримана в результаті імпульсного впливу вибуху, Дж; T_2 – енергія стиснених вибухових газів, Дж.

Складові кінетичної енергії середовища з урахуванням (13), відповідно дорівнюють

$$T_1 = \frac{2\pi\rho_0 \times a'^2 a^3}{3-2n} \left(1 - \varepsilon^{\frac{2n-1}{n+1}}\right) \quad (14)$$

$$T_2 = \frac{4\pi\rho_0 \times a^3}{3(y-1)} \left(\frac{a_0}{a}\right)^{3y} \quad (15)$$

де a_0 , a – відповідно, радіус вибухової порожнини в початковий та поточний момент часу.

Формули (14) та (15) визначено за умови, що кінетична енергія, яка припадає на одиницю довжини циліндричного заряду, визначається [18] як, Дж

$$W = \frac{\rho_0 \pi a'^2 \times a^2}{2(n-1)}. \quad (16)$$

Схеми побудови математичних моделей вибухового руйнування твердого середовища ґрунтуються на якісному аналізі явища, що розглядається. Причому, за необхідності, складні процеси розчленовуються на окремі гранично прості блоки, що враховують лише основні риси

явища. Після формулювання зроблених припущень, окремі блоки зводяться в одне рішення поставленої задачі в цілому. Досліджуючи дію вибуху заряду ВР, оточеного з усіх боків суцільним середовищем, зроблено припущення про нестисливість твердого середовища та про миттєвість дії вибуху [19]. У цьому було поставлено завдання визначення рівняння руху середовища. Навколо довільної точки простору було розглянуто елементарний паралелепіпед, ребра якого – паралельні осям координат і дорівнюють відповідно dx , dy , dz .

Розглянувши потік середовища, що проходить через кожну грань, була отримана загальна маса, що вийшла з цієї області

$$\left(\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} \right) dx dy dz, \quad (17)$$

де u , v , w – проекції вектора швидкості довільної точки середовища.

Маса в паралелепіпеді за одиницю часу складе

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} dx dy dz. \quad (18)$$

Виходячи з того, що загальна кількість маси не змінюється, сума значень (17) і (18) повинна дорівнювати нулю

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0. \quad (19)$$

Оскільки розглядається не стисливе середовище, тобто $\rho = \text{const}$; $\partial \rho / \partial t = 0$ (20), то рівняння (19) набуває вигляду

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial x}; \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial y}; \quad \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (21)$$

Випадок нестислого середовища є важливим тому, що за цієї умови всі рівняння спрощуються і їх вирішення може бути доведено до кінця. Необхідно також відзначити, що далі рівняння (23) пов'язує величину і напрям вектора швидкості в будь-якому місці поля швидкостей з відповідною зміною щільності середовища і є основним у всіх розрахунках руху суцільного середовища.

При розгляді рівнодіючих сил, які діють на протилежні грані елементарного паралелепіпеда, що розглядається, були отримані три рівняння, які разом з рівнянням (26) утворюють систему чотирьох дифференціальних рівнянь у часткових похідних першого порядку, що визначають чотири невідомі функції ρ , u , v , w .

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{1}{\rho} \times \frac{\partial P}{\partial x}; \quad \frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial P}{\partial y}; \quad \frac{\partial w}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \times \frac{\partial P}{\partial z}. \quad (22)$$

де p – тиск, що діє на довільну точку середовища при вибуховому впливі.

При введенні функції φ , що є потенціалом швидкості, визначаємо її як

$$\varphi = S / \rho, \quad (23)$$

де S – значення питомого імпульсу, та при інтегруванні по часу t рівняння (21) отримано рівняння

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0 \quad (24)$$

Для з'ясування фізичної сторони процесу вибухового навантаження твердого середовища завдання, що розглядається, зводиться до вирішення одного дифференціального рівняння (24).

Знаючи потенціал швидкості, можна обчислити кінетичну енергію, яку надає тверде середовище вибухом заряду. Якщо позначити елемент поверхні заряду dF , а через v – значення нормальної складової швидкості, то емпірична робота dQ дорівнюватиме

$$dQ = \frac{s v}{z} dF. \quad (25)$$

Знаходячи швидкість v , як похідну від φ по нормалі n до поверхні F , і враховуючи, що $s = \rho \varphi$, остаточно маємо

$$dQ = \frac{\rho \varphi}{2} \times \frac{\partial u}{\partial n} dF \quad (26)$$

Виконавши інтегрування по всій поверхні заряду F , отримаємо повну енергію, акумульовану середовищем

$$Q = \frac{\rho}{2} \int_F \varphi \frac{\partial u}{\partial n} dF \quad (27)$$

З огляду на те, що в нестисливому середовищі втрат енергії немає, остання формула дає точне значення кінетичної енергії вибуху, отриманої середовищем при ініціюванні свердловинного заряду. Повна енергія вибуху, що акумулюється середовищем під час вибуху серії зарядів ВР ($S=1, \dots, k$) (27) визначається як

$$Q_\Sigma = \frac{\rho}{2} \left(\sum_{s=1}^k \int_F \varphi_i u'_{ns} dF \right). \quad (28)$$

А через величину питомого імпульсу –

$$Q_\Sigma = \frac{1}{2} \left(\sum_{s=1}^k \int_F S_i u'_{ns} dF \right). \quad (29)$$

Висновки та напрямки подальших досліджень. Якість дроблення підірваної гірничої маси є одним з основних показників ефективної роботи буро-підривного комплексу. Останнє багато в чому залежить від ефективної технології ведення вибухових робіт, що включає способи розміщення, формування та ініціювання свердловинних зарядів ВР. Ці складові технології ведення вибухових робіт значною мірою визначають характер розподілу енергії вибуху в масиві гірських порід, що руйнуються. Визначення залежності між цими процесами – одне з головних завдань теорії руйнування твердих тіл під час вибуху в аплікації до реалізації конкретного технологічного масового вибуху. В ході даного дослідження було визначено кінетичну енергію, яка передається середовищу, що руйнується вибухом серії свердловинних зарядів з лінійно диференційованою ВР.

Використовуючи при розрахунках свердловинних зарядів коефіцієнт лінійної диференціації m , можна формувати заряди так, щоб знизити одночасно негативний вибуховий вплив на суміжний масив. Це досягається за рахунок перерозподілення ВР у руйнованому уступі гірських порід, і тим самим зменшуються зони хаотичної штучної системи структурних порушень і заколів від дії масового технологічного вибуху.

Список літератури

1. Физика взрыва / Баум Ф.А., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др./ Под. ред. К.П.Станюковича. - М.: Наука, 1975. - 407 с.
2. Кузнецов В.М. Математические модели взрывного дела. – Новосибирск: Наука, 1977. - 259 с.
3. Баренблатт Г.И. Математическая теория равновесных трещин, образующихся при хрупком разрушении. – ПМТФ, 1969. - № 4. - С. 3-56.
4. Persson P.A., Holmberg R. and Jailing, L. – Rock Blasting and Explosives Engineering, CRC Press, London, 1994. PP 540.
5. Перегудов В.В., Жуков С.А. Пути повышения качества взрывных работ при разрушении горных пород сложной структуры. Монография. - Кривой Рог: Издательский дом, ISBN 966-7388-47-6. 2002. - 305 с.
6. Антонов А.Ю., Кириченко И.А. Разработка технологии отбойки на нижних горизонтах железорудных карьеров // Вісник КТУ. Кривий Ріг: КТУ, 2004 - № 5. – С.16-20.
7. Кутузов Б.Н. Методы ведения взрывных работ. Часть 1. - М.: Горная книга, 2009. - 471 с.
8. Фролов О.О. Використання ефекту зустрічі детонаційних хвиль для підсилення дії вибуху на рівні підшви уступу // Вісник НДУУ «КП» / Гірництво. – Київ: НГУУ «КП»: ЗАТ «Технових», 2002. – С.63-65.
9. Бетин В.Д. Развитие детонации в скважинных зарядах с полыми цилиндрами // Разработка рудных месторождений. Научно-техн. сб. – Кривой Рог: изд-во КТУ, 2003. – Вып. 83. – С.68-74.
10. Бичук В.Е. Результаты исследования характера распределения напряжений вокруг зарядов сложной конструкции // Совершенствование буровзрывных работ. М.: Недра, 1977. – С.89-92.
11. Партон В.З., Черепанов Г.П. Механика разрушения // Механика в СССР за 50 лет. – М.: Наука, 1972. – Т.3.
12. Griffith A.A. The phenomenon of rupture and flow in solids. Phil. Trans. Roy. Soc. A 221, 1920, p.1201-1206.
13. Рижов П.А. Математическая статистика в горном деле. М.: Высшая школа, 1973. – 286 с.
14. Кашель Н.Я. Результаты промышленной проверки скважинных зарядов с воздушными промежутками / Н.Я. Кашель, П.И. Федоренко, С.Н. Кузьмич // Взрывное дело. – 1964. – № 54/11.
15. Изыскание эффективной конструкции заряда ВВ / Е.Г. Баранов, В.П. Фролов // Цветная металлургия. – 1965. – № 22. – С. 23–26.
16. Друкованый М.Ф. Об оценке использования энергии взрыва при различных параметрах буровзрывных работ / М.Ф. Друкованый, В.М. Комир // Взрывное дело. – 1966. – С. 45–49.

17. **Moth N.F.** Fracture of metals. Theor. Conq. Enqng. 1948. V.1657 № 16.p.321-348.
18. **Григорян С.С.** Некоторые вопросы математической теории деформирования и разрушения твердых горных пород // ПИММ, 1967. – Т.31. – С.157-245.
19. Комплексное исследование действия взрыва в горных породах / **Э.О. Миндели, Н.Ф. Кусов, А.А. Корнеев, Г.И. Марцинкевич**, – М. : Недра, 1978. – 253 с.

Рукопис подано до редакції 26.04.2023

УДК 622.646:621.86.067.2

Ю.Г. ГОРБАЧОВ, канд. техн. наук, проф., **А.О. ХРУЦЬКИЙ**, канд. техн. наук, доц.,
Вік.А. ГРОМАДСЬКИЙ, канд. техн. наук, ст. викл., доц., **О.С. МАРЮСИК**, магістр
Криворізький національний університет

УДОСКОНАЛЕННЯ ВАЖКОГО ВІБРОЖИВИЛЬНИКА З МЕТОЮ ЗНИЖЕННЯ ЧИСЛА ЗАВИСАНЬ РУДИ У ВИПУСКНІЙ ВИРОБЦІ

Мета. Метою роботи є підвищення експлуатаційної продуктивності віброживильників важкого типу, зайнятих на випуску гірничої маси з очисних блоків залізрудних шахт. Внаслідок нерівномірності гранулометричного складу відбитої руди у блоці та наявності певного відсотку шматків негабаритних розмірів випуск гірничої маси, незважаючи на інтенсифікацію процесу за допомогою вібрації, все ж таки супроводжується зависаннями та утворенням склепін у випускних виробках. Ліквідація зависань як механічним, так і підливним способами пов'язана зі значними витратами робочого часу та вибухівки, а також високою небезпечністю для обслуговуючого персоналу. Зниження числа зависань руди сприятиме суттєвому підвищенню ефективності використання віброживильників та зростанню експлуатаційної продуктивності очисного блоку. Таким чином, тема дослідження важлива та актуальна.

Методи дослідження. Аналіз процесу випуску гірничої маси з очисних блоків підземних рудників показує, що заміна некерованого гравітаційного випуску руди вібраційним забезпечує можливість значного його прискорення. Але повністю позбавитися зависань та склепувань матеріалу у випускних виробках при цьому не вдається. На підставі вивчення закономірностей вібраційного витікання сипких вантажів з ємностей зроблено висновок про необхідність підвищення інтенсивності впливу робочого органу вібромашини на матеріал.

Наукова новизна. Запропоновано підвищення ступеня заглиблення робочого органу віброживильника під навал стовпа гірничої маси у випускній виробці шляхом змінення його конфігурації та використання принципу секційності.

Практична значимість. Удосконалення конструкції віброживильника дасть можливість підвищити інтенсивність динамічного впливу робочого органу машини на гірничу масу у випускній виробці, забезпечити безупинний процес її витікання та сприятиме руйнуванню утворених зависань.

Результати. Запропоновано технічні рішення для зменшення числа зависань під час вібраційного випуску руди віброживильниками важкого типу за рахунок удосконалення конструкції робочого органу.

Ключові слова: випуск руди з очисних блоків, зависання руди, експлуатаційна продуктивність, віброживильник важкого типу, вібропривод, робочий орган віброживильника у «два кута».

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Одним з основних і найбільш трудомістких технологічних процесів підземної розробки міцних руд є очисне виймання гірничої маси, яке представляє собою завершальну стадію видобутку корисної копалини, під час якої попередньо подрібнена масовим вибухом в обсязі очисного блоку руда випускається на горизонт доставки, через рудозвальні виробки скидається на нижче лежачий транспортний горизонт, по якому відвозиться до шахтного стовбура і піднімається на поверхню скіповою підйомною установкою [1,2].

Довгий час єдиним способом випуску відбитої руди з блоку залишався гравітаційний, який характеризується витіканням гірничої маси з очисного простору через випускні отвори під дією її власної ваги. Такий процес супроводжується частими зависаннями руди у стиснених умовах випускних отворів через зустрічі та взаємні заклинення декількох крупних шматків матеріалу. Крім того, спостерігається явище утворення стійких зводів гірничої маси внаслідок її злежування, особливо після певного часу перебування у стані спокою [2-4].

Усе сказане стає причинами зупинок процесу випуску і вимагає заходів щодо їх усунення. Розблокування зависань і склепувань можливо ручним способом за допомогою різного ро-

ду жердин, але це украй небезпечно та неефективно. Для використання механічних способів руйнування зависань випускні виробки потрібно обладнувати відповідними пристроями впливу на завислу руду, що здорожчує процес випуску і так само не витримує жодної критики з точки зору безпеки праці. Найбільш ефективним слід визнати вибуховий спосіб ліквідації зависання і зводів, хоча й він не вільний від недоліків – операція установки заряду впритул до зависання, знову ж таки, є небезпечною для підричника, а після підриву вибухівки потрібен певний час для вентиляції випускної та доставкової виробок.

Усі описані способи вимагають значних витрат робочого часу на дії, безпосередньо не пов'язані з видобутком руди. За даними підземних рудників Кривбасу, при використанні гравітаційного випуску з випускного отвору підземного очисного блоку між двома черговими зависаннями вдається безперешкодно випустити від 10 до 80 т руди (в середньому не більше 35 т) [5]. Для подібного очисного забою зі скреперною доставкою руди, продуктивність якого не перевищує 15 тис. т руди на місяць [6], кількість зависань протягом місяця наближається до 430 випадків. Якщо оцінити витрати часу на ліквідацію одного зависання у межах 20-30 хв., що є досить реальною величиною [5], то за місяць це у підсумку вимагатиме 20-30 повних робочих змін, тобто 22-33% усього фонду робочого часу при трьохзмінному безперервному робочому тижні.

Ситуація суттєво покращилася з широким впровадженням вібраційних технологій і техніки у гірничому виробництві. Вібраційний выпуск руди за допомогою спеціальних установок – вібраційних живильників – забезпечив можливість реалізації інтенсивного динамічного впливу на гірничу масу вібраційними коливаннями певної частоти і певної амплітуди. Завдяки цьому дискретне середовище сипкого матеріалу набуває нових властивостей: вібрації знижують коефіцієнти тертя між його частинками та ними і стінками випускної виробки, в результаті чого гірничу масу стає більш плинною (так називане явище «псевдозрідженості») і краще витікає під дією гравітаційних сил. Процес випуску стає безупинним і керованим [1,3-12].

Використання вібраційного способу випуску дає можливість у 4-5 разів знизити кількість зависань гірничої маси у випускних виробках і довести середню дозу випущеної між двома зависаннями руди до 150-200 т. Це суттєво скорочує непродуктивні витрати робочого часу, але повністю позбутися зависань все ж таки не вдається. Наявність у гірничій масі певної кількості негабаритних шматків викликає їх заклинання у випускних отворах. Тому задача подальшого удосконалення конструкцій віброживильників з метою підвищення інтенсивності їх впливу на зависання руди залишається дуже важливою та актуальною.

Аналіз досліджень і публікацій. Сучасні конструкції віброживильників важкого типу відрізняються високим технічним рівнем і забезпечують значні показники призначення та надійності. Розрахункова теоретична продуктивність кращих зразків такої техніки сягає величини майже 500 м³/год (до 1200 т/год для руди густиною 2,5 т/м³) [3,4]. Але в реальних умовах експлуатації, з урахуванням витрат часу на допоміжні операції, ліквідацію відмов та простоїв з різного роду організаційних причин, у тому числі на розблокування зависань руди у випускній виробці, де встановлений живильник, фактична експлуатаційна продуктивність виявляється набагато меншою.

Зв'язок цих двох величин може бути виражений за допомогою наступної формули [13]

$$Q_{\phi} = \frac{(T_{\text{зм}} - T_{\text{п.з}} - T_{\text{р.п}}) Q_{\text{т}}}{1 + \frac{Q_{\text{т}} t_{\text{п.з}} n_{\text{зав}} \gamma}{1000}}$$

де Q_{ϕ} і $Q_{\text{т}}$ – відповідно фактична і теоретична змінні продуктивності віброживильника для випуску руди з блоку, м³/зміну; $T_{\text{зм}}$, $T_{\text{п.з}}$ і $T_{\text{р.п}}$ – тривалість відповідно робочої зміни, підготовчо-заклучних операцій та регламентованих перерв протягом зміни, хв.; $t_{\text{п.з}}$ – час, що витрачається на ліквідацію одного зависання (разом із провітрюванням виробки), хв.; $n_{\text{зав}}$ – число зависань, що припадає на 1000 т випущеної руди; γ – насипна густина руди, т/м³.

З приведеної формули добре видно, що одним з можливих резервів підвищення експлуатаційної продуктивності вібраційних живильників є зменшення числа зависань $n_{\text{зав}}$ гірничої маси і витрат часу $t_{\text{п.з}}$ на їх ліквідацію. В роботі [13] також відзначається, що формування зависань відбувається в результаті зустрічі та взаємного заклинання 1-5 шматків руди, причому майже половина з них утворюється 3-5 шматками.

Зменшити число зависань можна шляхом удосконалення робочого органу вібраційного живильника та раціонального розташування його у випускній виробці. Що стосується останнього,

то усі без винятку дослідження провідних спеціалістів у галузі гірничої вібротехніки свідчать: вібраційний випуск забезпечує збільшення активного перетину випускного отвору (перетину, за яким відбувається реальне витікання гірничої маси) за рахунок реалізації заглиблення віброживильника під навал гірничої маси у випускній виробці, а продуктивність віброживильника прямо пропорційна величині цього заглиблення [5,6,8-10]. Наприклад, у роботі [6] стверджується: для вільного та безупинного витікання руди потрібно, щоби глибина забору механізму (тобто, заглиблення у навал матеріалу) була більше критичної. Під останньою розуміється та мінімальна величина забору, при якій відбувається вільне і безперешкодне витікання руди з випускного отвору.

З іншого боку, підвищення величини заглиблення робочого органу віброживильника сприяє зниженню числа зависань гірничої маси у випускному отворі. Справедливість цієї залежності підтверджується графіками, приведеними на рис.1 [13]. Вони побудовані з урахуванням середнього розміру шматка руди $d_{ш}$, а також відстані h_d від площини робочого органу віброживильника до лобовини (місця сполучення випускного отвору зі стелиною випускної виробки). З графіків видно, що збільшення глибини заглиблення з 0,4 до 1,6 м призводить до зменшення числа зависань в середньому удвічі.

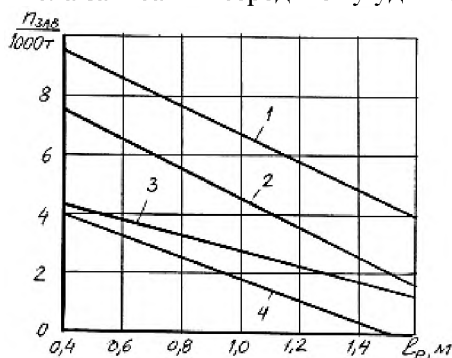


Рис. 1. Залежність числа зависань $n_{зав}$ (на 1000 т видобутку) від величини реального заглиблення l_p віброживильника: 1 – $d_{ш} = 0,64$ м, $h_d = 1,2$ м; 2 – $d_{ш} = 0,64$ м, $h_d = 1,6$ м; 3 – $d_{ш} = 0,52$ м, $h_d = 1,2$ м; 4 – $d_{ш} = 0,52$ м, $h_d = 1,6$ м

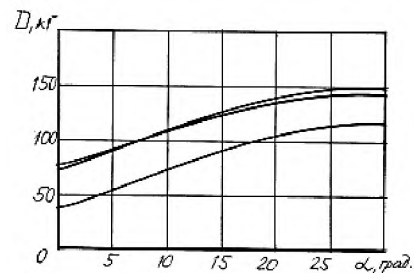
Звісно, кількість зависань залежить також й від інших чинників: гранулометричного складу матеріалу (на рис. 1 видно її суттєве зменшення при зменшенні розміру шматків з 0,64 до 0,52 м), конструкції випускної виробки, інтенсивності випуску. Але у даному випадку нас більше цікавить вплив на процес випуску геометричних параметрів та розташування робочого органу віброживильника.

З огляду на це, для підвищення продуктивності процесу вібраційного випуску гірничої маси представляється доцільним розглянути можливі шляхи збільшення величини заглиблення віброживильника.

Лабораторні та промислові дослідження, проведені свого часу в умовах Криворізького факультету Дніпропетровського металургійного інституту, дали можливість визначити основні закономірності формування потоку руди під час його вібраційного випуску та вплив на нього конфігурації робочого органу віброживильника [5]. Зокрема, у рамках досліджень перевірявся варіант виконання робочого органу «у два кута» (ламаного типу), у якого задня частина (та, що знаходилася під навалом стовпа гірничої маси) мала більший кут нахилу до горизонту, ніж передня.

Дослідження показали, що при невеликій різниці кутів нахилу цих двох частин ($0-5^\circ$) процес випуску руди відбувається у вигляді руху окремих вертикальних шарів гірничої маси, причому швидкості їх руху сильно відрізняються: від максимальної швидкості шару, найближчого до передньої стінки випускної виробки (тобто, найближчого до розвантажувального кінця робочого органу) до мінімальної швидкості протилежного шару, контактного із задньою стінкою випускної виробки. У міру зростання різниці кутів швидкості вертикальних шарів поступово вирівнюються і стають практично однаковими при різниці приблизно у $22-30^\circ$. Одночасно підвищується доза випуску матеріалу D між двома зависаннями внаслідок зменшення числа останніх (рис. 2) [5]. Автори пояснюють це явище наступним чином: коли потік руди з випускного отвору неоднорідний, великі шматки гірничої маси внаслідок різних швидкостей руху вертикальних шарів потоку весь час змінюють свої взаємне розташування, що підвищує ймовірність згаданої вище зустрічі декількох шматків та утворення зводу. У разі ж руху матеріалу у випускному отворі єдиним потоком з однаковою швидкістю усіх його компонентів ймовірність такої зустрічі різко падає. Іншими словами, якщо ці шматки не зустрілися і не утворили зводу до моменту входу у випускний отвір, то й під час його проходження не виникне причин для цього.

Рис. 2. Графік залежності дози випуску D між зависаннями від різниці α кутів нахилу задньої (заглибленої) та передньої частин робочого органу віброживильника: 1 – $h_{\text{п}} = 0,75$ м; 2 – $h_{\text{п}} = 1,0$ м; 3 – $h_{\text{п}} = 1,5$ м



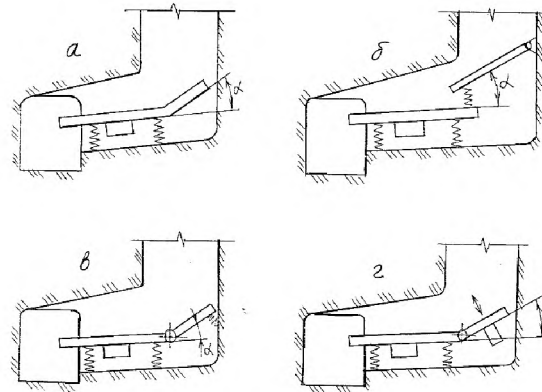
Отже, виконання робочого органу віброживильника «у два кути» забезпечує можливість зменшення числа зависань руди, причому чим більше різниця цих кутів (до певної вказаної межі), тим краще.

Постановка задачі. Метою роботи є зниження непродуктивних витрат часу на ліквідацію зависань гірничої маси під час підземного очисного виймання руди за рахунок різних варіантів змінення конфігурації робочого органу віброживильника і забезпечення таким чином більшого ступеня його заглиблення під навал гірничої маси у випускному отворі очисного блоку.

Викладення матеріалу та результати досліджень. Проведений аналіз науково-технічної інформації переконливо довів необхідність конструктивного удосконалення робочих органів віброживильників важкого типу для зниження числа зависань випущеної руди.

Для реалізації поставленої мети рекомендується використання декількох конструктивних варіантів виконання робочого органу вібраційного живильника у «два кути», які забезпечують скорочення числа зависань руди у випускних виробках очисного блоку шляхом підвищення ефективності динамічного впливу на стовп гірничої маси. Деякі можливі з них показані нижче на рис. 3.

Рис. 3. Схеми можливих варіантів виконання робочого органу віброживильника у «два кути»: а – суцільний робочий орган з піднятим завантажувальним кінцем; б – секційний робочий орган з двома окремими секціями; в – те саме, з шарнірно сполученими секціями; г – те саме, з додатковим вібраційним приводом



На усіх принципових схемах пропонувані варіанти віброживильник зображений під невеликим кутом установки до горизонту (0–10°) як це прийнято робити у більшості випадків. Кутом α позначена різниця у кутах нахилу основної транспортно-розвантажувальної (передньої) та заглибленої завантажувальної (задньої) частин робочого органу.

Робочий орган при цьому може мати як суцільне виконання і ламану конфігурацію з піднятим завантажувальним кінцем (рис. 3а), так і секційну конструкцію. Остання може бути у вигляді двох окремих секцій (рис. 3б) [14] або шарнірно сполучених між собою (рис. 3в). В усіх цих варіантах заглиблена частина робочого органу не має приводу і отримує коливання від вібро-розбудника основної частини. Утім, на задню секцію можна встановити додатковий вібропривод (наприклад, ударного типу з живленням від шахтної пневмомережі) (рис. 3г) [15]. В нормальному режимі роботи віброживильника працюватиме лише його основний вібратор (зазвичай, це конструкція інерційного типу з неурівноваженими масами (дебалансами)). У разі ж, коли вібраційного впливу основного приводу не вистачатиме для розблокування зависання руди у випускній виробці, можна буде тимчасово вмикати додатковий вібратор і потужними ударами задньої секції руйнувати їх.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Практичне застосування пропонуваних технічних рішень виконання робочих органів вібраційних живильників важкого типу повинно забезпечити підвищення ефективності процесу випуску гірничої маси під час підземного очисного виймання руди за рахунок зниження числа зависань у випускних виробках. В результаті можна очікувати скорочення простоїв очисних забоїв та зростання внаслідок цього величин їх експлуатаційної продуктивності. Крім того, має підвищитися рівень безпеки очисних операцій через зменшення обсягів підривних робіт.

Наступним кроком у розвитку цього напрямку досліджень повинно стати обґрунтування раціонального режиму віброударного впливу на завислу гірничу масу додаткового приводу задньої секції робочого органу живильника.

Список літератури

1. 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. Чумаєв, І.А. Шиповський** / Під заг. ред. **А.С. Громадського**. – Кривий Ріг: Видавничий центр КНУ. – 2017. – 410 с.
2. **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.
3. **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.
4. **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.
5. **Учитель А.Д.** Вибрационный выпуск горной массы / **А.Д. Учитель, В.В. Гущин**. – М.: Недра, 1981. – 232 с.
6. **Каварма И.И.** Комплексы поточного транспорта для подземной разработки крепких руд / **И.И. Каварма, А.В. Бровко**. – М.: Недра, 1986. – 86 с.
7. **Іскович-Лотоцький Р.Д.** Процеси та машини вібраційних і віброударних технологій / **Р.Д. Іскович-Лотоцький, Р.Р. Обертюх, І.В. Севостьянов** // – Вінниця: Універсум, 2006, - 291 с.
8. **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.
9. **Гончаревич И.Ф.** Вибротехника в горном производстве / **И.Ф. Гончаревич**. – М.: Недра, 1992. – 319 с.
10. Вибрационные машины для выпуска и доставки руды / **В.Н. Потураев, В.И. Дырда, О.К. Авдеев, И.К. Поддубный, В.П. Нагутый, Н.Г. Кравченко, В.Н. Платонов, В.И. Финогеев**. – К.: Наукова думка, 1981. – 152 с.
11. Вибрации в технике: Справочник. Вибрационные процессы и машины, т. 4 / Под ред. **Э.Э. Лавендела**. – М.: Машиностроение, 1981. – 509 с.
12. **Франчук В.П.** Инженерные методы расчета и выбора динамических параметров вибрационных грохотов, конвейеров, питателей / **В.П. Франчук** // Збірник «Збагачення корисних копалин». Випуск 12 (53). – Дніпропетровськ: НГУ, 2001. – С. 126-143.
13. **Кальницкий А.М.** Расчет фактической производительности вибропитателя для выпуска и доставки руды / **А.М. Кальницкий** // Шахтный и карьерный транспорт. Вып. 11. – М.: Недра, 1990. – С. 151-154.
14. Вибродоставочные комплексы в технологиях разработки рудных месторождений / **В.Н. Потураев, В.И. Дырда, И.К. Поддубный, О.К. Авдеев, Н.А. Гордиенко, А.В. Коваль, В.И. Финогеев, Н.И. Лисица, А.Х. Дудченко**. АН УССР, Ин-т геотехнической механики – К.: Наукова думка, 1989. – 168 с.
15. **Марюсюк О.С.** Дослідження та удосконалення конструкції віброживильника для випуску руди з блоку: Випускна кваліфікаційна робота магістра. Рукопис / **О.С. Марюсюк**. – Кривий Ріг: КНУ, 2022. – 73 с.

Рукопис подано до редакції 27.04.2023

УДК 692.21:699.844

Р.О. ТИМЧЕНКО, д-р техн. наук., проф., **Д.А. КРІШКО**, канд. техн. наук, ст. викладач,
Д.З. ПАВЛИШАК, магістрант,
Криворізький національний університет

КОНСТРУКТИВНІ РІШЕННЯ БАГАТОШАРОВИХ ЛЕГКИХ ОГОРОДЖЕНЬ ПІДВИЩЕНОЇ ЗВУКОІЗОЛЯЦІЇ

Мета. Розробка ефективних конструктивних рішень багатошарових легких огорожень підвищеної звукоізоляції.

Методи дослідження. Використовувався теоретичний метод дослідження. Інженерний розрахунок виконували графоаналітичним методом, у якому використовують безпосередні залежності характеристик звукоізоляції від параметрів конструкцій, що змінюються під час проектування.

Наукова новизна. Отримано показники частотних характеристик ізоляції повітряного шуму звукоізольовальних асиметричних каркасних перегородок з обшивками з гіпсокартонних листів, що забезпечують порівняно з базовими більш високу акустичну та економічну ефективність. Запропоновано рекомендації з проектування типових технічних рішень асиметричних каркасних перегородок, що забезпечують нормативний шумовий режим у приміщеннях житлових і громадських будівель, а також допоміжних будівель виробничих підприємств.

Практична значимість. Доведено можливість підвищення звукоізоляції асиметричними каркасними перегородками порівняно зі звукоізоляцією симетричними (базовими) каркасно-обшивними перегородками. Розглянуто конструктивні рішення звукоізольовуючих асиметричних каркасних перегородок з обшивками з гіпсокартонних листів, що дають змогу розширити можливість застосування цих конструкцій у будівлях різного типу за рахунок підвищення їхньої звукоізоляції в нормованому діапазоні частот, при цьому зменшуючи матеріальні витрати на їхнє зведення. Запропоновано рекомендації з проектування конструкцій звукоізольовуючих асиметричних каркасних перегородок з обшивками з гіпсокартонних листів.

Результати. Знайдено кількісні залежності звукоізоляції асиметричними каркасними перегородками від маси і кількості шарів обшивок у всьому нормованому діапазоні частот від 100 до 3150 Гц. Техніко-економічний аналіз вартості монтажу симетричних (базових) і асиметричних каркасних перегородок доводить ефективність застосуван-

ня асиметричних каркасних перегородок як міжквартирних перегородок, перегородок між приміщеннями офісів, стін і перегородок між робочими приміщеннями допоміжних будівель виробничих підприємств. Застосування цих перегородок дасть змогу знизити витрати на монтаж. Принцип проектування таких конструкцій можна використовувати під час влаштування кабін спостереження на виробництві, шумозахисних екранів систем вентиляції та кондиціонування. На практиці можна домогтися додаткової звукоізоляції близько 3...10 дБ.

Ключові слова: багатошарові легкі огородження, звукоізоляція, каркасні перегородки, гіпсокартонні листи.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Звукоізоляція будівельними конструкціями є галуззю будівельної акустики, в якій досліджуються явища, пов'язані з поширенням через них звукових хвиль. У багатьох випадках звукоізоляція будівельних конструкцій є найраціональнішим способом зниження шуму, що проникає в приміщення із суміжних об'ємів і із зовнішнього середовища. Шум на виробництві, в офісних будівлях і в побуті завдає великої шкоди, шкідливо впливаючи на організм людини, знижуючи продуктивність праці. На виробництві з безперервним збільшенням потужності та продуктивності промислового обладнання частотний спектр шуму зміщується в область високих частот, особливо чутливих для вуха людини. В офісних будівлях і приміщеннях шум від наявності великої кількості офісної оргтехніки, розміщеної в приміщеннях з декількома робочими місцями, з внутрішніми огорожувальними конструкціями, як правило, виконаними з жорстких звуковідбивальних матеріалів (ламіновані ДСП, світлопрозорі панелі) за принципом каркасно-обшивних перегородок, призводить до передчасної втоми і зниження продуктивності праці. Причинами зниження звукоізоляційних характеристик цих конструкцій є невисока власна звукоізоляція, наявність обхідних шляхів поширення звуку (підвісна стеля, стики між конструкціями тощо). Шум впливає на людину не тільки на виробництві, а й на сільбищних територіях і в квартирах, особливо в містах поблизу шумних підприємств, а також на вулицях із великою кількістю транспорту. Таким чином, дослідження, пов'язані з розробленням ефективних конструктивних рішень підвищеної звукоізоляції на основі базових каркасно-обшивних перегородок є актуальним науковим завданням у галузі будівельної акустики, що має важливий практичний інтерес [1-5].

Аналіз досліджень і публікацій. Проблемою підвищення звукоізоляції реальних огорожувальних конструкцій будівель і споруд займалися багато дослідників. У роботах І.І. Боголепова, Е. Wintergerst, В.П. Гусева, В.І. Заборова, М.І. Іванова, О.О. Климухіна, О.О. Кочкіна, В.Г. Крейтана, С.Н. Овсяннікова, Г.Л. Осипова, М.С. Седова, Є.Я. Юдіна, L. Cremer, A. London, A. Schoch, H. Reisner, K. Gosele, L. L. Beranek, M. Heckl та ін. розроблено методи розрахунку й проектування різних типів звукоізолюючих огорожень [6-10].

Однак досі залишається маловивченим питання досягнення максимально можливих значень звукоізоляції реальних огорожувальних конструкцій, зокрема каркасно-обшивних перегородок. До теперішнього часу недостатньо досліджено проблему впливу зміни співвідношення поверхневих густин і товщин обшивок із гіпсокартонних листів каркасних перегородок на їхні звукоізоляційні властивості в нормованому частотному діапазоні від 100 до 3150 Гц і так званих "акустичних містків", що не дає змоги раціонально проектувати огорожувальні конструкції підвищеної звукоізоляції.

Під час проектування абсолютно не враховуються рекомендації щодо забезпечення звукоізоляції каркасними перегородками завдяки влаштуванню обшивок із різної кількості шарів гіпсокартонних листів. У наукових і нормативних джерелах відсутня інформація про якісні характеристики зниження шуму в нормованому діапазоні частот, тобто про частотні характеристики ізоляції повітряного шуму та індекси ізоляції повітряного шуму R_w , дБ, асиметричних конструкцій.

Для ефективного застосування в будівництві каркасних перегородок підвищеної звукоізоляції з обшивками з гіпсокартонних листів необхідно розробити їхні конструктивні рішення. Під час вибору оптимального проектного рішення необхідно мати можливість швидко розраховувати звукоізоляційні характеристики різних варіантів розглянутої конструкції. Наявні характерні частотні залежності звукоізоляції подвійних огорожень покладено в основу графоаналітичного методу розрахунку, що дає змогу вибрати оптимальне поєднання змінних під час проектування характеристик і забезпечити нормативну звукоізоляцію приміщень.

Постановка задачі. Розробка ефективних конструктивних рішень багатошарових легких огорожень підвищеної звукоізоляції.

Викладення матеріалу та результати. Створення сприятливого акустичного режиму в будівлі – одна з найактуальніших проблем сучасного будівництва. Шуми, що проникають у приміщення, поділяють на зовнішні та внутрішні. До зовнішніх джерел шуму належать: транспорт, промислові підприємства, ігрові майданчики тощо. До внутрішніх – інженерне та санітарно-технічне обладнання, побутові джерела шуму тощо. Для зниження шуму нині розроблено ефективні будівельно-акустичні методи, зокрема й метод звукоізоляції.

Останнім часом у містах спостерігається тенденція ущільнення забудови, розміщення великих торговельних, культурно-розважальних і адміністративних комплексів на мінімально допустимих відстанях від житлових будинків. На відміну від традиційних цивільних будівель, у яких були спеціальні капітальні приміщення для розміщення вентиляційних камер, калориферів і кондиціонерів, у сучасних будівлях теплове, холодильне та вентиляційне обладнання часто розміщують на покритті, і воно є одним з основних джерел шуму в міському середовищі. Зниження повітряного шуму досягається завдяки заходам, що ґрунтуються на методах звукоізоляції, звукопоглинання та екранування. Засоби зниження повітряного шуму – це влаштування акустичних екранів, шумозахищених будівель і шумозахисних вікон. Акустичний режим у приміщеннях здебільшого залежить від звукоізолювальних і звукопоглинальних якостей його огорожувальних конструкцій.

У будівельній практиці на зміну громіздким, матеріаломістким і відповідно трудомістким у процесі будівництва внутрішнім огорожувальним конструкціям приходять багат шарові системи легких огорожень підвищеної звукоізоляції, переважно з листових матеріалів. Зокрема набули поширення каркасно-обшивні огорожувальні конструкції. Вони легко монтуються, мають малу вагу і майже порівнянні за мобільністю з трансформованими перегородками, що забезпечує вільне проектування об'ємно-планувальних рішень внутрішнього простору будівель.

Але поряд з великою кількістю позитивних якостей під час застосування таких легких конструкцій утруднене виконання вимог звукоізоляції між приміщеннями, оскільки одним з основних чинників, що визначають звукоізолюючу здатність огорожі, є її маса і поверхнева щільність стінової конструкції. Існуючі наразі конструктивні рішення каркасно-обшивних перегородок являють собою легкі каркасні стінові конструкції, що містять у собі одинарний або подвійний металевий (дерев'яний) каркас, обшитий одинарним, подвійним або потрійним шаром гіпсокартонних (ГКЛ) або гіпсоволокнистих (ГВЛ) листів зі звукопоглинаючим матеріалом у повітряному прошарку. Зовнішні листи обшивок з двох сторін приймаються однакової товщини з жорстким з'єднанням з каркасом.

Сучасний аналіз таких огорожень показує, що вони не мають достатньої звукоізоляції в діапазоні середніх і високих частот (630...1250 Гц), викликаної резонансом системи "маса-пружність-маса". Цей недолік добре відомий фахівцям у галузі будівельної акустики і є одним зі стримувальних чинників широкого впровадження багат шарових легких огорожень у практику будівництва. Найбільш економічно обґрунтованим є спосіб, за якого звукоізоляційні характеристики огорожі поліпшуються без збільшення матеріаломісткості. Подальшим розвитком подвійних огорожень є розробка багат шарових легких конструкцій підвищеної звукоізоляції, що складаються з обшивок різної поверхневої щільності, зокрема асиметричних каркасних перегородок.

Одним із найважливіших завдань під час проектування нових типів огорожувальних конструкцій з урахуванням ресурсозбереження та високої економічної ефективності є зниження їхньої маси та товщини. При цьому огорожувальні конструкції повинні забезпечувати необхідний захист від шуму в приміщеннях житлових і громадських будівель, а також допоміжних будівель виробничих підприємств відповідно до нормативних вимог [11-16].

У будівельній практиці на зміну матеріаломістким внутрішнім огорожувальним конструкціям приходять легкі багат шарові огороження. У практиці проектування і будівництва знайшли застосування такі конструктивні рішення багат шарових систем: роздільні (подвійні) огороження, одношарові огороження з гнучкими плитами на відкосі, сендвіч-панелі, конструкції вікон і конструкції міжповерхових перекриттів. Під роздільними огорожами маються на увазі конструкції, що складаються з двох стінок, розділених повітряним прошарком або звукопоглинальним матеріалом незначної жорсткості. Переважного поширення набули роздільні огороження з листових матеріалів, зокрема каркасно-обшивні перегородки, насамперед конструкції звукоізоляційних перегородок поелементного складання фірми КНАУФ та ін.

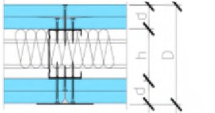
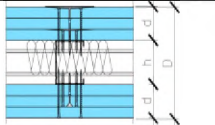
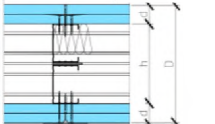
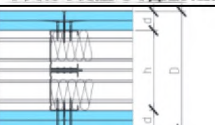
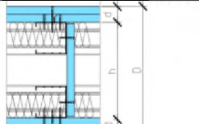
Існуючі наразі конструктивні рішення каркасно-обшивних перегородок являють собою легкі каркасні стінові конструкції, що містять у собі одинарний або подвійний профільний металевий (дерев'яний) каркас, що обшитий одинарним, подвійним або потрійним шаром гіпсокартонних (ГКЛ) або гіпсоволокнистих (ГВЛ) листів зі щільністю до 1100 кг/м^3 , товщиною від

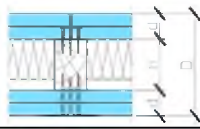
100 мм до 225 мм, поверхневою щільністю від 25 до 90 кг/м² і масою від 28 до 78 кг, у повітряному прошарку яких розташовано звукопоглинальний матеріал. Зовнішні листи обшивок із двох боків прийнято однакової товщини з жорстким з'єднанням із каркасом.

Схеми конструктивних рішень каркасно-обшивних перегородок наведено в табл. 1. Каркасно-обшивні перегородки мають такі переваги перед іншими типами перегородок: значно меншу поверхневу щільність, порівнюючи з цегляними або гіпсобетонними перегородками; високу швидкість зведення; відсутність "мокрих" процесів під час монтажу; легкий доступ до комунікацій; меншу товщину – тонкі стінові конструкції дають змогу збільшити корисну площу.

Таблиця 1

Технічні та акустичні характеристики каркасно-обшивних перегородок

Схеми перегородок / Звукоізоляційні системи «KNAUF»	Технічні та акустичні характеристики каркасно-обшивних перегородок					
	Товщина перегородки D, мм	Ширина профілю, h, мм	Товщина обшивки, d, мм	Поверхнева щільність, кг/м ²	Товщина звукоізоляційного шару, мм	Звукоізоляція, R _w , дБ
C111/W111 – одинарний металевий каркас, обшитий одним шаром гіпсокартонних або гіпсоволокнистих листів з обох боків. Маса 1 м ² перегородки – близько 28 кг. Висота перегородки до 8,0 м						
	100	75	1 x 12,5	25	60	45
C112/W112 – одинарний металевий каркас, обшитий двома шарами гіпсокартонних або гіпсоволокнистих листів з обох боків. Маса 1 м ² перегородки – близько 53 кг. Висота перегородки до 9,0 м						
	100 125 150	50 75 100	2 x 12,5	45	40 60 60/100	50 52 52/54
C113/W113 – одинарний металевий каркас, обшитий трьома шарами гіпсокартонних або гіпсоволокнистих листів з обох боків. Маса 1 м ² перегородки – близько 78 кг. Висота перегородки до 9,5 м						
	125 150 175	50 75 100	3 x 12,5	75	40 60 80	51 53 55
C115.1 – подвійний металевий каркас, обшитий двома шарами гіпсокартонних або гіпсоволокнистих листів з обох сторін. Маса 1 м ² перегородки – близько 57 кг. Висота перегородки до 6,5 м						
	155 205 255	105 155 205	2 x 12,5	50	40 60 80	55 57 57
W115.2 – подвійний металевий каркас, обшитий двома шарами гіпсокартонних або гіпсоволокнистих листів з обох боків і один лист у середині. Маса 1 м ² перегородки – близько 69 кг. Висота перегородки до 6,5 м						
	155 205 255	105 155 205	2 x 12,5	53	2 x 40 2 x 60 80	59 60 60
C116 / W115-1 – два незалежні металеві каркаси з повітряним проміжком 50 мм, обшиті двома шарами гіпсокартонних або гіпсоволокнистих листів з обох боків. Маса 1 м ² перегородки – близько 61 кг. Висота перегородки до 6,5 м						
	200	50 + 50	2 x 12,5	53	50 + 50	65
C121 – одинарний дерев'яний каркас, обшитий одним шаром гіпсокартонних або гіпсоволокнистих листів з обох сторін. Маса 1 м ² перегородки – близько 32 кг. Висота перегородки до 4,1 м						
	85	60	1 x 12,5	30	40	38
C122 – одинарний дерев'яний каркас, обшитий двома шарами гіпсокартонних або гіпсоволокнистих листів з обох сторін. Маса 1 м ² перегородки – близько 57 кг. Висота перегородки до 4,1 м						



100	60	2 x 12,5	50	40	46
-----	----	----------	----	----	----

Для практичних цілей оцінка звукоізоляційних якостей огорожі зводиться до визначення одночислового показника – індексу ізоляції повітряного шуму. Залежність звукоізоляції від частоти дає якісну характеристику роботи огорожі, якою є частотна характеристика ізоляції повітряного шуму в нормованому діапазоні частот від 100 до 3150 Гц. Нормованим параметром ізоляції повітряного шуму внутрішніх огорожувальних конструкцій житлових і громадських будівель, а також допоміжних будівель виробничих підприємств є індекс ізоляції повітряного шуму огорожувальними конструкціями R_w , дБ. Нормативні значення індексів ізоляції повітряного шуму внутрішніми огорожувальними конструкціями R_w , дБ, для житлових, громадських будинків, а також для допоміжних будинків виробничих підприємств наведено в нормативі.

Індекс ізоляції повітряного шуму R_w , дБ огорожувальною конструкцією з відомою (розрахованою або виміряною) частотною характеристикою ізоляції повітряного шуму визначається шляхом зіставлення цієї частотної характеристики з оцінною кривою, наведеною в нормативі. У тих випадках, коли необхідно знати частотну характеристику звукоізоляції, щоб її порівняти з необхідною звукоізоляцією для орієнтовних розрахунків, можна користуватися графоаналітичним методом побудови частотної характеристики. Сучасний аналіз багатошарових огорожень показує, що ці конструкції в низці випадків не мають достатньої звукоізоляції в нормованому діапазоні середніх і високих частот (630...1250 Гц), що викликана резонансом системи "маса-пружність-маса".

Подальшим розвитком таких огорожень є розробка нових ефективних звукоізоляційних багатошарових легких конструкцій з ефективних звукоізоляційних багатошарових легких конструкцій з обшивками різної поверхневої щільності та з різною кількістю шарів обшивок.

У роботі пропонуються асиметричні каркасні перегородки (рис. 1), обшивки яких виконані з гіпсокартонних листів товщиною 12,5 мм по одинарному каркасу з тонкостінного металевого профілю зі звукопоглинальним матеріалом. Товщина обшивки гіпсокартонними листами з кожного боку каркаса прийнята різною, що залежить від кількості листів гіпсокартону: один плюс два листи (1+2) – (12,5+25 мм), один плюс три листи (1+3) – (12,5+37,5 мм) і два плюс три листи (2+3) – (25+37,5 мм).

Ці конструкції порівняно з поширеними каркасно-обшивними перегородками з однаковою товщиною обшивок і однаковою кількістю шарів, рівними за поверхневою щільністю, мають вищу звукоізоляцію завдяки виникненню явища хвильового збігу. звукоізоляцію за рахунок виникнення явища хвильового збігу, що відбувається в різних частотних діапазонах.

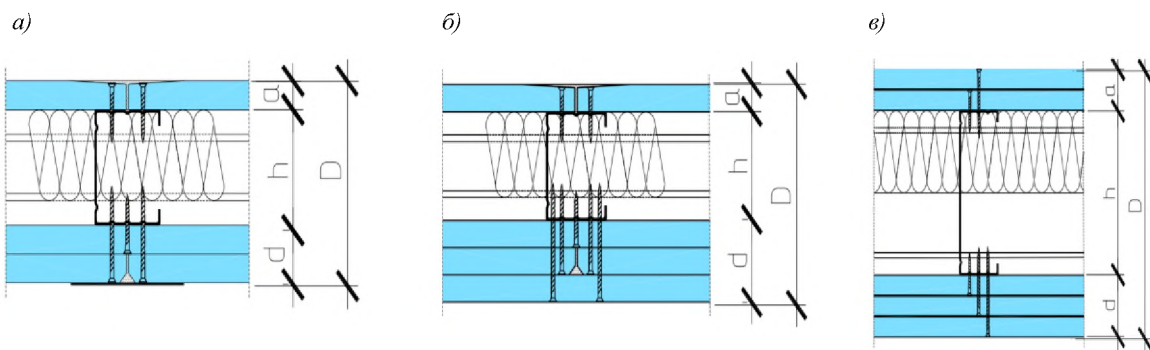


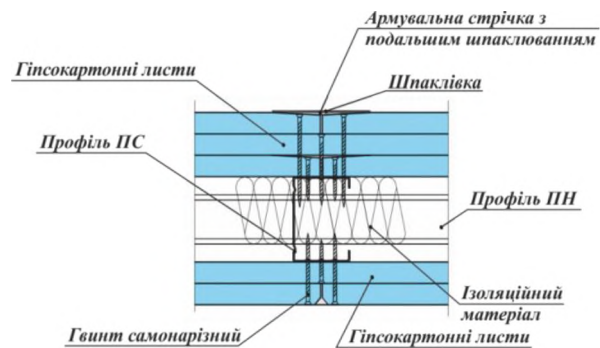
Рис.1. Схеми асиметричних каркасних перегородок із різною товщиною обшивок із гіпсокартонних листів за одинарним каркасом із тонкостінного металевого профілю зі звукопоглинальним шаром: а – $a = 1 \times 12,5$ мм, $d = 2 \times 12,5$ мм; б – $a = 1 \times 12,5$ мм, $d = 3 \times 12,5$ мм; в – $a = 2 \times 12,5$ мм, $d = 3 \times 12,5$ мм

Асиметричні каркасні перегородки мають великий потенціал застосування в якості внутрішніх огорожувальних конструкцій у житлових і громадських будівлях, швидкокомтованих перегородок в офісних і адміністративних приміщеннях із вільним плануванням. Принцип проектування таких конструкцій можна використовувати під час влаштування вигоронок для обладнання, кабін спостереження на виробництві, а також при проектуванні шумозахисних екранів для систем вентиляції та кондиціонування. На практиці можна домогтися додаткової звукоізо-

ляції близько 3...10 дБ.

Каркасно-обшивні перегородки з обшивками з ГКЛ є перспективними конструкціями для застосування в житлових і громадських будівлях, а також допоміжних будівлях промислових підприємств. Даний тип огорожувальних конструкцій легко монтується, має малу вагу і майже можна порівняти за мобільністю з трансформованими перегородками. Каркасно-обшивні перегородки належать до акустично неоднорідних конструкцій. Під час теоретичного розгляду звукоізолювальної здатності акустично неоднорідної конструкції її найчастіше представляють як суму звукоізолювальної здатності акустично однорідного елемента R_0 та її зміни ΔR , спричиненої акустичною неоднорідністю огорожі $R = R_0 + \Delta R$. Водночас величина R_0 може бути звукоізолювальною здатністю одного з елементів конструкції (зазвичай масивнішого) або акустично однорідної огорожі, поверхнева густина якої дорівнює повній поверхневій густині конструкції, яку ми розглядаємо. Досягти ефекту збільшення звукоізоляції подвійної огорожі можна, якщо об'єднати акустично однорідні елементи (одношарові огорожі) з граничними частотами, що відрізняються між собою не менше ніж у 2 рази. Як об'єкт дослідження розглядатимемо асиметричну каркасно-обшивну перегородку з шарнірним спиранням за контуром в отворі акустично жорсткого нескінченного екрана, на яку діє дифузне звукове поле. Схему конструкції наведено на рис. 2.

Рис. 2. Горизонтальний розріз асиметричної каркасно-обшивної перегородки з обшивкою листами з двох сторін різної товщини ($2 \times 12,5$ мм + $3 \times 12,5$ мм) по каркасу зі звукопоглинальним шаром



Розглядаються асиметричні каркасні перегородки, зовнішні листові обшивки яких виконані з ГКЛ щільністю від 850 кг/м^3 до 1100 кг/м^3 товщиною 12,5 мм по каркасу з тонкостінного металевого профілю. Ширина повітряного проміжку прийнята різна: 50, 75 і 100 мм.

Товщину аркушів обшивки з ГКЛ із двох боків прийнято різну: один плюс два (1+2), один плюс три (1+3) і два плюс три (2+3) листи. Звукопоглинальний матеріал – мінераловатні плити "ІЗОВЕР" товщиною 50 мм і щільністю 40 кг/м^3 .

Висновки та напрямок подальших досліджень: Доведено можливість підвищення звукоізоляції асиметричними каркасними перегородками порівняно зі звукоізоляцією симетричними (базовими) каркасно-обшивними перегородками. На основі графоаналітичного методу розрахунку встановлено, що ефект підвищення звукоізоляції каркасно-обшивними перегородками за одночасного зменшення їхньої маси (або витрати матеріалу) можливий у разі поєднання обшивок різної товщини. При цьому, якщо величини поверхневих густин кожної обшивки відрізняються між собою (не менше ніж у 2 рази), відбувається перекриття провалів звукоізоляції в області хвильового збігу в нормованому діапазоні частот від 100 до 3150 Гц. Знайдено кількісні залежності звукоізоляції асиметричними каркасними перегородками від маси і кількості шарів обшивок у всьому нормованому діапазоні частот від 100 до 3150 Гц. Техніко-економічний аналіз вартості монтажу симетричних (базових) і асиметричних каркасних перегородок доводить ефективність застосування асиметричних каркасних перегородок як міжквартирних перегородок, перегородок між приміщеннями офісів, стін і перегородок між робочими приміщеннями допоміжних будівель виробничих підприємств. Застосування цих перегородок дасть змогу знизити витрати на монтаж. Принцип проектування таких конструкцій можна використовувати під час влаштування кабін спостереження на виробництві, шумозахисних екранів систем вентиляції та кондиціонування. На практиці можна домогтися додаткової звукоізоляції близько 3...10 дБ.

Список літератури

1. Тимченко Р.А., Молчанова О.О. Шумозахисні пристрої для мереж підземного транспорту // Матеріали Міжнародної наук.-техн. конф. „Гірничо-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку” (25-28 травня 2010 р.) – Кривий Ріг, 2010. – С. 211-212.
2. Тимченко Р.А., Овсяк В.М. Глушіння шуму в тунелі швидкісного трамвая // Матеріали Міжнародної наук.-техн. конф. „Гірничо-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку” (25-28 травня 2010 р.) – Кривий Ріг, 2010. – С. 212-213.
3. Тимченко Р.А., Терещенко Р.Я. Шумозащитные экраны для линий метрополитена и скоростного трамвая //

Разработка рудных месторождений. – 2005. – № 89. – С. 242-245.

4. Пат. 8666 Україна, МПК 7 G 10K 11/16, B 61D 49/00. Звукопоглинальна конструкція: **Вілкул Ю.Г., Тімченко Р.О., Терешенко Р.Я., Кочергін П.С.** (Україна). – № u 200501018; заявник і власник патенту Криворізький технічний університет; Заявл. 04.02.2005; Опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8. – 4 с.

5. Пат. 8667 Україна, МПК 7 G 10K 11/16, B 61D 49/00. Шумозахисний екран: **8667 Вілкул Ю.Г., Тімченко Р.О., Терешенко Р.Я., Кочергін П.С.** (Україна). – № u 200501019; заявник і власник патенту Криворізький технічний університет; Заявл. 04.02.2005; Опубл. 15.08.2005, Бюл. № 8. – 4 с.

6. **Бобылев В.Н., Тишков В.А., Монич Д.В.** Оптимальное использование резервов звукоизоляции ограждающих конструкций // Вестник РААСН. – 2004. – Вып. 8. – С. 105-111.

7. **Гребнев П.А.** Звукоизоляция ограждающих конструкций зданий из сэндвич-панелей: автореф. дис... канд. тех. наук. – 2016. – 20 с.

8. Повышение звукоизоляции ограждающих конструкций зданий при диффузном и направленном падении звука / **В.Н. Бобылев, В.А. Тишков, Д.В. Монич, Д.Л. Щеголев** // Приволжский научный журнал. – 2007. – № 1. – С. 23-28.

9. Резервы повышения звукоизоляции однослойных ограждающих конструкций // **В.Н. Бобылев, В.А. Тишков, Д.В. Монич, П.А. Гребнев** // Монография: ННГАСУ. – 2014. – 117 с.

10. **Craik, R. J. M.** Non-resonant sound transmission through double walls using statistical energy analysis // Applied Acoustics. – 2003. – Vol. 64. – № 3. – P. 325-341.

11. **ДСТУ-Н Б В.1.1-34:2013.** Настанова з розрахунку та проектування звукоізоляції огорожувальних конструкцій житлових і громадських будинків. – 2013. – 112 с.

12. **ДСТУ Б В.2.6-85:2009.** Конструкції будинків і споруд. Звукоізоляція огорожувальних конструкцій. Методи оцінювання. – 2010. – 29 с.

13. **ДБН В.1.1-31:2013.** Захист територій, будинків і споруд від шуму – 2013. – 98 с.

14. **EN 12354-1:2000.** PDT Building acoustics – Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements - Part 1: Airborne sound insulation between rooms. – 2013. – 81 с.

15. **ISO 717-1** Acoustics – Rating of sound insulation in buildings and of building elements – Part 1: Airborne sound insulation. – 2013. – 11 p.

16. **KNAUF.** Немецкий стандарт. Звукоизоляционные системы KNAUF. – 2010. – 24 с

Рукопис подано до редакції 09.05.2023

УДК 338.3

Г. І. АНДРУЩЕНКО, д-р соц. наук, проф., **Є. В. ЧУПРИНОВ**, канд. техн. наук, доц.,
Д.О. КАССИМ, д-р техн. наук, проф., **В. Г. ГРИГОР'ЄВА**,
І. А. ЛЯХОВА, кандидати техн. наук, доценти
Державний університет економіки і технологій

СИНЕРГІЯ ЕКОНОМІКИ ТА МЕТАЛУРГІЇ ЯК ОСНОВА МЕХАНІЗМУ ЕФЕКТИВНОГО ФУНКЦІОНУВАННЯ СУЧАСНОГО ПІДПРИЄМСТВА ПОВНОГО ЦИКЛУ

Мета. Головною метою даної роботи є вивчення та аналіз сучасних світових тенденцій на ринку чорної металургії, а також розробка нових комплексних методів та економічних заходів для взаємодії різних підрозділів одного металургійного підприємства.

Методи дослідження. У дослідженні використано наступні методи: організаційно-економічні – при управлінні економічною ефективністю процесу виробництва на сучасному металургійному підприємстві; аналітичні – при пошуку та винайденні нових засобів управління технологічним процесом виробництва сталі, нового параметру киснево-конвертерного процесу.

Наукова новизна. Запропоновано інноваційний підхід до організації роботи сучасного металургійного підприємства, оснований на тісній взаємодії важливих процесів, таких як економіка, виробництво та збут готової продукції. Даний науковий підхід базується на винайденні нових шляхів впровадження новітніх металургійних технологій з мінімально можливими виробничими і невиробничими витратами, які дозволять отримати підвищення рівня економічної ефективності процесу виробництва сталі на металургійному підприємстві.

Практична значимість. Авторами розроблений новий виробничо-економічний механізм ефективної роботи металургійного підприємства, який дозволив побудувати логічний зв'язок між усіма визначальними ланками сучасного металургійного комбінату – від початкової стадії налагодження виробництва до економічної ефективності діяльності підприємства в цілому.

Результати. У даній роботі авторами проаналізовано світовий ринок металопрокату і визначено рівень конкурентоспроможності ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в умовах ринкової кон'юнктури; віднайдено нові шляхи впровадження новітніх металургійних технологій з мінімально можливими виробничими і невиробничими витратами; розраховано економічну ефективність процесу виробництва сталі на металургійному підприємстві; розкрито нові механізми функціонування металургійного підприємства у сучасних ринкових умовах, у тому числі за рахунок синергії металургійних технологій та економіки, що в свою чергу, у сучасному висококонкурентному середовищі може

стати важливим елементом ефективної взаємодії виробника та кінцевого споживача.

Ключові слова: металургія, виробництво сталі, металопрокат, технології, конкурентоспроможність, підприємство, повний цикл, економічна ефективність.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. У сучасних ринкових умовах у більшості металургійних підприємств виникли певні труднощі, від повноти подолання яких напряду залежить успішність їх діяльності. Сучасні ринкові реалії свідчать, що дуже важливо не лише розробляти та запроваджувати нові технології виробництва, а й вміти презентувати свої розробки, візуалізуючи їх у соціальних мережах, буклетах та інших медіа-засобах з метою підвищення інтересу потенціального споживача до своєї продукції.

Зараз у світі різко знижується попит на сталь, зокрема у Китаї, як світовому лідері на ринку металургії, а також спостерігається падіння цін на сировину й готову продукцію. В той же час, Китай у 2022 році дещо обмежив виробництво сталі на рівні минулого року. Тож, можна стверджувати, що центр впливу на ринок сталі перемістився з азіатського регіону. Протекціонізм зміцнюється і, з урахуванням угоди ЄС–США, набуває нових форм. Відповідно до цього відбулися очікувані значні обмеження, зокрема ті, що стосуються продукції більш високого рівня переробки.

Прогноз IREPAS щодо ситуації в останньому кварталі 2021 року виявився правдивим щодо стабільності. У листопаді і грудні спостерігалось багато простоїв, пов'язаних з ремонтними роботами. Незважаючи на російсько-українську війну та ускладнення ринкових умов, пов'язаних з цим, у 2022 році на ринку з'явилися нові виробничі потужності, які намагаються знаходити споживачів навіть в умовах посилення торгових обмежень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед сучасних вітчизняних фахівців (зокрема, у Кривому Розі), чия наукова діяльність присвячена процесу виробництва сталі та його удосконаленню, доменному виробництву, прокатним станам, різці металу і т.п. варто виділити викладачів Державного університету економіки та технологій Д.О. Кассім, Є. В. Чупринова, М. Г. Коренко та ін.

На даний момент вище вказаними фахівцями Державного університету економіки та технологій у співпраці з науковцями інших навчальних закладів України ведеться низка робіт з комплексного вдосконалення металургійних процесів, починаючи від технологій підготовки коксу [1] та металургійної сировини [2] до питань екології [3]. Однак особливу роль у вдосконаленні роботи металургійного виробництва мають процеси виплавки сталі.

Що ж до методики визначення економічного ефекту на підприємстві, то це питання широко розкрито у вітчизняній академічній (І.М. Бойчик, І.С. Іванова, О.А. Темченко) та періодичній літературі. Також важливим надбанням у контексті поставленої у статті проблеми є праці А.Г. Темченко, О.А. Темченко, С.В. Максимова [4], присвячені вивченню особливостей економічної діяльності підприємств гірничо-металургійного комплексу. О.О. Адлер [5] акцентувала увагу на ролі інновацій у процесі визначення економічної ефективності підприємств гірничодобової галузі. Оцінку економічної ефективності інвестиційних рішень здійснила Я.О. Лудченко. В роботі [6] В.С. Мартиновський і Ю.О. Сьоміна адаптували визначення економічного ефекту для підприємств харчової промисловості. Проте чітко побудованого алгоритму визначення економічного ефекту, враховуючи як специфіку галузі підприємства, так і специфіку об'єкта капітальних інвестицій (зазвичай, прилада чи устаткування) досі не визначено.

Постановка задачі. З огляду на це, метою даної статті є вивчення та аналіз світових тенденцій на ринку чорної металургії, а також розробка нових комплексних методів та економічних заходів для взаємодії різних підрозділів одного підприємства.

Мета статті розкривається у наступних завданнях:

проаналізувати світовий ринок металопрокату і визначити рівень конкурентоспроможності ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» на ньому;

віднайти нові шляхи впровадження новітніх металургійних технологій з мінімальними виробничими і невиробничими витратами;

розрахувати економічну ефективність процесу виробництва сталі на металургійному підприємстві;

на основі результатів досліджень побудувати логічний зв'язок між визначальними ланками

сучасного металургійного виробництва – від початкової стадії налагодження виробництва до економічної доцільності;

розробити новий механізм ефективної роботи металургійного підприємства, який базується не лише на виробничих елементах, а й на активному залученні маркетингових та економічних рішень.

Вирішення вищеперелічених завдань дасть змогу розробити нові механізми функціонування металургійного підприємства, у тому числі синергії металургії та економіки, що в свою чергу, у сучасному висококонкурентному середовищі може стати важливим елементом ефективної взаємодії виробника та кінцевого споживача.

Викладення матеріалу та результати. Аналізуючи діяльність сучасного світового металургійного ринку слід відмітити наступне. Останні тенденції світових змін (зокрема, події 8-12 листопада 2021 року і як результат - угода між ЄС і США про систему квотування імпорту, про виключення європейської сталевих продукції та алюмінію з-під дії 25 %-го мита відповідно до секції 232 з 1 січня 2022 року) на ринку металів здійснили значний вплив на стан глобального гірничо-металургійного комплексу.

Такі події, у свою чергу, сприяють бажанню підприємств повного циклу вжити відповідних заходів, таких як зниження викидів і розширення виробництва електросталі, що стає можливим завдяки утриманню брукху в межах своєї держави, що, в свою чергу, сприяє створенню та розвитку брукхотозаготівельного бізнесу. Саме збільшення використання брукху і стимулювання такого виробничого шляху є найбільш доступним способом для сталевих компаній, що прагнуть забезпечити вертикальну інтеграцію і зайняти свою нішу на ринку брукху.

Також слід враховувати і такий стримуючий фактор розвитку міжнародної торгівлі, як високі ставки фрахту. Кожен контракт, укладений у другому кварталі, зараз має високі транспортні витрати, які зводять прибуток нанівець. З огляду на цей факт та з урахуванням зростання цін на брукхт можна очікувати, що ціни на довгомірний прокат на ринку США залишатимуться високими й у першому-другому кварталах поточного року.

Активізація процесу впровадження декарбонізації металургійного виробництва свідчить про те, що у світовій металургії назріває «переворот» технологій.

За даними британського центру «Агога», до 2030 року 71 % доменних печей у світі буде виведено з експлуатації або потребуватиме заміни футеровки. Це створює можливості для широкомасштабної трансформації галузі в цей період і заміни доменного виробництва на інші технології, зокрема на виробництво заліза прямого відновлення (DRI). За оцінками «Агога», вже до 2030 року заплановане будівництво 40 млн т потужностей з «зеленого» виробництва DRI (за допомогою водню), тоді як компанії майже не інвестують у технології вловлювання та захоронення CO₂ у промислових масштабах (є лише пілотні установки, наприклад у рамках проєкту «Hisarna на Tata Steel»).

Надання пріоритету водневих технологій зумовлене тим, що вони повністю запобігають викидам CO₂ на етапі виробництва, тоді як проєкти з уловлювання борються вже з наслідками і, крім того, є кілька складних проблем з використанням уловленого CO₂, а саме:

недостатня наявність природних резервуарів, які підходять для зберігання CO₂;

необхідність врахування того, які продукти виробляються з уловленого вуглекислого газу.

Якщо в процесі використання цих продуктів CO₂ знову виділяється в атмосферу, то доцільність такої утилізації вуглекислого газу сумнівна.

Важливим для усвідомлення є той факт, що у майбутньому буде спостерігатись розрив у темпах декарбонізації металургії в розвинених державах і державах, що розвиваються. Основна частина проєктів реалізується або буде реалізовуватись саме у перших як таких, що мають у наявності не лише дешеві джерела фінансування та центри розроблення технологій, а й створюють інфраструктуру та запроваджують відповідну державну політику щодо стимулювання декарбонізації.

Корпорація «ArcelorMittal», найбільший виробник сталі у світі, у своєму фінансовому звіті, опублікованому на сайті підприємства в третьому кварталі 2021 року зафіксувала чистий прибуток у розмірі 4,6 млрд дол. – це рекордний показник з 2008 року. У третьому кварталі 2020 року компанія отримала чистий збиток у розмірі 261 млн грн. У порівнянні з другим кварталом 2021 року ArcelorMittal у третьому кварталі 2021 року збільшив чистий прибуток на 15 %. Такі результати за третій квартал керівництво пояснює вдалим збереженням сильної ці-

нової кон'юнктури, що привело до найвищого чистого прибутку та найнижчого чистого боргу з 2008 року.

За даними компанії «GMK.Center» виручка ArcelorMittal у липні-вересні 2021 року зросла майже наполовину у порівнянні з третім кварталом 2020 року – до 20,2 млрд дол.

EBITDA компанії (чистий прибуток до сплати податків і амортизації) в третьому кварталі 2021 року становила 6,058 млрд дол. У липні-вересні 2020 року показник становив 901 млн грн.

Операційний прибуток у третьому кварталі 2021 року становив 5,3 млрд дол., у третьому кварталі 2020 року – 718 млн.

Чистий борг ArcelorMittal станом на кінець вересня 2021 року скоротився до 3,9 млрд дол. з 5 млрд дол. станом на кінець другого кварталу 2021 року.

Незважаючи на фінансові успіхи корпорації, тут також спостерігаємо скорочення обсягів виробництва сталі. Так, «ArcelorMittal» у третьому кварталі 2021 року скоротив відвантаження сталі на 19,8 % в порівнянні з третім кварталом 2020 року – до 14,6 млн т. Корпорація зберегла виробництво сталі на рівні минулого року – 17,2 млн т. Видобуток залізної руди за три місяці скоротився на 13,8 % – до 13 млн т.

Як відомо, «ArcelorMittal» – провідна світова сталеливарна й гірничодобувна компанія з присутністю в 60 державах і виробничими активами у 18 державах. За підсумками 2020 року сталеливарний гігант скоротив виробництво сталі на 20,3 % в порівнянні з 2019 роком – до 71,5 млн т.

Через військове вторгнення, 2022 рік вийшов надзвичайно складним для українських металургів. Так, за даними gmk.center за 11 місяців 2022 року скоротилось виробництво металургійної продукції: чавуну – на 68,4 %, сталі – на 68,6 %, прокату – на 70,1 %.

ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» є металургійним підприємством повного циклу, входить до групи ArcelorMittal. Комбінат охоплює весь виробничий цикл – від видобутку залізної руди й виробництва коксу до виготовлення готової металопродукції. Підприємство виробляє напівфабрикати, а також сортовий і фасонний прокат.

З 2014 року на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» почалась підготовка, а з 2017 року технічним департаментом почалося масштабне впровадження програмного середовища «Сталеплавильний процес в режимі «смарт-онлайн».

Мета даного проекту – забезпечення циклічної роботи сталеплавильного переділу і постійне коректне інформування керуючого та іншого персоналу про стан виробництва в режимі онлайн. Система охоплює безліч приладів і датчиків, починаючи від контролю хімічних і фізичних характеристик рідкого чавуну, що прямує з доменних цехів і металобрухту з копрового цеху, закінчуючи контролем над процесами у відділенні безперервної розливки сталі.

На рисунку 1 представлений скриншот системи «Смарт-онлайн» ПАТ «АМКР» [10], на якому візуалізовані ковші з рідким чавуном, кожен з яких був випущений з різних доменних печей (номер 6, 7, 8 і 9), які направляються в міксерне відділення для накопичення оперативного запасу, що забезпечує безперебійні процеси виплавки сталі і усереднення за температурою і хімічним складом.

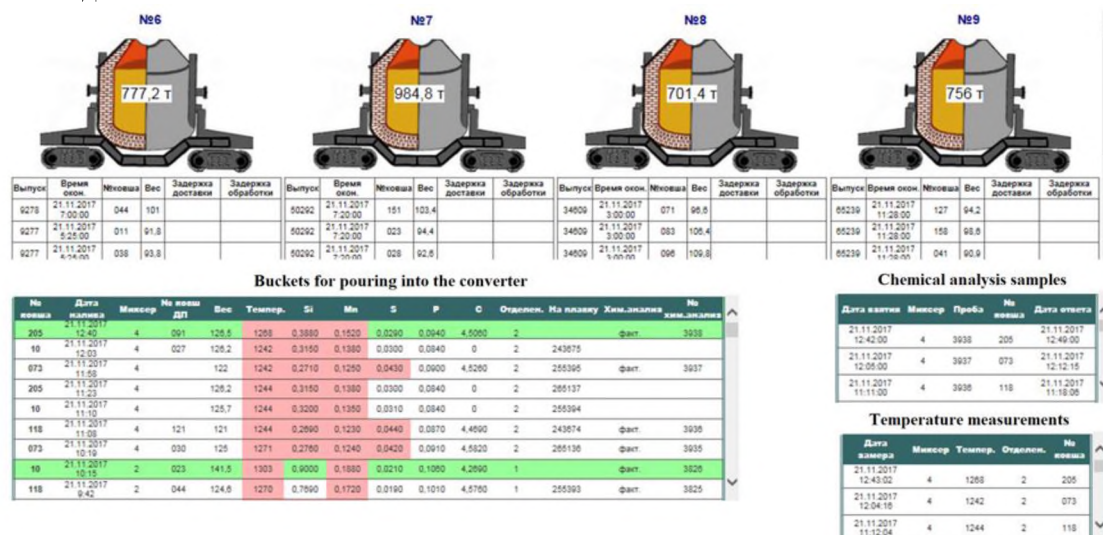


Рис. 1. Система контролю якості рідкого чавуну (скріншот системи «Смарт-онлайн» ПАТ «АМКР» [10])

Досліджуючи особливості та результати діяльності ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» за 2019-2021 роки, слід відмітити, що за даними «Інтерфакс-Україна», ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» у січні-жовтні 2021 року наростило випуск чавуну на 13,9 % у порівнянні з аналогічним періодом минулого року – до 4,57 млн т.

Випуск прокату за цей період зріс на 5,4 % у порівнянні із січнем-жовтнем 2020 року – до 3,9 млн т, виплавка сталі – на 8,9 %, до 4,17 млн т. У жовтні 2021 року комбінат виробив 400 тис. т прокату, 410 тис. т сталі і 405 тис. т чавуну.

Проте за підсумками 2020 року ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» скоротив виробництво прокату на 7,6 % у порівнянні з 2019 роком – до 4,3 млн т. Виробництво сталі за рік впало на 12,1 %, до 4,7 млн т, а чавуну – на 6,9 %, до 4,9 млн т.

Негативна динаміка у сфері виробництва пов'язана також зі зростанням цін на енергоресурси та спробами держави контролювати енергоспоживання (ці фактори впливали як на виробників, так і на споживачів). На падіння експорту вплинуло зниження внутрішнього виробництва сталі, а також відновлення виробництва за кордоном.

У даний час технологічний процес закінчення конвертерної плавки коригується сумарною витратою кисню, а також даними отриманими при «повалці» конвертера з метою взяття проби металу на вміст вуглецю та виміру його температури [7]. Кількість таких «повалок» конвертера може досягти двох, трьох і більше разів, що негативно позначається на продуктивності конвертера, втратах температури металу та шлаку, загущенні шлаку та іншими розладами конвертерної плавки [8, 9]. Досвід промисловорозвинених країн, зокрема Японії, показує, що попадання плавки в необхідний хімічний аналіз і температуру становить 99,8 % без здійснення «повалок» конвертера та коригувальних «додувок» [10].

Прогнозувати настання часу закінчення продування киснем конвертерної плавки і стежити за перебігом протікання її основних процесів можливо на підставі розрахунку в реальному масштабі часу (по ходу плавки) температури розплаву (реакційної зони) [8, 9]. Температуру розплаву (реакційної зони) нескладно оперативно визначати з рівнянь балансу тепла, що випромінюється півсферою реакційної зони на охолоджувану кисневу фурму і тепла, відведеного від кисневої фурми водою.

Важливим етапом будь-якого науково-дослідницького процесу, в тому числі процесу вдосконалення металургійних технологій, є осмислення, формулювання та обґрунтування чинників, що обумовлюють економічну ефективність прийнятих рішень.

Зокрема, одним із визначальних чинників, що зумовив доцільність усунення додувки сталі, є помітна економія витрат часу однієї плавки сталі. Так, якщо загальноприйнятою вважають тривалість однієї плавки 53-54 хв., то завдяки усуненню останньої стадії плавки – додувки, тривалість якої складає 3-4 хв., стає можливим досягнення однієї плавки тривалістю 50 хв.

У металургійній практиці відомо, що в умовах стандартної виплавки сталі (зі стадією додувки) орієнтовною тривалістю 54 хв. за одну плавку один конвертор здатен виплавити 140 т сталі. Відповідно за добу, за такою схемою, відбувається 26,6 плавок і може бути отримано 3724 т сталі.

Якщо ж розглянути варіант плавки без додувки (тривалістю 50 хв.), то за добу можливо здійснити 28,8 плавок сталі за цією схемою, тобто виплавити 4032 т сталі.

Визначення обсягів виплавки сталі з/без урахування процесу додувки дає змогу оцінити зміну добового обсягу виплавки сталі одним конвертором за рахунок зниження витрат часу на додувку. Це можна розрахувати за наступною формулою

$$K_{zp} = V_2/V_1,$$

де K_{zp} – коефіцієнт зростання обсягу виплавки сталі одним конвертором за добу; V_1 – добовий обсяг виплавки сталі одним конвертором (3724 т); V_2 – добовий обсяг виплавки сталі одним конвертором в результаті технологічної зміни, зокрема, уникнення процесу додувки (4032 т).

Тож, коефіцієнт зростання обсягу виплавки сталі одним конвертором за добу становитиме

$$K_{zp} = 4032/3724 = 1,0827.$$

Якщо ж говорити про абсолютні зміни у досягненні економічної ефективності запропонованих нами заходів, доцільно розрахувати значення додаткового обсягу виплавки сталі. Так, за одну добу, за умови уникнення процесу додувки, один конвертор буде давати можливість отримати наступний приріст обсягу сталі

$$\Delta V = V_2 - V_1,$$

де ΔV – добовий приріст обсягу сталі.

Тобто

$$\Delta V = 4032 - 3724 = 308 \text{ т.}$$

Враховуючи, що завдяки застосуванню спеціально адаптованих до описуваного процесу виплавки сталі математичних моделей [10], нам вдалося на стадії хімічного аналізу проби отримати в 50 % випадків заданий результат хімічного складу сталі, то для більшої точності подальшого розрахунку додаткового прибутку справедливим буде враховувати значення добового приросту обсягу виплавки сталі вдвічі менше розрахованого, тобто 154 т.

У конверторному цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» одночасно працює, як правило, 5 конвертерів, тому, завдяки нашим пропозиціям, добовий приріст виплавки сталі в цілому по цеху ($\Delta V_{\text{ц}}$) становитиме, т

$$\Delta V_{\text{ц}} = 154 \cdot 5 = 770.$$

З урахуванням середньоринкової вартості сталі ($B_{\text{с-р}} = 7000$ грн), нескладно визначити розмір додатково отриманого прибутку цеху за добу ($\Delta\P$) у результаті впровадження заходів

$$\Delta\P = B_{\text{с-р}} \cdot \Delta V_{\text{ц}},$$

або

$$\Delta\P = 7000 \text{ грн} \cdot 770 = 5390000 \text{ грн.}$$

Отже, завдяки усуненню стадії додувки із процесу виплавки сталі, що, в свою чергу, сприяє скороченню часу однієї плавки, стає можливим досягнення економічної ефективності запропонованих нами заходів, адже добовий приріст прибутку конвертерного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» становитиме 5,39 млн грн.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Результати наших досліджень показують, що на тлі надзвичайно складної та нестабільної ситуації на світовому металургійному ринку, ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» потребує застосування новітніх підходів для підвищення своєї конкурентоспроможності, одним із яких має бути комплексний підхід – об'єднання зусиль і результатів економічної та виробничої діяльності підприємства.

Коефіцієнтний аналіз та економічна оцінка зміни добового обсягу виплавки сталі одним конвертором показав, що за рахунок зниження витрат часу на додувку, а також застосування спеціально адаптованих до описуваного процесу виплавки сталі математичних моделей можна отримати 154 т сталі в якості добового приросту обсягу виплавки сталі, що на 14 т більше, ніж в умовах стандартної схеми протікання плавки. Це, в свою чергу, в масштабі конвертерного цеху ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» із п'ятьма конвертерами дасть змогу досягти економічної ефективності від запропонованих нам заходів, а саме, отримати 5,39 млн грн додаткового прибутку цеху.

В цілому, у статті авторам вдалося виконати усі поставлені на початку завдання з позиції інновацій. Так, вперше запропоновано інноваційний підхід до організації роботи металургійного підприємства, оснований на тісній взаємодії важливих процесів – економіки, виробництва та збуту. Цей підхід базується на винайденні нових шляхів впровадження новітніх металургійних технологій з мінімальними виробничими і невиробничими витратами, які дозволили отримати підвищення рівня економічної ефективності процесу виробництва сталі на металургійному підприємстві. Також розроблений новий виробничо-економічний механізм ефективної роботи металургійного підприємства, який дозволив побудувати логічний зв'язок між усіма визначальними ланками сучасного металургійного комбінату – від початкової стадії налагодження виробництва до економічної ефективності, що буде використано у подальших дослідженнях.

Список літератури

1. Investigation Methods of Preparation and Aspects of Introduction in Coal Concentrates Chemical Reagents for Addressing the Problem of Coal Raw Materials Freezing Message 2. Prevention of Coal Freezing by Means of Acetates and Silicone Polymer / **Kormer, M.V., Shmeltser, E.O., Lyalyuk, V.P., Lyakhova, I.A., Chuprinov, E.V.** // Petroleum and Coal. – 2021. – Vol. 63. – Issue 2. – Pp. 340-345.
2. Improved iron-ore pellets for blast furnaces / **Zhuravlev, F.M., Lyalyuk, V.P., Stupnik, N.I., Chuprinov, E.V., Lyakhova, I.A.** // Steel in Translation. – 2016. – Vol. 46. – Issue 12. – Pp. 860-867.
3. Evaluation of optimal conditions for the application of capillary materials for the purpose of water deironing / **Radovenchyk I., Trus I., Halysh V., Chuprinov E., Ivanchenko A.** // Ecological Engineering and Environmental Technology. – 2021. – Vol. 22. – Issue 2. – Pp. 1-7.

4. Темченко А.Г., Темченко О.А., Максимов С.В. Економіка підприємств гірничо-металургійного комплексу: Навчальний посібник. У 2-х томах. Кривий Ріг: КТУ, 2008. – 900 с.
5. Адлер О. О. Особливості визначення економічної ефективності впровадження інновацій в гірничодобувній галузі. URL : <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fm/all-fm-2016/paper/viewPDFInterstitial/452/213>
6. Мартиновський В. С., Сьоміна Ю. О. Методика розрахунку економічної ефективності виробництва на підприємствах // Економіка харчової промисловості. – 2014. – № 3. – С. 20-22.
URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/echp_2014_3_6
7. Emi T. Optimizing Steelmaking System for Quality Steel Mass Production for Sustainable Future of Steel Industry // Steel Research International. – 2014. – Vol. 85. – Issue 8. – Pp. 1274-1282.
8. Bock M., Schoop J., Oehler C. The influence of blowing techniques, bottom stirring and lance design in the LD-processes on slag formation, the formation of lance and converter skulls and converter lining life. / 3rd European Oxygen Steelmaking Conference, Birmingham, United Kingdom. – 2000. – Pp. 163-177.
9. Brämning M., Björkman B. and Samuelsson C. BOF Process Control and Slogging Prediction Based on Multivariate Data Analysis // Steel Research International. – 2016. – Vol. 87. – Issue 3. – Pp. 301-310.
10. Chuprinov E.V., Lyalyuk V.P., Andrushchenko H.I., Kassim D.A., Rad'ko N.G. Development of supplements prevention system in oxygen converter process in order to increase the economic efficiency of steel melting. SHS Web of Conferences. – 2021. – Vol. 100. – Pp. 1-9.

Рукопис подано до редакції 12.05.2023

УДК 624.011.1

Р.О. ТИМЧЕНКО, д-р техн. наук., проф., Д.А. КРІШКО, канд. техн. наук, ст. викладач,
О.Ю. ПЕНЗЕВ, магістрант
Криворізький національний університет

КРУЧЕНІ ХРЕСТОПОДІБНІ СТРИЖНІ У З'ЄДНАННЯХ ДЕРЕВ'ЯНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета. Розроблення та дослідження нових вузлових з'єднань дерев'яних елементів на сталевих кручених хрестоподібних стрижнях, що працюють на висмикування.

Методи дослідження. У дослідженнях використано загальні методи будівельної механіки та теорії дерев'яних конструкцій.

Наукова новизна. Розглянуто кручений хрестоподібний стрижень для з'єднань дерев'яних конструкцій. Визначено оптимальні параметри запропонованого типу стрижнів, що забезпечують високу несучу здатність і легкість впровадження в масив деревини. Розроблено модель з'єднань на кручених хрестоподібних стрижнях з підтвердженням її адекватності, що дає змогу оцінювати напружено-деформований стан як запропонованих з'єднань, так і більш складних систем із застосуванням кручених зв'язків. Розглянуто методику розрахунку вузлових з'єднань дерев'яних елементів на кручених хрестоподібних стрижнях, що працюють на висмикування.

Практична значимість. Розглянуто типи з'єднань дерев'яних конструкцій на кручених хрестоподібних стрижнях, що відрізняються ефективністю, як за витратою матеріалів, так і за трудомісткістю виготовлення. Розглянуто методику розрахунку і рекомендацій з конструювання та виготовлення вузлових з'єднань дерев'яних елементів на кручених хрестоподібних стрижнях, що працюють на висмикування. Є можливість поліпшити техніко-економічну оцінку запропонованих з'єднань дерев'яних конструкцій.

Результати. До найбільш важливих результатів належать: виконання розробок з'єднань дерев'яних елементів на кручених хрестоподібних стрижнях, які працюють на висмикування; визначення оптимальної конструктивної форми кручених хрестоподібних стрижнів і правил їхнього розставляння в з'єднаннях; формулювання основних положень методики розрахунку та рекомендацій щодо конструювання та виготовлення запропонованих вузлових з'єднань. Виконаний порівняльний аналіз і результати впровадження розроблених типів стрижнів у практику проектування свідчать про техніко-економічну доцільність їх застосування в дерев'яному будівництві, при цьому запропоновані вузли перевершують за основними техніко-економічними показниками відомі рішення на 12...23% залежно від типу проектуваного з'єднання.

Ключові слова: кручений хрестоподібний стрижень, вузлові з'єднання, дерев'яні елементи, напружено-деформований стан.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Можливість легкого міцнісного впровадження стороннього тіла в деревину (цвяхуватість) є однією з вельми важливих позитивних якостей дерева як будівельного матеріалу, що реалізується завдяки широкому застосуванню різноманітних з'єднувальних елементів на кшталт металевих зубчастих пластин,

нагельних пластин, саморізів, конфірмаців, глухарів, шурупів, гвинтів, цвяхів тощо [1-3]. Досить часто у вузлах дерев'яних конструкцій вищеназвані сполучні елементи працюють на висмикування. Із застосуванням зв'язків, що працюють на висмикування, вирішуються вузли і стики в дерев'яному житловому будівництві, кріплення огорожувальних елементів до несучих конструкцій, гратчастих суцільних дерев'яних і клеєних ферм (зокрема, і великопролітних), рамних і балочних конструкцій, конструкцій просторового типу, баштових і щоглових конструкцій, монтажних з'єднань і т. ін. [4, 5].

Незважаючи на широке коло з'єднань зі зв'язками, що працюють на висмикування, відомі до теперішнього часу типи з'єднувальних елементів мають низку суттєвих недоліків, а саме:

з'єднання на цвяхах, що працюють на висмикування, відповідно до чинних нормативних документів допускається застосовувати тільки в другорядних невідповідальних несучих елементах;

розрахункова несуча здатність цвяхів визначається силами тертя, що виникають по площі поверхні дотику цвяха з деревиною, а шурупів - роботою деревини на зріз між витками нарізної частини, що зумовлює незначну несучу здатність таких з'єднань;

впровадження в масив деревини цвяхів і шурупів діаметром понад 6 мм вимагає попереднього розсвердлювання "пілотних" отворів, що істотно збільшує трудомісткість виконання вузлів;

відомі типи шурупів унеможливають застосування швидкісних способів їхнього впровадження в деревину (ударних, вогнепального тощо);

робота цвяхів і шурупів, забитих або загвинчених у деревину вздовж або під кутом до волокон, згідно з вимогами будівельних норм не враховується, що істотно звужує сферу застосування відомих типів зв'язків у вузлах дерев'яних конструкцій.

Умовами для створення і широкого впровадження в практику сучасного будівництва нових конструктивних рішень вузлів дерев'яних конструкцій, позбавлених перерахованих вище недоліків служать: здатність сприйняття значних розрахункових зусиль, низька трудомісткість виготовлення і вартість, науково обґрунтований інженерний розрахунок, що відображає дійсну роботу з'єднання в натурних умовах.

Безсумнівно, що в таких сполученнях мають бути застосовані нові форми зв'язків, що володіють як підвищеною несучою здатністю, так і легкістю впровадження в масив деревини. Таким чином, проблема вдосконалення з'єднань дерев'яних конструкцій зі зв'язками, що працюють на висмикування, і методики їхнього розрахунку не тільки актуальна, а й визначає новизну і загальну постановку досліджень.

Аналіз досліджень і публікацій. Приклади видатних дерев'яних конструкцій, бездоганних за інженерними рішеннями і дивовижних за простотою форм, переконливо свідчать про широкі можливості деревини як конструктивного матеріалу, що володіє необхідним ступенем експлуатаційної надійності та довговічності. Розроблено цілу низку нових форм дерев'яних конструкцій у царині особливостей роботи сталевих стрижнів суцільного або трубчастого поперечних перерізів у сполученнях дерев'яних елементів. На особливу увагу заслуговують праці В.М. Маслова, В.Ф. Іванова, Г.Г. Карлсена, А.В. Леняшина, Б.О. Ніколаї, М.А. Куришева, В.М. Коченова і пізніше Є.М. Знаменського, В.В. Большакова, М.Є. Кагана, М.Ф. Котова, Г.А. Цвігмана, В.С. Дерев'ягіна, Ю.В. Сличкоухова, П.А. Дмитрієва. Нині теоретичні та експериментальні роботи в галузі з'єднань на механічних зв'язках проводять такі вчені, як С.Б. Турковський, А.А. Погорельцев, В.І. Лінков, Є.М. Серов, П.А. Дмитрієв, С.Б. Серов, А.А. Погорельцев, Р.Б. Орлович, Ю.Д. Стрижаков, В.М. Шапошников, В.А. Цепасєв та інші [6-18].

Постановка задачі. Розроблення та дослідження нових вузлових з'єднань дерев'яних елементів на сталевих кручених хрестоподібних стрижнях, що працюють на висмикування.

Викладення матеріалу та результати. Сталеві стрижні по суті є основним засобом з'єднання елементів дерев'яних конструкцій на механічних зв'язках, які працюють як вигнуті, розтягнуті або розтягнуто-вигнуті елементи. Особливий, досить великий, клас вузлових сполучень дерев'яних конструкцій на сталевих стрижнях представляють з'єднання на зв'язках, які сприймають висмикувальні зусилля.

Виділимо основні якісні характеристики засобів з'єднань, що мають найбільший вплив на ефективність конструктивних рішень:

функціональні – визначають можливості багатоцільового використання засобів з'єднання, а

саме: для згуртовування, зрощування та утворення кутових сполучень. Значимість цих характеристик особливо зростає під час виготовлення конструкцій комплектного постачання, оскільки ними зумовлюється можливість застосування однотипної технології під час виготовлення різних типів конструкцій;

конструктивні – визначають міцність і жорсткість засобів з'єднання, а також ступінь їх впливу на відповідні показники з'єднуваних елементів;

технологічні – визначають трудомісткість і перевагу виготовлення як самих засобів з'єднання, так і повних (заводських і побудовних) конструкцій на їхній основі;

спеціальні – визначають опірність впливам зовнішнього середовища і формують таким чином сферу застосування конструкцій з погляду умов експлуатації.

Залежно від конкретних обставин значимість зазначених показників неоднакова, тому критика переваг і недоліків різних засобів з'єднання за окремими показниками умовна. Вирішальне значення має комплекс властивостей, що визначає в підсумку ефективність кінцевого продукту – вироблених конструкцій. Разом з тим, порівняльний аналіз наявних і перспективних видів з'єднань за конструктивно-технологічними показниками відкриває можливості для виявлення шляхів їхнього вдосконалення.

У будівельній практиці знаходять широке застосування вузли і стики будівельних конструкцій, в яких з'єднувальні елементи працюють на висмикування.

Особливістю дерев'яних конструкцій, порівняно з іншими конструкційними матеріалами, є можливість легкого міцнісного впровадження стороннього тіла в деревину (цвяхуватість). Безперечно, цей факт належить до однієї з вельми важливих позитивних якостей дерева як будівельного матеріалу, що реалізується завдяки широкому застосуванню різноманітних з'єднувальних елементів на кшталт цвяхів, шурупів, металевих зубчастих пластин і т. ін., які досить часто у вузлах і стиках дерев'яних конструкцій працюють на висмикування.

Несуча здатність і жорсткість розроблених типів з'єднань дерев'яних конструкцій із застосуванням сталевих кручених стрижнів хрестоподібного поперечного перерізу, що працюють на висмикування, визначаються щільністю контакту ребер стрижня з масивом деревини в зоні забивання. Цю щільність повинні забезпечувати будь-які значення оптимальних параметрів стрижнів, оскільки при забезпеченні ідеальної щільності контакту з'єднання матиме максимальну міцність і мінімальну податливість за інших однакових параметрів. Аналіз відомих типів зв'язків, що працюють на висмикування, показує, що на розрахункове зусилля висмикування впливають такі чинники, як глибина забивання, діаметр стрижня, крок навивання, товщина ребра стрижня, кут і форма заточення вістря, щільність або порода деревини, шорсткість поверхні, марка сталі, використаної для виготовлення стрижня, і спосіб її обробки, а також спосіб забивання. Видається доцільним досліджувати всі перераховані вище параметри з метою оцінки ступеня їхнього впливу на міцність і жорсткість з'єднань, водночас оптимальними треба вважати параметри, за яких максимальну несучу здатність буде забезпечено за мінімальних значень витрат матеріалів і вартості виготовлення проєктованого вузла. Аналіз результатів досліджень з'єднувальних елементів, що працюють на висмикування, показав, що їхній розрахунок аналітичними методами з урахуванням анізотропії деревини, характеру руйнування та деформацій частини волокон під час забивання, складної форми стрижня з нарізкою пов'язаний із великими труднощами.

Як основний інструмент досліджень прийнято експериментально-теоретичний метод, реалізований у такій послідовності: проведення експериментів для дослідження основних параметрів стрижнів, що забезпечують надійну роботу з'єднань; планування і проведення експериментальних досліджень для вивчення чинників, що впливають на зусилля висмикування; чисельні дослідження з'єднань дерев'яних конструкцій на кручених хрестоподібних стрижнях для якісного аналізу особливостей їхньої роботи; експериментальні дослідження вузлових з'єднань на кручених стрижнях для уточнення кількісних характеристик, що впливають на їх напружено-деформований стан; апроксимація отриманих даних у вигляді формул і коефіцієнтів для формулювання основних положень методики практичного розрахунку даного класу з'єднань дерев'яних конструкцій.

Для визначення оптимальних параметрів сталевих кручених хрестоподібних стрижнів були виготовлені дослідні зразки, в яких варіювалися: марка сталі – С255, 40Х, 40Х з термообробкою; шорсткість поверхні – 10-50 і 0,63-1,25 мкм; довжина стрижня – від 100 до 500 мм або від

10 до 30d; діаметр – від 12 до 22 мм із кроком 2,0 мм; товщина ребра – від 1, до 4,0 мм із кроком 0,5 мм; крок навивки ребер – 15d, 20d, 25d. Під час вибору способу заточування кінця стрижня було враховано такі міркування. Оптимальна форма заточування прямолінійних стрижнів хрестоподібного поперечного перерізу досить добре вивчена в дисертаційній роботі Шведова В. Н.. Ним отримано, що стрижні з "ножовим" конічним заточуванням під кутом $25^\circ \dots 30^\circ$ під час забивання в деревину формують досить щільне гніздо з рівними стінками. Решта поширених видів заточок (ступінчаста, зубчаста, П-подібна) призводили до формування пухкого нагельного гнізда. Проведені нами пробні забивання показали, що ці результати застосовні і для кручених стрижнів, до того ж за кута заточування понад 30° (забивання проведено на стрижнях із кутом заточування 30° , 45° і 60°) щільність гнізда знижується. З іншого боку, довжина заточеного кінця не бере участі в роботі стрижня на висмикування, тобто вона повинна бути мінімальною. У зв'язку з цим усі дослідні стрижні були виготовлені з "ножовим" конічним заточуванням під кутом 30° (рис. 1).

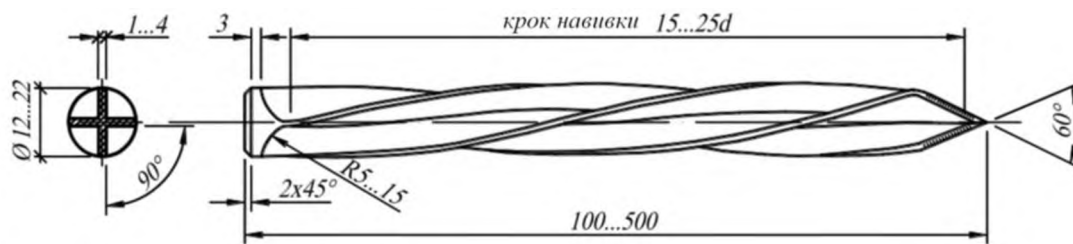


Рис. 1. Сталевий кручений хрестоподібний стрижень

Для визначення впливу способу впровадження стрижня в масив деревини на щільність гнізда застосовували забивання вручну за допомогою важкого молотка, вдавлення за допомогою гідравлічного преса УММ-50, вогнепальний спосіб за допомогою монтажного пістолета ПЦ 84. Під час проведення решти експериментів, для виключення впливу способу забивання на зусилля висмикування, під час упродовження стрижня в брус застосовували спосіб утисування, а під час висмикування з метою фіксування зусилля застосовували універсальну розривну машину IP 5047-50-10 з відповідними модернізованими пристосуваннями. Для забезпечення фіксованої величини глибини забивання кручені стрижні з різними геометричними параметрами задавлювали в деревину з вологістю $(8+2)\%$ з однаковою швидкістю 20 мм/хв, висмикували зі швидкістю 0,4 мм/хв, при цьому фіксували максимальне навантаження висмикування з точністю ± 1 Н.

Під час дослідження основних параметрів стрижнів, що забезпечують надійну роботу з'єднань, найбільший вплив на зусилля висмикування чинять такі чинники, як глибина впровадження стрижня в масив деревини, його діаметр і крок навивки ребер.

Під час розроблення нових конструктивних рішень вузлів з'єднання дерев'яних конструкцій на кручених хрестоподібних стрижнях виходили з таких основних положень, згідно з якими запропоновані рішення мають забезпечувати: максимальну опорну здатність і жорсткість з'єднання; найбільш повне й ефективне використання властивостей застосовуваних матеріалів; мінімальну трудомісткість монтажу з'єднань і виконання вимог сучасної технології виготовлення. На рис. 2 представлено варіанти найпростіших вузлів каркасної дерев'яної будівлі, розроблені на основі досліджуваних стрижнів. У разі обпирання прогону на кроквяну конструкцію (рис. 2а) за рахунок сполучних елементів крученої форми відпадає необхідність застосування додаткових бобишок і накладок для фіксації прогону в проектному положенні. Крім того, тиск вітрового відсмоктування також буде сприйматися стрижнями, що працюють у цьому випадку на висмикування в напрямку поперек волокон деревини. Зазначимо, що для скорочення трудомісткості виконання такого вузла доцільним є застосування вогнепального способу забивання стрижнів, водночас якість з'єднання можна підвищити завдяки використанню спеціальних кондукторів-спрямовувачів для монтажного пістолета, аналогічних за конструкцією пристроям для похилого загвинчування шурупів. Також із погляду фіксації елементів, що з'єднуються, у проектному положенні видається ефективним застосування запропонованого типу стрижнів у вузлах із дерев'яними накладками, наприклад, під час обпирання балок покриття на верхні грані колон (рис. 2б). У відомих рішеннях таких вузлів, як правило, використовують стяжні нагельні

болти, які вимагають попереднього розсвердлювання отворів, постановку шайб і гайок. Важливим є і той факт, що сталеві кручені стрижні повністю знаходяться в масиві деревини, не мають виступаючих деталей, що значно підвищує як вогнестійкість з'єднання, так і його естетичність.

Із застосуванням кручених стрижнів легко вирішуються вузли підвіски технологічного обладнання до дерев'яних конструкцій (рис. 2в). За рахунок підвищеної несучої здатності хресто-подібних стрижнів, як порівняти з відомими типами шурупів і глухарів, відкривається можливість підвішування доволі важких елементів, водночас достатній ступінь несучої здатності забезпечуватиме група стрижнів, спільність роботи яких можна забезпечити об'єднуючою опорною пластиною. Зазначимо, що за наявності в проектуваному вузлі кількох стрижнів необхідно виконати їхнє відповідне розставлення в напрямі як уздовж волокон деревини (S_1), так і впоперек волокон між стрижнями (S_2) і між стрижнем і краєм дерев'яного елемента (S_3) за аналогією з болтовими та нагелевими з'єднаннями.

На рис. 3 показано найхарактерніші вузли дерев'яних конструкцій із застосуванням кручених стрижнів хрестоподібного поперечного перерізу.

Відповідно до конструктивного рішення вузла, наведеного на рис. 3а, б, вертикальне навантаження від балки перекриття передається на колону через сталевий черевик, який, своєю чергою, сполучений з колоною за допомогою похилих кручених стрижнів, причому ці стрижні впроваджені в масив деревини під кутом. Запропонована конструкція вузла працює таким чином. Під час дії вертикального навантаження на балку вона прагне зрушити опорний столик донизу, чому перешкоджають кручені стрижні, затиснуті в колоні та приварені до з'єднувального черевика. Сприймаючи навантаження, верхній стрижень працюватиме на вдавнення, а нижній на висмикування. Зауважимо, що кріплення балки перекриття до сталевго черевика також можна виконати на кручених хрестоподібних стрижнях, водночас стрижень повинен буде пробити сталеву сполучну пластину.

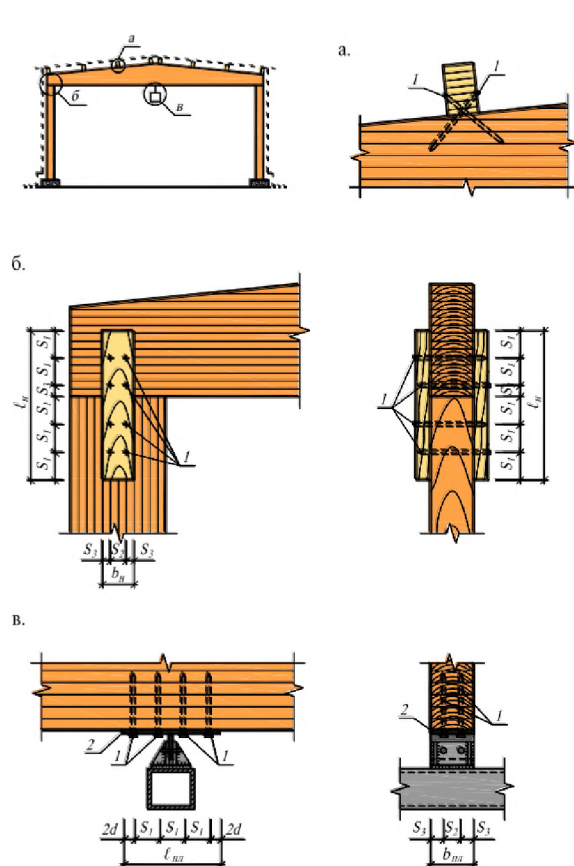


Рис. 2. Найпростіші вузли каркасної дерев'яної будівлі на кручених стрижнях хрестоподібного поперечного перерізу: а – кріплення прогонів покрівлі; б – сполучення колони і кроквяної балки; в – підвіска технологічного обладнання; 1 – кручений стрижень; 2 – опорна пластина

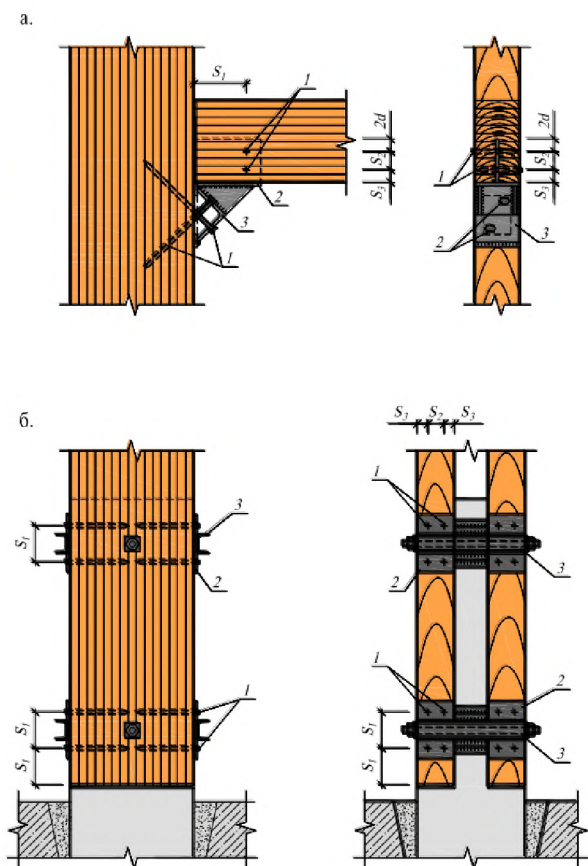


Рис. 3. Варіанти вузлів дерев'яних конструкцій із застосуванням кручених стрижнів, що працюють на висмикування (вдавнення): а – з'єднання балки перекриття з колоною; б – вузол затискання колони у фундаменті; 1 – кручений стрижень; 2 – опорна пластина; 3 – сталевий башмак

Слід зазначити, що в низці випадків, наприклад, за відсутності можливості виготовлення кручених стрижнів, за умови висвердлювання пілотних отворів можливе застосування й інших типів стрижнів, здатних сприймати значні висмикувальні зусилля. Заслугує на увагу конструктивне рішення вузла защемлення двогілкової колони у фундаменті за допомогою залізобетонного пасинка, який розміщений між гілками колони. Гілки через прокладки оперті на виступи пасинка і кріпляться до нього на кручених стрижнях. Конструкція вузла також передбачає постановку стяжних болтів. Слід зазначити, що запропонований варіант вузла забезпечує мінімальний габарит за межами зовнішньої грані колони, що спрощує примикання цокольної панелі. Зазначимо також, що за рахунок застосування у вузлі кручених стрижнів його несуча здатність може бути підвищена в 2-3 рази. Також відмінною особливістю вузла, що розглядається, є робота деревини на зминання впоперек волокон, як під опорними пластинами, так і під ребрами крученого хрестоподібного стрижня, що зумовлює певну податливість такого з'єднання. Саме ця податливість забезпечує крученому стрижню здатність амортизувати сейсмічні впливи, надійно працювати під час землетрусу. Крім цього, у запропонованому варіанті з'єднання колони з фундаментом під опорними пластинами можна передбачити еластичні прокладки, наприклад, із жорсткої гуми, що посилять демпфуючу здатність вузла під час вигину колони в площині рами під дією сейсмічного поштовху впоперек будівлі.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Розглянуто з'єднувальний елемент для дерев'яних конструкцій у вигляді сталевго крученого стрижня хрестоподібного поперечного перерізу, що має підвищену несучу здатність на висмикування, простоту виготовлення, як самого стрижня, так і вузлів на його основі, можливість упровадження в масив деревини без попереднього розсвердлювання отворів. Визначено оптимальні параметри конструктивної форми запропонованого типу стрижнів, які забезпечують надійну роботу з'єднань та їхню високу несучу здатність під час висмикування стрижнів, упроваджених у масив деревини впоперек, уздовж та під кутом до волокон, при цьому виявлено, що: міцнісні та деформаційні властивості з'єднань найсуттєвіше залежать від діаметра стрижня, довжини його закладення та кута впровадження стрижня відносно волокон деревини; фактичні значення густини деревини та способу забивання мають ураховуватись у розрахункових формулах; фактичні значення щільності деревини та способу забивання повинні враховуватись в аналізі напружено-деформованого стану з'єднань під час висмикування стрижня з масиву деревини, який виконаний на базі проведених чисельних досліджень, дає змогу встановити безпечні відстані між осями стрижнів у напрямі уздовж і впоперек волокон, які унеможливають розколювання дерев'яного елемента під час забивання та висмикування крученого стрижня. На основі результатів теоретичних досліджень під час дії короткочасних і тривалих навантажень удосконалено методику розрахунку та розроблено рекомендації з конструювання та виготовлення з'єднань на кручених хрестоподібних стрижнях. Встановлено значення коефіцієнта тривалої міцності для розглянутого типу з'єднань і розрахункового опору деревини зминанню впоперек волокон під ребрами крученого стрижня. Виконаний порівняльний аналіз і результати впровадження розроблених типів стрижнів у практику проектування свідчать про техніко-економічну доцільність їх застосування в дерев'яному будівництві, при цьому запропоновані вузли перевершують за основними техніко-економічними показниками відомі рішення на 12...23% залежно від типу проектуваного з'єднання.

Список літератури

1. Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Матюшевська В.О. Переваги і недоліки дерев'яних конструкцій // Розвиток промисловості та суспільства: Матеріали міжнародної науково-технічної конференції (26-28 травня 2021 р.). – Кривий Ріг, 2021. – С. 69.
2. Тімченко Р.О., Крішко Д.А. Урахування критеріїв надійності будівель та споруд // Строительство. Материаловедение. Машиностроение. – Дніпро, 1999. – Вып. № 9, ч. 1. – С. 310-317.
3. Тімченко Р.А., Крішко Д.А., Горобець Т.Ю. Оценка строительных материалов по критерию качество / цена // Матеріали Міжнародної наук.-техн. конф. „Гірниче-металургійний комплекс: досягнення, проблеми та перспективи розвитку” (25-28 травня 2010 р.) – Кривий Ріг, 2010. – С. 268-269.
4. Сахно С.І., Янова Л.О., Пищикова О.В. Суттєві помилки в ДБН В.2.6-161:2017 «Дерев'яні конструкції основні положення» та їх можливі наслідки // Гірничий вісник. – Кривий Ріг, 2019. – Вип. 105. – С. 127-132.
5. Сахно С.І., Вербицький В.І., Астахов В.І. Розрахунок конструкцій з лісоматеріалів за нормами ДБН В.2.6-161:2017 та EN1995-1-1. Теорія, приклади розрахунків, завдання для самостійного розв'язання. – Кривий Ріг, 2020. – 239 с.

6. **Дмитриев П.А., Шведов В.Н.** Несущая способность и деформативность нагелей крестообразного сечения в соединениях деревянных элементов с металлическими накладками и прокладками, поставленными в пропилы // Архитектура и строительные конструкции: тез. докл. научн.-техн. конф. – Новосибирск, 1992. – 45 с.
7. **Орлович Р.Б.** Тенденции в развитии соединений деревянных конструкций в строительстве за рубежом // Известия ВУЗов: Строительство – 2004. – № 11. – С. 4-9.
8. **Гетц К.Г.** Атлас деревянных конструкций. – 1985. – 272 с.
9. **Eurocode 5.** Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauten Design of timber structures. – 2004. – 89 p.
10. **ДБН В.2.6-161:2017.** Дерев'яні конструкції. Основні положення. – 2017. – 96 с.
11. **Берковская Д.А., Касабян Л.В.** Клееные деревянные конструкции в зарубежном и отечественном строительстве. – 1997. – 108 с.
12. **Найчук А.Я.** Численные исследования прочности деревянных балок со сквозными трещинами усиленных наклонно вклеенными стержнями // Сборник научных трудов: Ресурсосберегающие материалы, конструкции, здания и сооружения. – Ровно, 2008. – Вып. 16. – Ч. 2. – С. 278-281.
13. **Дмитриев П.А., Жаданов В.И., Столповский Г.А.** Соединения элементов деревянных конструкций на стальных винтовых крестообразных стержнях, работающих на выдергивание // Известия ВУЗов: Строительство. – 2010. – № 4. – С. 133-137.
14. **Замрин А.А.** Проектирование и расчет методом конечных элементов в среде APM Structure3D. – 2010. – 376 с.
15. **Жаданов, В.И., Столповский Г.А.** Новый тип узловых соединений деревянных конструкций на стальных винтовых крестообразных стержнях. – Одесса, 2010. – Ч.2. – С. 50-55.
16. **Найчук А.Я., Бабаев М.В.** К вопросу оценки несущей способности стальных винтовых стержней, завинченных под углом к волокнам древесины // Журнал Промышленное и гражданское строительство. – 2010. – № 1. – С. 21-23.
17. **Турковский, С.Б., Погорельцев А.А.** Создание деревянных конструкций системы ЦНИИСК на основе наклонно вклеенных стержней // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – № 3. – С. 6-8.
18. **Пуртов В.В.** Исследование соединений деревянных элементов на металлических пластинах с зубьями-дубелями на действие длительной нагрузки // Известия ВУЗов: Строительство. – 2004. – № 6. – С. 130-134

Рукопис подано до редакції 09.05.2023

УДК 622.788.36

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

ОЦІНКА МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ПРИДАТНОСТІ ТОНКОДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ ДО ОГРУДКУВАННЯ

Відзначено різноманітність методів визначення придатності тонко дисперсних матеріалів до огрудкування, які в переважній більшості базуються на двох напрямках: використанні характеристичних вологемостей або характеристик гранулометричного складу. Для оцінки водно-фізичних властивостей тонко дисперсних матеріалів застосовуються такі вологемості, як максимальна гігроскопічна, максимальна молекулярна, найменша капілярна і максимальна капілярна, які входять у формули для визначення коефіцієнта грудкуємості. Оцінка гранулометричного складу відбувається за допомогою значень вмісту фракцій менше 0,074, 0,050, 0,044 мм або величини питомої поверхні матеріалу. Проаналізовано представницькість найбільш поширених методів, їх відповідність реальним технологічним характеристикам. Зроблено висновок про перевагу методів, підґрунтям яких є водно-фізичні властивості грудкуемого матеріалу. Відзначено необхідність встановлення стандартних методів визначення характеристичних вологемостей матеріалів, які піддаються огрудкуванню

Метою роботи є порівняльна оцінка достовірності результатів визначення за різними методиками придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування.

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

Наукова новизна роботи. На основі проведеного аналізу встановлено, що більш надійними і достовірними методами визначення придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування є такі, що базуються на застосуванні мінерально-гідрологічних констант грудкуемого матеріалу.

Практична значущість роботи полягає у отриманні висновків, які дають інформацію для практичного застосування методів оцінки придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування, що мають високу представницькість результатів і не вимагають багато часу на їх визначення.

Результати роботи свідчать про те, що розробка і застосування методів визначення придатності тонко дисперсних матеріалів до огрудкування є одним з важливих напрямком розвитку теорії і технології виробництва окатишів, подальший розвиток якого пов'язаний з встановленням стандартних методів визначення мінерально-гідрологічних констант пиліт, які піддаються огрудкуванню.

Ключові слова: вологемість, коефіцієнт, матеріал, метод, склад, окатиш, мішність

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. В теперішній час залізорудні окатиші є одним з основних компонентів залізорудної частини доменної плавки, а також найбільш поширеною сировиною для процесів прямого відновлення заліза. Перший етап технології виробництва обпалених окатишів полягає в отриманні сирих окатишів шляхом огрудкування зволоженої тонкодисперсної шихти. Ефективність цього процесу, в першу чергу, визначається здатністю вихідного матеріалу до огрудкування. З цієї причини питання визначення показників придатності до огрудкування тонкодисперсного матеріалу, яким є шихта для отримання сирих окатишів, вже десятки років привертає увагу вчених-дослідників і виробників, які працюють на фабриках огрудкування (див., наприклад, Витюгин В.М., Докучаев П.Н. К вопросу о выборе рациональной технологии окомкования соколовско-сарбайских концентратов. Горнодобывающая промышленность Казахстана. 1961, № 3. – С. 81-83).

Разом із тим, не всі питання, пов'язані з цією проблематикою, залишаються цілком дослідженими. Встановлення надійних показників придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування дозволить підвищити ефективність виробництва окатишів за рахунок оптимізації процесів підготовки компонентів шихти і самого складу шихти до огрудкування, що забезпечить покращення якості сирих і обпалених окатишів, сприятиме підвищенню продуктивності їх виробництва.

Аналіз досліджень і публікацій. Теоретичним підґрунтям для розробки методів визначення придатності тонкодисперсних матеріалів для огрудкування є аналіз фізико-хімічної взаємодії рідкої і твердої фаз в процесі огрудкування. На думку В.І. Коротича [1, с. 55], під «грудкуємiстю» в повному сенсі слід розуміти швидкість утворення і зростання гранул та їх міцність. А, оскільки швидкість виникнення грудочок сама визначається швидкістю зчеплення частинок, то грудкуємiсть матеріалів може характеризуватися одним параметром – взаємною міцністю зчеплення частинок грудкуємого матеріалу. Аналогічного погляду на сенс терміну «грудкуємiсть» дотримуються практично всі дослідники процесу огрудкування.

Подрібнені залізорудні матеріали є гідрофільними дисперсними системами, для яких характерна інтенсивна взаємодія з водою. Система «тонкоподрібнений залізорудний концентрат–вода» намагається знизити свою енергію шляхом зменшення поверхневого натягу на межі розділення фаз, а також зменшення ступеню дисперсності частинок концентрату. Це означає, що дана система має термодинамічне прагнення до огрудкування [2, с. 9].

Поверхня будь-якої рідини і твердого тіла має силове поле, здатне захоплювати і утримувати сторонні атоми і молекули. Аналогічні сили зчеплення з'являються між двома макроскопічними тілами, поверхні яких зближені до дуже малих відстаней. Однак дія цього ефекту не поширюється на частинки крупніше 0,005 мм тому, що мікрорельєф їх поверхні не дозволяє зближення на відстань, де проявляється взаємодія силових полів. На відміну від твердих частинок, рідина здатна змінювати свою поверхню, повторюючи рельєф поверхні твердої частинки. В результаті виникає необхідний контакт – сила зв'язку частинки з рідиною досягає значної величини. Таким чином, шар рідини між двома частинками здатний зв'язувати сусідні частинки. Для цього необхідно, щоб достатня сила зчеплення була не тільки між рідиною і частинкою, але і між молекулами самої рідини. Такі специфічні властивості має вода, яка для частинок залізорудних матеріалів є доволі сильною «клеючою» речовиною [1, с. 55, 56].

В дисперсній вологій системі в залежності від форми частинок можливі чотири типи контактів – дві кулеподібні частинки, куля і площина, дві паралельні площини, площина і конус. При цьому міцність контакту рідини–тверде оцінюється роботою адгезії: $W = \sigma_s(1 + \cos\theta)$, де σ_s – поверхневий натяг зволожуючої речовини (води), θ – краєвий кут змочування [3, с. 221, рис. 5.1]; а міцність контактної пари визначається рівнянням Лапласа, що виражає роль капілярних сил: $p = \sigma_s(1/r_2 - 1/r_1)$, де r_1 і r_2 – радіуси опуклої і увігнутої поверхні рідинної манжети відповідно [3, с. 221, с. 222].

Міцність агрегату (грудки) визначається трьома чинниками:

міцністю контактної пари, що залежить від типу зволожувальної рідини, гранулометричного складу матеріалу і визначається відомою формулою Лапласа;
кількістю контактів в одиниці об'єму матеріалу;

кількістю води в точці контакту (*ММВ*, *МКВ*).

Максимальна молекулярна вологоємність матеріалу (*ММВ*) є величина вологості, що відповідає максимальній товщині міцно сорбованого шару води.

Максимальна капілярна вологоємність (*МКВ*) – це величина вологості, що відповідає заповненню капілярів агрегату з дисперсних частинок водою при збереженні трифазної системи «повітря–рідина–тверде» (верхня межа робочої вологості матеріалу).

Визначення абревіатури *НКВ* як нерухомої капілярно-стикової вологоємності матеріалу, що відповідає заповненню вільного об'єму контактної пари без утворення манжети між ними і характеризує нижню межу робочої вологості грудкуемого матеріалу [3, с. 222], неможна вважати правильним. Воно містить логічну смислову помилку: якщо вода не утворює манжети між контактуючими поверхнями, при тому, що в системі немає капілярів, заповнених водою, то взагалі немає підстав говорити про існування в даній системі капілярної вологи. Очевидно, що стилістично і логічно вірним визначенням *НКВ* є найменша капілярна вологоємність (трохи вища *ММВ*) [1, с. 60].

В цілому вміст і стан води в дисперсній системі визначає грудкуємість матеріалу, яка суттєво залежить від його питомої поверхні [3, с. 222].

Вітчизняними і закордонними вченими теоретично обґрунтована і експериментально підтверджена пряма залежність між величинами питомої поверхні шихти і капілярної сили в сирому окатиші і його опором роздавлюванню [4, с. 33, 34].

На міцність зчеплення часток впливають наступні фактори: 1) вміст води в залізорудній шихті; 2) гранулометричний склад сипкого матеріалу; 3) природа грудкуемого матеріалу; 4) умови утворення гранул. Міцність грудки P' підпорядковується залежності [5, с. 64]:

$$P' = kSp[(1 - \epsilon)/\epsilon],$$

де k – коефіцієнт, що враховує природу матеріалу; S – питома поверхня шихти; ρ – густина матеріалу; ϵ – пористість окатиша.

Вплив питомої поверхні шихти на міцність окатишів наведено на рис. 1 [3, с. 224, рис. 5.2].

Однак роль питомої поверхні залізорудного концентрату проявляється не лише в позитивному впливі на зчеплення частинок. Тенденція до зростання міцності окатишів внаслідок збільшення кількості контактів може перекриватися негативним впливом звуження діапазону коливання розміру частинок і, отже, зниженням щільності окатишів. Крім того, зростання питомої поверхні призводить до збільшення робочої вологості шихти, що спричиняє зростання пористості сухих окатишів і, отже, менш сприятливі умови для протікання процесу зміцнення. За результатами дослідження процесу огрудкування та зміцнення окатишів з лебединського концентрату різної питомої поверхні спостерігається екстремальний зв'язок між питомою поверхнею концентрату та металургійними властивостями обпалених окатишів [5, с. 64].

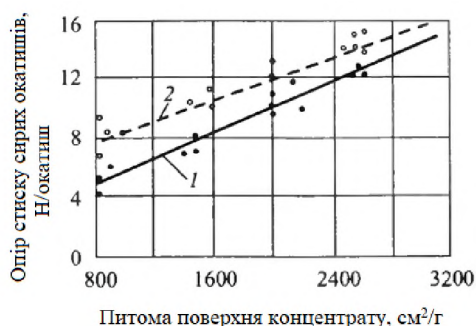


Рис. 1. Залежність міцності окатишів від величини питомої поверхні шихти: 1 – не офлосовані; 2 – офлосовані до основності 0,8-1,0

Таким чином, треба розуміти [2, с. 9], що грудкуємість неможливо визначити однозначно, оскільки вона є результатом одночасної дії багатьох факторів, насамперед гранулометричного складу матеріалу, форми і властивостей поверхні зерен, хіміко-мінералогічного складу.

Суттєве зауваження щодо використання характеристик вологоємностей для розрахунку коефіцієнта грудкуємість [6] пов'язане із застосуванням закону фільтрації Дарсі для визначення швидкості насичення матеріалу водою. За допомогою цього закону неможливо певною мірою описати швидкість насичення, зважаючи на те, що він є емпіричним і адекватно описує характер руху порової рідини лише за відносно малих градієнтів тиску, не враховуючи механічних впливів при грануляції.

Крім того, оцінка грудкуємість на основі характеристик вологоємностей не враховує вплив на сили зчеплення факторів, що визначається станом шару зерен частинок шихти, і, насамперед, наявністю полярних радикалів і атомів з великим негативним електростатичним по-

тенціалом. При тому, теоретичний аналіз вказує на те, що магнетитовий концентрат піддається великому впливу електростатичних і магнітних сил [7].

Однак, попри всі зауваження щодо недоліків використання водно-фізичних характеристик для оцінки придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування, саме вони, наряду з гранулометричним складом, залишаються найбільш поширеним підґрунтям для встановлення коефіцієнтів грудкуємості шихти, що піддається огрудкуванню.

Для характеристики гранулометричного складу залізорудного концентрату, основного компонента шихти для виробництва окатишів, звичайно використовують вміст у ньому певних часток (наприклад, менше 0,074; 0,050; 0,044 мм) і питому поверхню. Практика огрудкування показує, що у випробуваних межах деяке збільшення частки дрібних часток у шихті сприятливо позначається на процесі грануляції і якості сирих і обпалених окатишів. Міцність окатишів тим вища, чим більше число контактів між окремими частками, число яких збільшується зі зменшенням розміру часток [8, с. 25, 26].

Сирі окатиші задовільної міцності можна одержати при подрібненні концентрату до крупності $\leq 0,2$ мм. Однак існують і більш жорсткі вимоги, відповідно до яких весь матеріал розмілюють, наприклад, до крупності $\leq 0,15$ мм, у тому числі 75 % матеріалу – до крупності $\leq 0,044$ мм. У деяких випадках вимоги до ступеня здрібнювання ще вище: 85–90 % матеріалу повинні бути здрібнені до крупності $\leq 0,044$ мм [2, с. 10]. Поширеною є практика використання для виробництва окатишів концентрату, який має вміст фракції $<0,075$ мм на рівні 80 %, як наприклад в роботі [9].

Якщо для оцінки грудкуємості матеріалів користуватися величиною їх питомої поверхні, то для придатних матеріалів вона складає 1500–2500 $\text{см}^2/\text{г}$, тобто $\approx 2000 \text{ см}^2/\text{г}$, що відповідає вимогам до крупності: 100 % фракції $<0,15$ мм, в тому числі 75 % фракції $<0,04$ мм [2, с. 12].

За кордоном значення питомої поверхні зазвичай називають індексом Блейна, який має розмірність $\text{см}^2/\text{г}$. Як правило вважають, що будь-який матеріал, призначений для огрудкування, повинен мати індекс Блейна $>1200 \text{ см}^2/\text{г}$, хоча відомі приклади [9] отримання позитивних результатів при використанні залізорудного концентрату з індексом Блейна 1180 $\text{см}^2/\text{г}$.

Розробка показників грудкуємості на базі водно-фізичних характеристик матеріалу вимагає попереднього розгляду можливих зв'язків (станів) води в шарі дрібних частинок.

Згідно з широко розповсюдженою класифікацією форм зв'язку води з матеріалом, запропонованою академіком П.О. Ребіндером [10, с. 591], розрізняють: хімічну (іонна, молекулярна), фізико-хімічну (адсорбційна, осмотична) та фізико-механічну (волога в капілярах і макрокапілярах, волога змочування) форми зв'язку. Дещо інакше виглядає класифікація форм зв'язку капілярно-пористих тіл з поглиненою рідиною в залежності від величини і природи енергії зв'язку, представлена професором Д.А. Ковальовим зі співробітниками [11, с. 105]. Пропонується розрізняти чотири форми зв'язку води з дисперсними системами: 1) хімічно зв'язану; 2) капілярно зв'язану; 3) адсорбційно зв'язану; 4) осмотично зв'язану (вода, яка знаходиться в розбавлених розчинах). Для умов згрудкування залізорудних матеріалів найбільший інтерес представляє адсорбційно і капілярно зв'язана вода.

Характеризуючи різні стани води в шарі дрібного матеріалу ті самі автори розрізняють воду [11, с. 97] адсорбовану – міцно зв'язану; слабо орієнтовану – рихло зв'язану; вільну – капілярну і гравітаційну.

Міцно зв'язана вода, яка володіє максимальною гігроскопічною ($МГ$), і сумісно з максимальною кількістю рихло зв'язаної води утворює категорію максимальної молекулярної вологості ($ММВ$) матеріалу. В свою чергу $ММВ$ і максимальна кількість вільної капілярної вологи, що утримується структурою, формують категорію максимальної капілярної вологості ($МКВ$). Величини $МГ$ і $ММВ$ характеризують енергію взаємодії поверхні часток з водою, а величина $МКВ$ – структуру пористого матеріалу (наприклад структуру гранули) [11, с. 97, 98].

В тому ж навчальному посібнику [11, с. 142] вказано, що товщина плівки адсорбованої води знаходиться в межах 0,05–0,2 мм, тому не залишається місця для капілярної вологи. З цієї причини величина $ММВ$, рівна 7–12 %, включає $МГ$, яка дорівнює 0,5–2,6 %, і найменшу капілярну вологості ($НКВ$). З останнім виразом попереднього речення неможливо погодитись тому що, як було вказано вище, $НКВ$ має значення трохи більше за $ММВ$ [1, с. 60].

Використання водно-фізичних характеристик шихти для визначення коефіцієнта грудкуємості K започатковано наприкінці 60-х років минулого століття В.М. Вітюгіним зі співробітни-

ками [12]. При цьому було запропоновано декілька розрахункових формул з різною кількістю вихідних показників, які за аналогією з ґрунтознавством [13, с. 139] можна називати мінерально-гідрологічними константами, оскільки ці показники характеризують граничні значення вологості, при яких кількісні зміни рухливості води в капілярно-пористих матеріалах, що складають шихту, переходять у якісні відмінності.

Оцінити грудкуємість шихти можна безпосередньо в процесі огрудкування віднесенням продуктивності огрудкувача до довжини шляху огрудкування шихти в ньому або оберненої цьому відношенню величини (рис. 2) [3, с. 224, рис. 5.3]. Це відношення являє собою питому продуктивність 1 м шляху огрудкування або скільки метрів цього шляху потрібно для виробництва 1 т окатишів за 1 год. Матеріали, що мають питому поверхню менше 1100 см²/г або відповідну їй грудкуємість менше, ніж 0,18 т/(год·м), непридатні для виготовлення окатишів. Найкращими для огрудкування є шихти з грудкуємістю в межах 0,25–0,35 т/(год·м) [4, с. 42, 43]. Недоліком цього показника грудкуємісті є те, що для одержання порівнянних результатів необхідно забезпечити дотримання однакових умов огрудкування (параметри конструкції огрудкувача і режим його роботи).

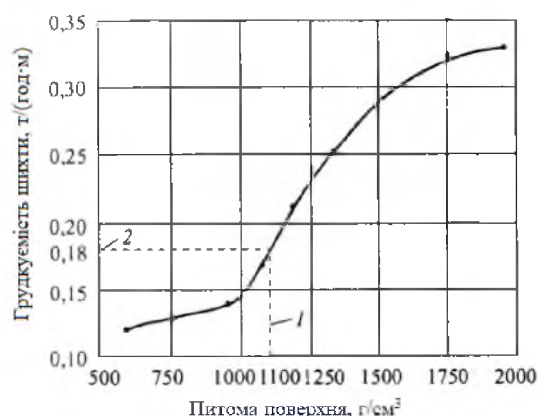


Рис. 2. Залежність грудкуємісті шихти від її питомої поверхні: 1 – граничні значення, нижче яких отримання окатишів ускладнене; 2 – відношення продуктивності огрудкувача до довжини шляху огрудкування [4, с. 42]

Постановка задачі. Завданням представленого дослідження є порівняльна аналітична оцінка достовірності результатів визначення за різними методиками придатності тонкодисперсних залізорудних концентратів та шихт на їх основі до огрудкування.

Викладення матеріалу та результати. Структурно-теоретичний аналіз відомих формул для визначення коефіцієнта (показника) грудкує-

місті K на основі мінерально-гідрологічних констант

$$K = MMB / (MKV - MMB) \quad [11, \text{с. 360}; 12], \quad (1)$$

де K може бути більше 1 (до 6);

$$K = (HKV - W_{\text{вз}}) / (MKV - HKV) \quad [5, \text{с. 64}; 3, \text{с. 222}], \quad (2)$$

де $W_{\text{вз}}$ - внутрішньозеренна вологість, яка не відіграє активної ролі в процесі гранулоутворення;

$$K = (HKV - M\Gamma) / (MKV - HKV) \quad [1, \text{с. 63}; 12]; \quad (3)$$

$$K = HKV / (MKV - HKV) \quad [12]; \quad (4)$$

$$K = (MKV - MMB) / MKV \quad [4, \text{с. 34}; 12] \quad (5)$$

дозволяє зробити наступні зауваження та висновки:

формула (1), за якою коефіцієнт грудкуємісті може приймати значення більше одиниці, не зовсім вписується в існуючу шкалу оцінювання коефіцієнта K , який може змінюватись від 0 до 1. За значенням K матеріали поділяють на такі, що не грудкуються ($K < 0,2$), слабо грудкуються ($K = 0,2-0,35$), середньої грудкуємісті ($0,35-0,5$), добре грудкуються ($K = 0,5-0,8$), дуже добре грудкуються ($K > 0,8$) [3, с. 222] або грудкуємість при $K > 0,8$ порушується [1, с. 63];

у формулі (2) використовується значення внутрішньозеренної вологості $W_{\text{вз}}$, стосовно якої відсутнє пояснення фізичного сенсу цієї форми вологості і методу її визначення. Скоріш за все, внутрішньозеренна вологість $W_{\text{вз}}$ приймає значення трохи менші або такі, що повністю відповідають максимальній гігроскопічній вологоємності $M\Gamma$, про що свідчить існування формули (3), в якій замість $W_{\text{вз}}$ використовується $M\Gamma$;

з представлених п'яти формул у чотирьох – (1)–(4) – знаменник являє собою різницю між двома мінерально-гідрологічними константами, більша з яких – MKB , а менша – HKV або близька до неї за значенням MMB . При цьому чисельник містить відповідно HKV (інколи трохи зменшений на величину $M\Gamma$ або $W_{\text{вз}}$) або MMB . У формулі (5) знаменник представлений тільки однією константою – MKB , однак суттєве збільшення абсолютного значення знаменника у цьому випадку компенсується перенесенням відносно великого значення MKB (зменшеного на MMB) в чисельник. Таким чином можна констатувати структурно-змістовну ідентичність усіх

п'яти відомих формул визначення коефіцієнта гудкуємості за допомогою мінерально-гідрологічних констант.

Незважаючи на структурну ідентичність формул (1)–(5), значення коефіцієнтів K , отриманих за цими формулами, суттєво різняться. Про це свідчать дані табл. 1, в якій характеристики кількох типів залізородних концентратів [3, с. 223, табл. 5.1] доповнені результатами розрахунків коефіцієнта гудкуємості K за формулами (1), (3)–(5). Чисельні значення коефіцієнтів гудкуємості розрахованих для одного і того типу концентрату можуть коливатись від 0,55–0,64 ($\Delta = 0,09$) для концентрату СтГЗК до 0,58–0,80 ($\Delta = 0,22$) для флотаційного концентрату МихГЗК. Тому виникає необхідність визначити формулу, яка найбільш адекватно характеризує придатність матеріалу до огрудкування. Порівняльний аналіз даних табл. 1 вказує, що такою є формула (3), відносно якої вважається [14], що її чисельник є кількісним виразом здатності дисперсного матеріалу утримувати капілярно-нерухому вологу, яка обумовлює міцність вологого агрегату, а знаменник висловлює кількість капілярно-рухомої води, що визначає швидкість огрудкування.

Таблиця 1

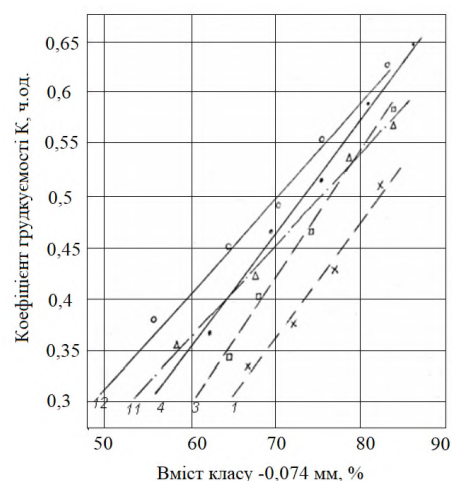
Характеристика концентратів збагачення магнетитових кварцитів

Концентрати	Вміст $\text{Fe}_{\text{заг}}\%$	Вміст класів, %		$S_{\text{тв}}^{\text{тв}} \text{ см}^2/\text{г}$	$HKB, \%$	$MKB, \%$	$W_{\text{вс}}, \%$	$MT, \%$	$MMB, \%$	$K_{(1)}, \text{ч.од.}$	$K_{(2)}, \text{ч.од.}$	$K_{(3)}, \text{ч.од.}$	$K_{(4)}, \text{ч.од.}$	$K_{(5)}, \text{ч.од.}$
		<50 мкм	<10 мкм											
Флотаційні														
ПівдГЗК:														
1	64,60	95,2	25,0	2000	7,6	20,0	0,5	1,0	7,1	0,55	0,57	0,53	0,61	0,65
2	62,80	92,7	19,5	2000	7,3	18,0	0,5	1,0	6,7	0,59	0,64	0,59	0,68	0,63
3	61,30	89,8	16,6	1800	7,0	19,7	0,5	1,0	6,5	0,49	0,51	0,47	0,55	0,67
МихГЗК:														
флотаційний	63,60	93,1	36,3	2000	8,0	18,0	0,8	1,3	7,5	0,71	0,72	0,67	0,80	0,58
магнітно-флотаційний	63,0	87,0	7,9	1800	8,0	20,5	0,8	1,3	7,5	0,58	0,58	0,54	0,64	0,63
магнітний	59,70	84,6	5,5	1550	7,2	19,0	0,8	1,3	6,7	0,54	0,54	0,50	0,61	0,65
Магнетитові:														
ЛебГЗК	68,0	86,1	14,4	1700	7,0	19,3	0,4	0,9	6,5	0,51	0,54	0,50	0,57	0,66
СтГЗК	65,60	94,0	18,3	2000	7,0	18,0	0,4	1,0	6,5	0,57	0,60	0,55	0,64	0,64
МихГЗК	64,5	92,1	15,3	1800	7,0	19,0	0,5	1,0	6,5	0,52	0,54	0,50	0,58	0,66

Про перевагу формули (3) над іншими говорить також її оцінка проф. В.І. Коротичем як такої, що враховує сумарний вплив на гудкуємість сипких матеріалів їх гранулометричного складу і фізико-хімічних властивостей [1, с. 63]. Про тісний зв'язок коефіцієнта гудкуємості K , що визначається за формулою (3), з вмістом в матеріалі тонких фракцій крупності вказують результати експериментального дослідження [15], представлені на рис. 3. Таким чином, можна говорити про наявність пропорційної залежності не тільки між ступенем дисперсності і питомою поверхнею матеріалу, але також між обома цими показниками і коефіцієнтом гудкуємості матеріалу K .

Рис. 3. Залежність коефіцієнта гудкуємості K шихт з продуктів збагачення і дрібняку фосфоритів від вмісту в них фракції $-0,074$ мм: 1 – ковдорський апатитовий концентрат; 3 – хвости магнітної сепарації; 4 – відвальні хвости гравітаційного збагачення; 11 – 75 % хвостів магнітної сепарації + 25 % дрібняку фосфоритів крупністю $< 0,25$ мм; 12 – 75 % відвальних хвостів гравітації + 25 % дрібняку фосфоритів крупністю $< 0,25$ мм

Досліджуючи методики визначення гудкуємості тонкодисперсного матеріалу на основі мінерально-гідрологічних констант треба мати на увазі, що розмежування води, яка міститься в ґрунті, на окремі категорії або форми залежно від її фазового стану і природи сил, що утримують її в ґрунті (сорбційні, капілярні, сила тяжіння), є умовним, оскільки вода в ґрунті практично знаходиться одночасно під дією кількох сил з переважним



впливом сили якогось одного виду, тому, говорячи про дію на воду сил тієї чи іншої природи, мають на увазі їх переважний вплив [13, с. 136]. Ця думка, висловлена по відношенню до ґрунтів, цілком стосується тонкодисперсних шихт, які використовуються для виробництва залізорудних окатишів. Тому наближеність визначених коефіцієнтів грудкуємості конкретних шихт до реальної їх поведінки в процесі огрудкування залежить від ступеню представницькості мінерально-гідрологічних констант, використаних при їх розрахунку. До цього зауваження треба ще відмітити, в якості негативного фактору при оцінюванні придатності тонкодисперсного матеріалу до огрудкування, відсутність стандартних методів експериментального визначення мінерально-гідрологічних констант сипких матеріалів, що ускладнює порівняння значень коефіцієнтів K , розрахованих на їх використанні.

Висновки та напрямок подальших досліджень. На даний час існує два основних підходи до оцінки придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування, один з яких базується на використанні показників крупності матеріалу (методи на основі вмісту окремих фракцій крупності або величини питомої поверхні), а другий – на його характеристичних вологоємностях (мінерально-гідрологічних константах), методи якого розрізняються формулами для розрахунку коефіцієнта грудкуємості K . Придатними для огрудкування вважаються тонкодисперсні матеріали, які містять не менше 75 % фракції $< 0,04$ мм або мають питому поверхню > 120 м²/кг. Добре грудкуються матеріали, у яких $K = 0,5-0,8$.

Порівнюючи основні підходи до оцінки придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування, слід надати перевагу другому з них, підґрунтям якого є мінерально-гідрологічні константи. Цей висновок пояснюється тим, що результати оцінювання методами другого підходу, на відміну від особливостей першого підходу, який обмежений крупністю матеріалу, більш чутливі, оскільки залежать не тільки від гранулометричного складу матеріалу, а також від інших його характеристик – форми і властивостей поверхні зерен, хіміко-мінералогічного складу, магнітних властивостей, які теж впливають на силу зчеплення часток грудкуємого матеріалу. Серед відомих формул для розрахунку коефіцієнта грудкуємості K , переважаючою є та, чисельник і знаменник якої складається з різниць відповідно між найменшою капілярною і максимальною гігроскопічною ($HKB - MI$) та між максимальною і найменшою капілярною ($MKB - HKB$) вологоємностями.

Доцільним напрямком подальших досліджень в питанні оцінки методів встановлення придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування може бути розробка стандартних методів визначення мінерально-гідрологічних констант шихт, які використовуються для виробництва окатишів.

Список літератури

1. Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовке сырья к доменной плавке. М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
2. Маерчак Ш. Производство окатышей. М.: Металлургия, 1982. – 232 с.
3. Сырье для черной металлургии: Справочное издание в 2-х т. Т. 1. Сырьевая база и производство окискованного сырья (сырье, технологии, оборудование) / М.Г. Ладыгичев, В.М. Чижикова, В.И. Лобанов и др. : под ред. В.М. Чижиковой. – М.: Машиностроение-1, 2001. – 896 с.
4. Бережной Н.Н., Булычев В.В., Костин А.И. Производство железорудных окатышей. М.: Недра, 1977. – 240 с.
5. Производство агломерата и окатышей: справ. изд. / С.В. Базилевич, А.Г. Астахов, Г.М. Майзель и др. : под общ. ред. Ю.С. Юсфина. – М.: Металлургия, 1984. – 216 с.
6. Стойкова Я.А., Бережной Н.Н. Анализ показателей комкуемости тонкодисперсных материалов, / Сборник научных трудов Донбасского гос. ун-та. – Алчевск: ДонГТУ. – 2012. – Вып. 38. – С. 140-146.
7. Савельев С.Г., Стойкова Я.А. Оценка комкуемости магнетитовых концентратов / IX Междунар. конгр. обогатителей стран СНГ: (сб. материалов). – М.: МИСиС, 2013. – С. 498-501.
8. Интенсификация производства и улучшение качества окатышей. Ю.С. Юсфин, Н.Ф. Пашков, Л.К. Антоненко и др. – М.: Металлургия, 1994. – 240 с.
9. Mbele P. Pelletizing of Sishen concentrate. J. S. Afr. Inst. Min. Metall. vol. 112, n.3. Johannesburg, Mar. 2012. http://www.scielo.org.za/scielo.php?pid=S2225-62532012000300013&script=sci_arttext&tlang=es
10. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. М.: Химия, 1973. – 752 с.
11. Теоретические основы производства окискованного сырья. Д.А. Ковалёв, Н.Д. Ванюкова, В.П. Иващенко и др. – Днепропетровск: ИМА-пресс, 2011. – 476 с.
12. Витюгин В.М. Оценка комкуемости мелкозернистых материалов / Изв. вузов. Черная металлургия. – 1969. – № 4. – С. 18-22.
13. Почвоведение. Учеб. для ун-тов. В 2 ч. / Под ред. В.А. Ковды, Б.Г. Розанова. Ч. 1. Почва и почвообразование / Г.Д. Белищина, В.Д. Васильевская, Л.А. Гришнина и др. – М.: Высш. шк., 1988. – 400 с.

14. Определение комкуемости и рабочей влажности пихт для производства окатышей. **В.М. Витюгин, А.В. Витюгин, Н.Н. Бережной, В.И. Смирнов.** Бюллетень ЦНИИЧМ, 1973, №23. - С. 29, 30.
15. **Трушников В.Е.** Исследование комкуемости мелкодисперсного сырья из отходов мелочи фосфоритов и хвостов обогащения, содержащих фосфор и магний, для электротермического получения удобрений // Горный информационно-аналитический бюл. Mining informational and analytical bulletin (scientific and technical journal). – 2009. – № 12. – С. 83-90.

Рукопис подано до редакції 09.05.2023

УДК 550.83+550.837: 550.82: 551.244: 551.495 (477.63)

П.Г. ПІГУЛЕВСЬКИЙ, д-р геолог. наук, с.н.с., Інститут геофізики ім. С.І. Суботіна НАНУ
В.К. СВИСТУН, член-кор. АГНУ, канд. геолог. наук, директор ДГЕ «Дніпрогеофізика»
Г.І. ЄРЕМЕНКО, член-кор. АГНУ, канд. техн. наук, доц.,
Криворізький національний університет
С.О. ЯРЕМІЙ, аспірант, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

ЗАСТОСУВАННЯ ДИСТАНЦІЙНИХ МЕТОДІВ ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ВПЛИВУ ТЕХНОГЕННИХ СПОРУД НА ПОВЕРХНЕВІ ТА ПІДЗЕМНІ ВОДИ (НА ПРИКЛАДІ ПІВДЕННОГО КРИВБАСУ)

Мета. Аналіз результатів застосування дистанційних (геофізичних і космічних) методів при дослідженні впливу техногенних споруд на поверхневі та підземні води на території південно-західної промислової зони Криворізького залізничного басейну та встановлення особливостей протікання гідрогеологічних процесів.

Методи дослідження. Дані гідрогеологічних, гідрологічних, інженерно-геологічних і геофізичних досліджень кінця ХХ початку ХХІ сторіччя території та інтерпретація даних космічної спектральної і радарної зйомки в комплексі з геофізичними дослідженнями, дозволила оцінити зміни фізичних процесів від денної поверхні до глибин у десятки метрів під нею.

Наукова новизна. Дослідженнями доведено, що процеси обводнювання (зневоднювання) геологічного розрізу залежать від сучасних деформацій рельєфу, які відбуваються в зонах тектонічних розломів в межах території Кривбасу, що свідчить про зміну пружно-деформаційного стану земної кори в центральній частині Українського щита. Трансрегіональний Криворізький глибинний розлом формує в кристалічному фундаменті різнорангову систему розломів і пов'язані з нею зони підвищеної проникливості.

Практична значимість. Дослідження дозволять вирішити ряд важливі проблеми гірничої геології: визначення зв'язку поверхневих та приповерхневих вод, вплив геолого-тектонічної будови на розвиток процесів підтоплення навколо великих техногенних споруд, визначити шляхи їх ймовірної міграції.

Результати. Гідрогеологічні, інженерно-геологічні та геофізичні дослідження минулих років на території південного Кривбасу в комплексі з сучасними спостереженнями свідчать про значні зміни в гідрогеологічному середовищі за останні десятиліття. Ступень їх мінералізації залежить від підтоку техногенних вод з Лівобережних відвалів та сезонних опадів.

Комплексні дослідження показали, що моніторингові спостереження та контроль, супутниково-наземною системою дистанційних зондувань дозволяє оперативно в режимі реального часу та без порушення суцільності геологічного середовища прогнозувати зміни природно-техногенної ситуації поблизу небезпечних промислових об'єктів та споруд гірничо-металургійного комплексу і оперативне реагувати на ймовірні катаклізми.

Ключові слова: гідрогеологічна структура, техногенне підтоплення, мінералізовані води, космічні знімки, геоелектричні дослідження.

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними завданнями. Сучасні масштаби господарської діяльності та екстенсивне нарощування її обсягів, посилюють негативний вплив на природу та призводять до порушення екологічної рівноваги багатьох промислових районів України. Так, в Криворізькому залізничному басейні (Кривбасі) збільшення видобутку залізних руд з одночасним накопиченням відходів гірничо-видобувної діяльності зумовило значну деградацію довкілля. Міська агломерація та промислові об'єкти постійно зазнають негативних екологічних змін природного середовища від впливу таких техногенно-небезпечних процесів як провали, зсуви, утворення пустот під житловими масивами, підтоплення мінералізованими водами [1-5, 7,8].

На рис. 1 на фоні морфології природного рельєфу добре видно техногенні форми (відвали, хвостосховища, кар'єри та інші техногенні споруди, які створені людиною. Техногенні форми рельєфу можна розділити на групи: акумулятивні та денудаційні. До денудаційних форм відносяться кар'єри та зони обвалення відвалів, до акумулятивних - відвали, шламосховища, ставки-накопичувачі, дамби, греблі.

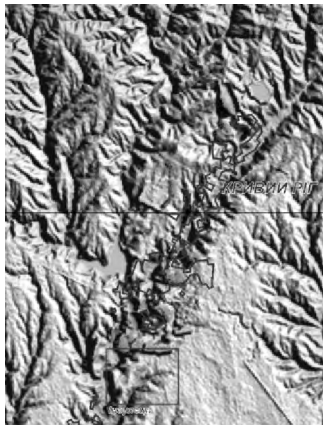


Рис. 1. Оглядовий радарний знімок Криворізької агломерації з розташуванням ділянки досліджень ставка «Лебязий»

Аналіз досліджень та публікацій. Проблема мінералізації підземних вод дуже гостро стоїть на території Кривбасу. Особливу роль відіграє тектонічна будова території, яка безпосередньо відображається на протіканні всіх природних та техногенних процесів.

Трансрегіональний Криворізький глибинний розлом в межах Кривбасу формує в кристалічному фундаменті різнорангову систему розломів. Дрібні тектонічні порушення і пов'язані з ними зони підвищеної проникливості впливають на формування і швидкість наземних негативних геологічних і техногенних процесів – підтоплення, формування ділянок просідання ґрунту та провалів, утворення зсувів. З тектонікою також пов'язані особливості форм рельєфу (рис. 1), які визначають напрям поверхневої та підземної водної фільтрації, а також зони найбільш активної фільтрації підземних вод. Фізичні поля в таких зонах, як правило, набувають мозаїчних форм [11-15, 17].

Тектонічні порушення є шляхами циркуляції підземних вод і визначають гідравлічний зв'язок між водовміщуючими мінеральними різновидами порід та поверхневими водами.

Одним з таких об'єктів є ставок «Лебязий» (рис. 1), розташований між Лівобережними відвалами та вигином річки Інгулець (на північний захід від с. Новоселівка). Води ставка мають підвищену мінералізацію із змінною величиною у часі, що не дозволяє місцевим жителям їх використовувати в господарській діяльності. Залежно від заповнюваності ставка змінюються шляхи міграції високомінералізованих вод, впливаючих на ступінь прояву зсувних процесів вздовж лівого берега р. Інгулець.

Ставок «Лебязий». Розташований на території південного Кривбасу між Лівобережними відвалами та вигином річки Інгулець (на північний захід від с. Новоселівка). З геоморфологічної точки зору відвал є трапецієвидною, терасованою, акумулятивною додатною формою рельєфу з вершиною у вигляді плато (рис. 1). Відвали відіграють важливу роль в техногенній трансформації природного середовища та поширення високомінералізованих вод.

В ставку «Лебязий» (рис. 2) поширені високомінералізовані води, які характерні для четвертинних та неогенових відкладів, а також для зон великих розломів докембрійського фундаменту [6, 9-11, 16]. Водночас їх мінералізація може змінюватися як за глибиною, так і по латералі.



липень 2012 р.



травень 2018 р.

Рис. 2. Космознімки території досліджень ставка «Лебязий»: профілі спостережень ВЕЗ та їх номери – чорні крапки; моніторингові свердловини та їх номер – білі крапки

З метою пошуку та локалізації джерел високомінералізованих вод на цій території були виконані комплексні дослідження, які включали супутникові дані та польові геофізичні роботи з подальшою їхньою спільною обробкою та інтерпретацією.

Постановка задачі. Для визначення ступеня та характеру техногенних змін у стані гідро-геологічної структури верхньої частини земної кори на півдні Криворізького залізрудного басейну було застосовано методику порівняльно-статистичного аналізу раніше проведених робіт та сучасних спостережень. Як вихідні дані, були використані результати геологорозвідувальних робіт, геологічних, гідрогеологічних, геофізичних зйомок та еколого-геологічних досліджень, які здійснювалися до введення в експлуатацію нині діючих великих техногенних об'єктів гірничо-металургійного комплексу. Ці матеріали були узагальнені та з урахуванням спектральних космоснімків дозволили визначити положення профілів польових досліджень методом вертикального електричного зондування (ВЕЗ).

Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ). Польові геофізичні роботи проектувалися з урахуванням спектрального знімку КА Pleiades, станом на 01.05.2018 р.

Для виявлення гідрогеологічних змін у досліджуваному масиві використовувалися дані геофізичних спостережень та ДЗЗ, проведених влітку 2012 року.

З метою уточнення окремих елементів території досліджень спільна інтерпретація результатів наземних спостережень та супутникових даних виконувалася безпосередньо в процесі проведення польових робіт для визначення детальності вимірювань. При цьому здійснювалася інтеграція цифрових карток мультиспектральних зображень, дешифрування і побудова карт лінементів тектонічних структур та геодинамічних зон для прогнозу тектонофізичних змін.

Електророзвідувальні дослідження. Геофізичні роботи між Лівобережними відвалами, вигином р. Інгулець та с. Новоселівка за профілями 7, 9, 11, 3.1 (рис. 2, 3) було виконано Дніпропетровською геофізичною експедицією «Дніпрогеофізика» (ДГЕ «Дніпрогеофізика») методом вертикального електричного зондування – ВЕЗ [12-15]. Для збільшення детальності при вивченні геоелектричного розрізу та високої якості робіт, в умовах присутності інтенсивних промислових електромагнітних перешкод, була застосована методика послідовних розносів лінії живлення АВ. Кількість вимірів було обрано в 1,7 рази більше ніж за стандартною методикою. При цьому використовувалися такі напіврозноси живильної лінії, як $AB/2=1.5; 2; 3; 5; 6; 8; 11; 15; 20; 25; 30; 40; 50; 60; 80; 110; 150$ м.

Максимальне рознесення лінії $AB/2=150$ м дозволило вивчити геоелектричний розріз на глибину понад 70-80 м.

Фактично отримана середня відносна похибка зйомки на території, обчислювалася як середнє арифметичне з похибок вимірювань на окремих точках і становить 1,87%.

За даними робіт проаналізована залежність питомого електричного опору окремих порід від мінералізації присутніх у них вод, а також гранулометричного складу, глинистості та пористості. Залежність параметра ρ від вологості піщано-глинистих порід і концентрації розчинених солей була наведена аналогічно розглянутій в роботі [12]. Вона показує, що залежність питомого опору від окремо взятого показника властивостей порід має кореляційний характер з тим чи іншим ступенем тісноти зв'язку.

Також, для характеристики геоелектричного розрізу (параметрів геологічних шарів) площі досліджень були використані результати інтерпретації параметричних ВЕЗ, виконаних поблизу свердловин і колодязів.

Викладення матеріалу та результати. За попередніми результатами досліджень на території виділяються два типи тріщинуватості кристалічних порід: екзогенна - розвинена на ділянках неглибокого їх залягання і пов'язана з їх розшаруванням внаслідок вивітрювання; ендегенна – зумовлена тектонічними процесами у верхній частині земної кори. Слід зазначити, що водопроявлення тріщинуватих зон залежить від безлічі факторів - потужності перекриваючих осадових відкладень, петрографічного складу порід, ступеня тектонічної порушеності, характеру та віку (залікованих або тих, що живуть) тектонічних порушень та ін. Більш частими є неотектонічні порушення, тоді як давні розломи характеризуються відсутністю води, що зумовлено вторинними процесами, що призводять до «залічування» тріщин.

Проведеними електророзвідувальними роботами по профілях 7, 9, 11, 3.1 у модифікації ВЕЗ (рис. 2) між Лівобережними відвалами, вигином р. Інгулець та с. Новоселівка ділянок суцільного підтоплення не виявлено (рис. 3).

Уздовж профілів у верхній частині геологічного розрізу від 2-5 до 10 м у більшості випадків відзначаються підвищені значення питомого опору, що вказує на відсутність обводнення в межах досліджуваної території (рис. 3).

На південь відвалів «Лівобережні» виявлено окремі ділянки (лінзи) локального підтоплення та заболочування. Обробка інтерферометричних знімків (за 2015-2018 рр.) дозволила виділити на денній поверхні території зони, які зазнають сучасного опускання.

Вони досить добре проявляються на спектральному космознімку (див. рис. 2) по зміні відтінку спектра, який обумовлений рослинністю, приуроченою до високо залягаючи ґрунтових вод.

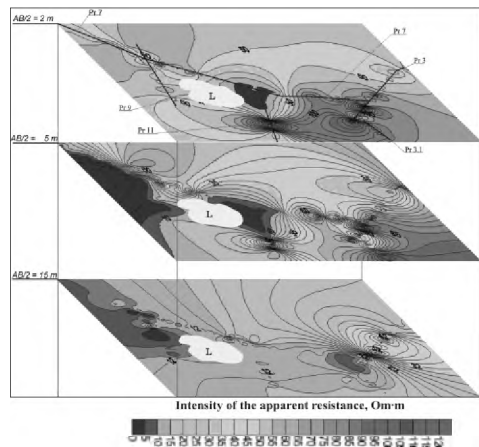


Рис. 3. Погоризонтні зрізи (в аксонометрії) опору ρ_k на розносах $AB/2$ 1,5 - 15 м

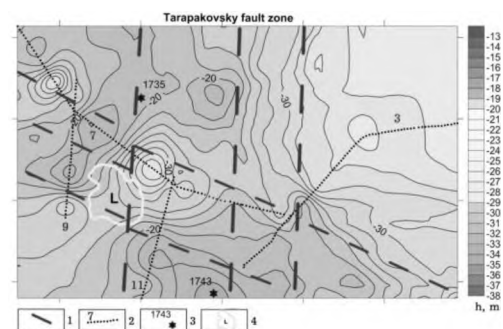


Рис. 4. Карта розрахованих глибин залягання докембрійського фундаменту за даними робіт методом ВЕЗ зі схемою розривних порушень: розломи – 1; Профілі ВЕЗ та їх номер – 2; моніторингові свердловини та їх номер – 3; контур Леб'язого ставка – 4

кристалічних порід та їх кор вивітрювання (рис. 4).

Як показано на рис. 5 мінімальна кількість визначеного сухого залишку у водах свердловин №1735 та №1743 була зафіксована у 2004 р., максимальна кількість – у 2008 р.

Спостерігається збільшення кількості сухого залишку в період з 2004 р. по 2008 р. (на той час його кількість була максимальною), з різким стрибком у бік збільшення у 2007 р.

Наступні три роки після 2008 року спостерігається плавний спад цього параметра.

У період 2011-2016 рр. кількість сухого залишку в пробах зі свердловини мало змінювалась, а потім знову пішла на спад. Слід зазначити подібність поведінки гістограм по свердловинам 1735 та 1743 у період 2008-2018 рр. Синхронна зміна сухого залишку в цих свердловинах може свідчити про їхнє розташування в одній тектонічній зоні розломів.

Виконані геоелектричні дослідження дозволили побудувати прогнозну карту глибин залягання докембрійських порід з наявністю локальної депресії по покрівлі фундаменту в основі ставка Леб'язого.

Ці лінзи підтоплення можуть бути пов'язані зі складною будовою зон тектонічних порушень, зонами перетину докембрійських розломів субмеридіонального і західно-північно-західного простягання (рис. 4), які впливають на поширення та локалізацію мінералізованих вод.

Ширина смуги обводненості порід верхньої частини розрізу по латералі коливається від 50 до 150 м, з урахуванням мінералізованої води зі ставка «Леб'язий».

Ставок утворився у 90-х роках минулого сторіччя на північно-західній околиці с. Новоселівка внаслідок акумуляції атмосферних опадів, фільтраційних вод переважно з хвостосховища «Войкове» та за рахунок води, що видавлюється відвалами «Лівобережні».

Площа ставка 1,5-2,5 га (див. рис. 2), але розміри його не постійні, влітку за сухої погоди вони зменшуються через інтенсивне випаровування води (див. рис. 2).

Про його техногенне походження свідчать дані аналізу поверхневих вод ставка у 2017 р., де мінералізація становила 10,1 г/дм³, загальна жорсткість - 79,0 мг/екв., вміст хлоридів - 6279,0 мг/дм³, сульфатів - 7,0 мг/дм³ [11].

Зони сучасного опускання денного рельєфу з урахуванням розломно-блокової будови породного масиву вздовж лівого берега річки Інгулець йдуть на південний захід, захоплюючи території сіл Новоселівка та Новолатівка.

У цю смугу потрапляє і свердловина 1743, яка розкриває високо-мінералізований водоносний горизонт четвертинних алювіальних відкладень, що знаходяться в тальвезі балки Мікушина. По тальвегу балки проходить тектонічне порушення, перетинаючи зону насуву Тарапаківського розлому. Дані буріння по свердловинах 1735 і 1743 показують неглибоке залягання

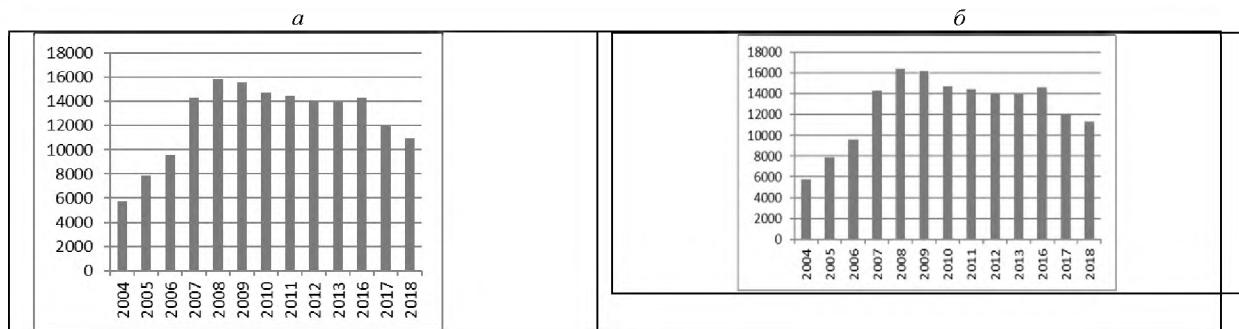


Рис. 5. Гістограми кількості сухого залишку у свердловинах №1735 (а) та №1743 (б)

Зона, що описується, обумовлена специфікою з'єднання (вузлом) різноорієнтованих розривних порушень, де у вигляді лінз, досі зберігаються (накопичуються) високомінералізовані води, законсервовані в Криворізькій системі розломів і води, що мігрували в 1978 р. по діагональним розломам північно-західного накопичувача шахтних вод у балці Свистунова. Ці лінзи високо-мінералізованих вод можуть розбавлятися незначними за кількістю менш мінералізованими джерелами з розломних зон в основі ложа хвостосховища «Войкове». На погоризонтних зрізах ВЕЗ (рис. 3) помітна міграція мінералізованих вод (темно-синій колір) на різних стратиграфічних рівнях.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналіз та зіставлення раніше виконаних гідрогеологічних, інженерно-геологічних та геофізичних досліджень на території південного Кривбасу та сучасних спостережень за останні десятиліття свідчать про значні зміни в гідрогеологічному середовищі.

Виконані комплексні дослідження дозволили побудувати прогностичну карту глибин залягання докембрійських порід та встановити наявність локальної депресії по покрівлі фундаменту в основі ставка «Лебязий».

Зона, що описується, обумовлена специфікою з'єднання різноорієнтованих розривних порушень, де у вигляді лінз зберігаються високо-мінералізовані води, законсервовані в Криворізькій системі розломів.

Комплексування дистанційних методів, що вивчають різні властивості геологічного середовища, показують можливість оперативного та науково обґрунтованого виявлення багатьох перелічених проблем підтоплення з метою забезпечення безпечної діяльності у зоні впливу техногенних об'єктів.

Результати комплексних досліджень дозволили зробити висновок про включення до вже існуючих методів моніторингових спостережень та контролю, супутниково-наземну систему дистанційних зондувань, що дозволяє оперативно та без порушення суцільності геологічного середовища в режимі реального часу прогнозувати зміни природно-техногенної ситуації поблизу небезпечних промислових об'єктів та споруд гірничо-металургійного комплексу.

Список літератури

1. Ахкозов Ю.Л. Современная активизация геологических процессов и некоторые проблемы горнодобывающих районов/Ю.Л. Ахкозов//Геолого-мінералогічний вісник, 2003. - №1,- С.78–81.
2. Багрій І.Д. Досвід комплексної оцінки та картографування факторів техногенного впливу на природне середовище Кривого Рогу та Дніпродзержинська/[І.Д. Багрій, Ю.Г. Білоус, Ю.Г. Вікул та ін.] - К.: Фенікс, 2005 – 216 с.
3. Багрій І.Д. Прогнозування розломних зон підвищеної проникності гірських порід для вирішення геоecологічних та пошукових задач // – К.: ІГН НАН України 2003. – 152 с.
4. Багрій І.Д. Гідросистема Криворізького басейну – стан і напрямки поліпшення./[І.Д. Багрій, П.Ф.Гожик, Є.В.Самоткал та ін.] – Фенікс, 2005. – 216 с.
5. Багрій І.Д. Геоecологічні проблеми Криворізького басейну в умовах реструктуризації гірничодобувної галузі./ [І.Д.Багрій, П.В.Блінов, Н.А.Белокопитова та ін.] – Фенікс, 2002. – 192с.
6. Белевцев Я.Н. Геология Криворожских железорудных месторождений./ [Я.Н. Белевцев, Г.В. Тахтуев, А.И. Стрыгин и др.] // -К.: изд. АН УССР. – 1962. – т.1-2 - 564с.
7. Малахов І.М. Методичні питання вивчення трансформації геологічного середовища у гірничо-видобувних регіонах./ [І.М. Малахов, Т.М. Альохіна, В.В. Іванченко та ін.] Наук. зб. Деякі чинники техногенезу Серія: Геологічне середовище антропогенної екосистеми. – Кривий Ріг: Октан-прінт, 2011, - 172с.
8. Маяков Й.Д. Екологічна оцінка стану геологічного середовища // Наук. зб. Деякі чинники техногенезу Серія: Геологічне середовище антропогенної екосистеми. – Кривий Ріг: Октан-прінт, 2001, - 96с.
9. Мечніков Ю.П., Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Кирилюк О.С. Особливості диз'юнктивної тектоніки Криворізького залізничного району / Геофизический журнал. – 2016. – №5(Т.38). – С.154-163.

10. Пігулевський П.И. О современной активизации докембрийских глубинных разломов Украинского щита // 36. наук. пр. НГУ. Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет". Дніпропетровськ. – 2015. № 46. – С. 38-44.
11. Пігулевський П.Г., Свистун В.К. Геофізичні дослідження процесів підтоплення в промисловому Кривбасі. Харків. ФОП Мезіна В.В., 2018. – 210 с.
12. Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Кирилюк О.С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південно-західного Кривбасу. Частина 1. Фізико-геологічні передумови досліджень/Geoinformatika. – 2016. – № 3 (59). – С.69-75.
13. Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Кирилюк О.С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південно-західного Кривбасу. Частина 2. Результати застосування геоелектричних методів при обмеженні ділянок підтоплення / Geoinformatika. – 2016. – № 4 (60). – С. 62-74.
14. Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Кирилюк О.С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану південно-західного Кривбасу. Частина 3. Результати застосування геоелектричних методів при вирішенні інженерно-геологічних задач/Geoінформатика. – 2017. – №2 (62). – С. 55-63.
15. Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Кирилюк О.С. Дослідження геоелектричними методами інженерно-геологічного стану Південно-Західного Кривбасу. Частина 4. Використання потенціальних полів при вивченні сучасної тектоніки // Геоінформатика. – 2017. – №3 (63). – С. 48-55.
16. Pihulevskiy P.G., Anisimova, L.B., Kalinichenko, O.O., Panteleeva, N.B., Hanchuk, O.V. [2021]. Analysis of natural and technogenic factors on the seismicity of Kryvyi Rih. Journal of Physics: Conference Series. 2021 | conference-paper. p. 12. <https://doi.org/10.1088/1742-96/1840/1/012018>.
17. Svistun V. and Pigulevskiy P. (2021). Gravimetric survey and gravimetric database in Ukraine "Dnirogeofizika" during 2000–2011 carried out works on collection, analysis and formation of an electronic gravimetric data base (GDB) of the territory of Ukraine. Based on the results of the work car. 20th International Conference Geoinformatics - Theoretical and Applied Aspects, 11-13 May 2021. Volume 2021, 1 – 7. <https://doi.org/10.3997/2214-4609.20215521132>.

Рукопис подано до редакції 15.05.2023

УДК 622.7: 534

В.С. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Криворізький національний університет
Н.В. МОРКУН, д-р техн. наук, проф., Львівський національний університет ім. Івана Франка
А.А. ГАПОНЕНКО, Є.Ю. БОБРОВ, аспіранти, Криворізький національний університет

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЛІНІЙНИХ УЛЬТРАЗВУКОВИХ МЕТОДІВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЗАЛІЗОРУДНОЇ СИРОВИНИ

Метою дослідження є дослідження та обґрунтування і застосування ультразвукових вимірювань для визначення нелінійних характеристик гірської породи.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного та імітаційного моделювання, а також методи швидкого перетворення Фур'є для аналізу результатів ультразвукових вимірювань.

Наукова новизна полягає у теоретичному обґрунтуванні та моделюванні методів нелінійних ультразвукових вимірювань для оцінки характеристик гетерогенних середовищ.

Практичне значення полягає в обґрунтуванні застосування нелінійних ультразвукових вимірювань для визначення структурно-текстурних особливостей гірської породи.

Результати. Взаємодія акустичного сигналу з речовиною називається «лінійною», якщо відгук матеріалу та сила вихідного сигналу змінюються лінійно залежно від сили вхідного сигналу, як у законі Гука. Більшість відомих акустичних явищ пов'язані з лінійно-пружними характеристиками матеріалу. Однак у матеріалах з деякими специфічними властивостями з'являється ряд нових «нелінійних ефектів», таких як спотворення форми акустичних хвиль через амплітудно-залежну швидкість поширення хвилі, генерація вищих гармонік, формування сумарної та різницевої частоти для кількох вхідних сигналів, акустичне перетікання, самофокусування тощо. Гірська порода, зокрема залізорудна сировина, є гетерогенним середовищем, яка має специфічні структурно-текстурні особливості та включає фазові неоднорідності типу тріщин і пір. Запропоновано метод оцінки фазової неоднорідності гірської породи, заснований на визначенні функції відображення нелінійної залежності поширення в ній акустичного сигналу, що включає формування ультразвукових синусоїдальних імпульсів фіксованої частоти, але різної амплітуди, випромінювання їх в досліджуване середовище, спектральний аналіз та обчислення функції відображення нелінійної залежності, що враховує різницю огинають прийнятих імпульсів різної амплітуди, їх гармонійне та повне спотворення, що дозволяє визначити рівень додаткового нелінійного ослаблення основної частотної складової прийнятого сигналу, який не залежить від коефіцієнта посилення підсилювача, акустичного опору середовища, характеристик розсіювання, дифракційних ефектів і визначається лише розподілом фазових неоднорідностей у гірській породі.

Ключові слова: ультразвук, вимірювання, нелінійність, моделювання, огинаюча імпульсу, спотворення.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Взаємодія акустичного сигналу з речовиною називається «лінійною», якщо відгук матеріалу та сила вихідного сигналу змінюються лінійно залежно від сили вхідного сигналу, як у законі Гука. Більшість відомих акустичних явищ пов'язані з лінійно-пружними властивостями матеріалу. Однак для матеріалів з деякими специфічними властивостями з'являється ряд нових «нелінійних ефектів», таких як спотворення форми акустичних хвиль через амплітудно-залежну швидкість поширення хвилі, генерація вищих гармонік, формування сумарної та різницевої частоти для кількох вхідних сигналів, акустичне перетікання, самофокусування тощо [1]. Вони все частіше використовуються для неруйнівної характеристики матеріалів та виявлення пошкоджень у промислових виробках. Нарешті, питання, які стосуються застосування нелінійних вимірювань у гірничий галузі потребують подальших досліджень.

Аналіз досліджень і публікацій. Нелінійні властивості завжди тісно пов'язані з кількістю та специфічним характером дефектів у матеріалах [2]. Доведено, що нелінійні акустичні методи є корисними для вимірювання міцності зчеплення в шаруватих структурах [3], неруйнівного виявлення пошкоджених дефектів у кристалах [4], кераміці [5], вугільних електродах [6] і бетонних конструкціях [7], а також втомних тріщин в металах, таких як сталі, титанові та алюмінієві сплави [8]. Деякі дефекти матеріалів, такі як внутрішні напруги, мікротомні тріщини та об'ємні розриви, як правило, є передвісниками основного розтріскування та подальшого руйнування матеріалу. Однак звичайні лінійні акустичні характеристики, такі як швидкість звуку, коефіцієнти загасання, пропускання та відбиття, виявилися нечутливими до цих неоднорідностей матеріалів. У літературі нещодавно були запропоновані нелінійні акустичні методи для виявлення такого роду дефектів у матеріалах [1,9].

При поширенні звукових хвиль високої інтенсивності виникають нелінійні ефекти, що призводять до прогресивного спотворення профілів і спектрів хвиль при їх розповсюдженні у нелінійному середовищі. Розрахунок величини спотворення результатів вимірювання акустичних параметрів, викликаного нелінійним характером поширення хвилі в середовищі, відкриває можливість для визначення величини B/A , що представляє собою відношення коефіцієнтів, які стоять при першому та другому ступенях розкладання акустичного тиску в ряд за малим об'ємним стисненням [10]. Ця величина отримала назву нелінійний акустичний параметр середовища. Даний параметр досить чутливий до зміни стану середовища та його структури.

У роботі [11] пропонується метод визначення локальної оцінки коефіцієнта нелінійності β . Метод заснований на одновимірному розв'язанні нелінійного рівняння Вестерфельта з втратами, що дозволяє отримати локальний зв'язок між β та полем хвилі тиску. На основі кількох припущень представлений підхід, заснований на співвідношенні між гармонійним і фундаментальним полями, який дозволяє зменшити вплив просторових амплітудних варіацій спекл-паттерна. Розроблений алгоритм здатний оцінити коефіцієнт нелінійності різних типів матеріалів, що цікавлять, а для його реалізації не потрібно спеціальної вимірювальної установки або перетворювача.

Для швидкої оцінки параметрів ультразвукового імпульсу розроблено метод, заснований на квазілінійному наближенні [12]. Цей метод безпосередньо обчислює поперечний профіль імпульсу при будь-якій геометрії вимірювань. Обчислювальний алгоритм обробляє три просторові виміри. Порівняння форм імпульсів, поперечних та аксіальних профілів, отриманих цим методом та іншими сучасними програмно-технічними засобами, показує задовільний збіг.

Постановка завдання. Використання ультразвукових методів для вимірювання характеристик гірських порід за наявності в них фазових неоднорідностей типу тріщин і пір стикається з низкою труднощів, обумовлених тим, що в цьому випадку процес поширення ультразвуку набуває істотно нелінійного характеру. У цьому випадку фундаментальне припущення, що конститутивна поведінка досліджуваного матеріалу є лінійно-пружною, що обґрунтовує можливість застосування лінійних вимірювань, є несправедливим [13]. Більшість гірських порід не є лінійно еластичними навіть до утворення тріщин. Що ще важливіше, нелінійна еластичність гірських порід значно збільшується за наявності тріщин і пір. У зв'язку з цим виникає проблема врахування наявності фазових неоднорідностей у гірській породі на результати ультразвукових вимірювань їх нелінійних характеристик.

Викладення матеріалу і результати. Міжзернові пори та тріщини в гірській породі спільно утворюють повну або загальну пористість [14]

$$m = m_{ig} + m_{fr}, \quad (1)$$

де m - загальна пористість; m_{ig} - міжзернова або міжгранулярна пористість; m_{fr} - тріщинна пористість.

У роботі [15] для характеристики загального впливу всіх меж розділу фазових неоднорідностей на параметри поздовжньої акустичної хвилі в горі породі пропонується використовувати нормовану швидкість $\bar{V}_p$

$$\bar{V}_p = 100 \frac{V_p}{V_{pm}}, \quad (2)$$

де V_p - швидкість поздовжніх хвиль у зразку гірської породи; V_{pm} - швидкість у твердій матриці гірської породи, в якій відсутня міжзернова пористість та тріщини.

У роботі [15] показано, що для гірських порід із міжзерновою пористістю залежність нормованої швидкості від пористості має вигляд

$$\bar{V}_p = 100 - 1.6m_{ig}, \quad (3)$$

а для тріщинуватих порід визначається виразом

$$\bar{V}_p = 100 - 22m_{fr}, \quad (4)$$

При одночасній наявності міжзернових пор та тріщин вираз для нормованої швидкості має вигляд

$$\bar{V}_p = 100 - 1.6m_{ig} - 22m_{fr}. \quad (5)$$

Враховуючи, що загальна пористість складається з цих двох компонент (1), з формули (5) було отримано вираз [16] для розрахунку величини тріщинної пористості з використанням залежності нормованої швидкості від загальної пористості

$$m_{fr} = \left(100 - 1.6m - 100 \times \frac{V_p}{V_{pm}} \right) / 20.4. \quad (6)$$

З виразів (3)-(6) можна зробити висновок, що швидкості поздовжніх ультразвукових хвиль мають суттєву залежність від наявності тріщин та пір у гірських породах. Разом з тим, на процес розповсюдження поздовжніх ультразвукових хвиль впливає багато інших факторів, тому використання для визначення характеристик гірської породи тільки одного цього параметру, а саме швидкості їх поширення, може привести до отримання неоднозначних оцінок.

При розповсюдженні акустичних хвиль у нелінійно-пружному твердому тілі відбувається їхнє спотворення. Визначальне співвідношення може бути задано усіченим розкладанням у ряд Тейлора по градієнту зміщення (одномірний випадок, тобто тільки одна компонента зміщення відмінна від нуля) [17]

$$\sigma = E_0 u' + 0.5\beta E_0 [u']^2, \quad (7)$$

де σ і u - напруга та зміщення; E_0 і β - параметри лінійної пружності та нелінійності відповідно; $u' = \partial u / \partial x$ - градієнт зміщення.

Квадратичний член у рівнянні (7) викликає зменшення миттєвої жорсткості при розтягуванні та збільшення при стисканні. За відсутності об'ємних сил баланс лінійної кількості руху визначається виразом

$$\sigma' = \rho \ddot{u}, \quad (8)$$

де ρ - масова щільність; $\ddot{u} = \partial^2 u / \partial t^2$.

Підставляючи рівняння (7) до рівняння (8) та з урахуванням $c^2 = E_0 / \rho$, нелінійне хвильове рівняння набуває вигляду [17]

$$\ddot{u} = c^2 u'' = \beta c^2 A_1^2 x [1 - \cos 2(kx - wt)], \quad (9)$$

Вирішення цього рівняння відносно хвиль, що поширюються в напрямку x , має такий вигляд [17]

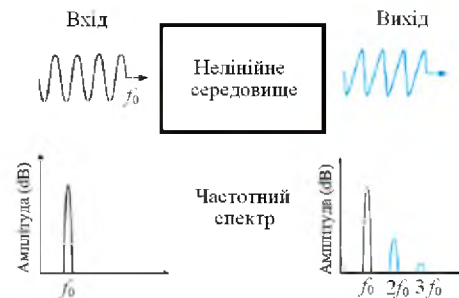
$$u(x, t) = A_1 \cos(kx - wt) + \frac{1}{8} \beta k^2 A_1^2 x [1 - \cos 2(kx - wt)], \quad (10)$$

де A_1 , k та w амплітуда, хвильове число і кутова частота хвиль.

Фізичний аспект цього рішення полягає у тому, що безперервні первинні хвилі (u_1) генерують квазістатичний імпульс величини $\frac{1}{8}\beta k^2 A_1^2 x$ та другу гармоніку (на частоті 2ω), що має кумулятивну амплітуду $\frac{1}{8}\beta k^2 A_1^2 x$. Оскільки другі гармоніки мають хвильове число $2k$, вони поширюються з тією ж швидкістю, що й первинні хвилі, тобто $c = \omega/k = 2\omega/2k$. Якщо ряд Тейлора у рівнянні (7) не був би обрізаним на порядку 2, то гармоніки порядку 3 і вище також існували б у розв'язанні.

Рис. 1 ілюструє, що при розповсюдженні ультразвукових хвиль середовище діє як нелінійний оператор, і через самовзаємодію вхідний сигнал спотворюється. Перетворюючи часовий сигнал у частотну область за допомогою перетворення Фур'є або швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), можна отримати вищі гармоніки на цілих кратних вхідній частоті f_0 (де $\omega = 2\pi f$).

Рис. 1. Середовище, як нелінійний перетворювач синусоїдальних хвиль на частоті f_0 .



Розглянемо рух синусоїдального хвильового пакета, що має кінцеву тривалість у середовищі з дисперсією у вигляді суперпозиції гармонійних функцій [18].

Введемо позначення

$$u(x, 0) = f(x). \quad (11)$$

Представимо початкове збурення у вигляді

$$f(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(k) e^{ikx} dk, \quad (12)$$

де

$$A(k) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) e^{-ikx} dx. \quad (13)$$

З урахуванням (11) $u(x, t)$ буде мати наступний вигляд

$$u(x, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} A(k) e^{i(kx - \omega(k)t)} dt. \quad (14)$$

Таким чином, функція $u(x, t)$ є суперпозицією гармонійних хвиль, що утворюють початкове збурення та поширюються у середовищі.

У процесі моделювання реалізація обчислень інтегралів (12)-(14) проводиться на інтервалах кінцевої тривалості, тобто виконується розкладання функції не в інтеграл, а в ряд Фур'є. У цьому випадку початковий імпульс описується виразом [19]

$$f(x) = \sum_{n=0}^{N-1} A(n) e^{iknx}, \quad (15)$$

де $k = \frac{2\pi}{x_{max} - x_{min}}$.

$$A(n) = \frac{1}{x_{max} - x_{min}} \int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x) e^{-iknx} dx, \quad (16)$$

де $n = 0, 1, \dots, N - 1$.

Відповідно отримаємо

$$u(x, t) = \sum_{n=0}^N A(n) e^{i(kn(x - x_{min}) - \omega(kn)t)}, \quad (17)$$

де N – кількість значень функції $f(x)$.

На рис. 2а наведені уявна та дійсна частини початкового збурення, а на рис. 2б - трансформація огинаючої хвильового пакета при поширенні його в дисперсійному середовищі у моменти часу $t_0 = 0$, $t_1 = 100$, $t_2 = 200$ ($\times 10^{-5} c$).

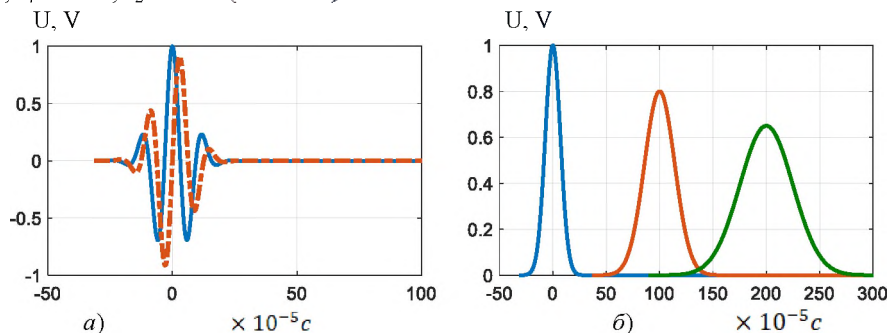


Рис. 2. а - уявна та дійсна частини початкового збурення; б - трансформація огинаючої хвильового пакета при поширенні його в дисперсійному середовищі

При поширенні змінюється форма хвильового пакета, відбувається зменшення висоти огинаючої пакета при одночасному збільшенні його ширини, тобто відбувається розпливання хвильового пакета у просторі.

Зміна форми хвильового пакета відбувається відповідно до закону збереження енергії [19]

$$\sum_{n=0}^N u(t_i, x_n)^2 = \text{const}. \quad (18)$$

Просторове моделювання ультразвукового поля у випадково неоднорідному гетерогенному середовищі виконано за допомогою програмного середовища Matlab та методу узагальненого кутового спектру (GASM), реалізованого у пакеті CREANUIS [20]. Цей метод обчислює 4-мірну (3-D та t) еволюцію основної та другої гармонік для будь-яких 2-мірних джерел (матричного перетворювача) з можливою неоднорідністю коефіцієнта нелінійності. Розглянуто модель, коли матричний перетворювач випромінює ультразвуковий пучок, що збуджується імпульсом збудження $Ax(t)$ від генератора сигналів. Після лінійного та нелінійного поширення прийнятий сигнал посилюється підсилювачем і детектується його огинаюча. На рис. 3 наведена технологія формування діаграми спрямованості ультразвукового матричного перетворювача у режимі ехолокації [21].

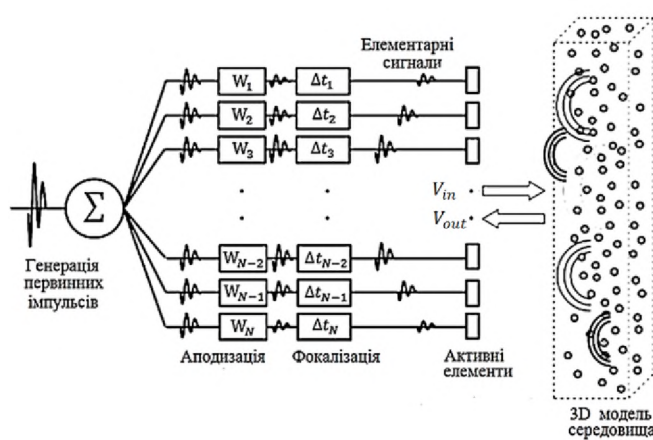


Рис. 3. Технологія формування діаграми спрямованості ультразвукового матричного перетворювача у режимі ехолокації: W_i – вагові коефіцієнти аподицації на i -му елементі; Δt_i – часові затримки, що використовуються при динамічному фокусуванні на i -й лінії

Для заданої геометрії моделювання спочатку проводиться розрахунок нелінійного УЗ-поля на основній частоті та частоті другої гармоніки. Потім розраховуються нелінійні сигнали з урахуванням основної складової та другої гармоніки тиску, що впливає на кожен розсіювач, з урахуванням просторово-

варіантної функції розсіювання точки (PSF) та коефіцієнта нелінійності.

Технологія формування ультразвукового променя (фокусування, віконна обробка та аподицація) реалізується під час моделювання. Основна (p_1) та друга гармоніка (p_2) складові хвилі тиску визначаються як

$$p_1(x, y, z, t) = F^{-1}(P_0(k_x, k_y, z_0, k_t) e^{-iK(z-z_0)}), \quad (19)$$

$$p_2(x, y, z, t) = F^{-1}\left(\frac{-ik_t^2}{2K\rho_0 c_0^2} \left(\int_{z_0}^z F(\beta(x, y, z) p_1^2(x, y, z, t) e^{iKu} du)\right) e^{-iK(z-z_0)}\right), \quad (20)$$

де x, y, z – просторові змінні; t – часова змінна; z_0 – вихідне положення зонду; β – коефіцієнт нелінійності; ρ_0 – щільність; c_0 – швидкість акустичних хвиль; F та F^{-1} – 2D-FT перетворення Фур'є і зворотне перетворення Фур'є у вимірах x, y та t ; k_x, k_y, k_t – хвильове число у вимірах x, y та t ; P_0 – перетворення Фур'є вихідної хвилі у вихідному положенні z_0 .

Комплексне тривимірне хвильове число K визначається виразом

$$K(k_x, k_y, k_t) = \sqrt{k_t^2 - k_x^2 - k_y^2} - i\alpha(f), \quad (21)$$

де $\alpha(f)$ – згасання у середовищі.

Модель загасання GASM враховує частотно-залежне згасання у середовищі відповідно до формули

$$\alpha(f) = \alpha_0 \left(\frac{f}{10^6}\right)^\gamma, \quad (22)$$

де f – частота сформованого сигналу (Гц); α_0 – постійна згасання середовища ($\text{Np} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{MHz}^{-\gamma}$); γ – число від 1 до 2 для середовища, що моделюється.

На рис. 4 наведено результати просторового моделювання ультразвукового поля матричного перетворювача.

Розглянемо метод кількісної оцінки нелінійності досліджуваного середовища стосовно процесу розповсюдження в ньому ультразвукового сигналу.

Вихідний сигнал матричного перетворювача (рис. 3) можна розрахувати за інтегралом ультразвукового поля на приймальній апертурі. Основна складова вихідного сигналу може бути визначена як [22]

$$V_{out} = G_1 V_{in} \operatorname{sech} \left(e^{-\alpha_1 z} C V_{in} \frac{\beta k_1}{2 \rho_0} \ln \frac{z}{z_0} \right), \quad (23)$$

де $\beta = (1 + B/2A)$ - нелінійний параметр; α_1 - коефіцієнт загасання; ρ_0 - щільність; k_1 - хвильове число; z_0 - координата точки вимірювань; C - постійна, що визначає ефективність перетворювача (вимірюється експериментально); G_1 - фундаментальний дифракційний член [23]; V_{in} - напруга імпульсу збудження, яку можна представити у наступному вигляді

$$V_{in} = A x(t), \quad (24)$$

де A - пікова напруга імпульсу збудження; $x(t)$ - синусоїдальне збудження.

Рис. 4. Результати моделювання ультразвукового поля матричного перетворювача

Огинаюча прийнятого сигналу після посилення та квадратурної демодуляції запишеться як

$$H(t) = N G_1 A x(t) \operatorname{sech} \left(e^{-\alpha_1 z} C A x(t) \frac{\beta k_1}{2 \rho_0} \ln \frac{z}{z_0} \right), \quad (25)$$

де N - коефіцієнт посилення системи.

З цього виразу випливає, що на огинаючу прийнятого сигналу впливають багато факторів: коефіцієнт посилення підсилювача, параметри вихідного імпульсу, додаткове згасання через нелінійні ефекти в середовищі і т.д. На рис. 5 наведено результати моделювання впливу на огинаючу ультразвукову сигналу змін нелінійних параметрів середовища та шумів у вимірювальному каналі.

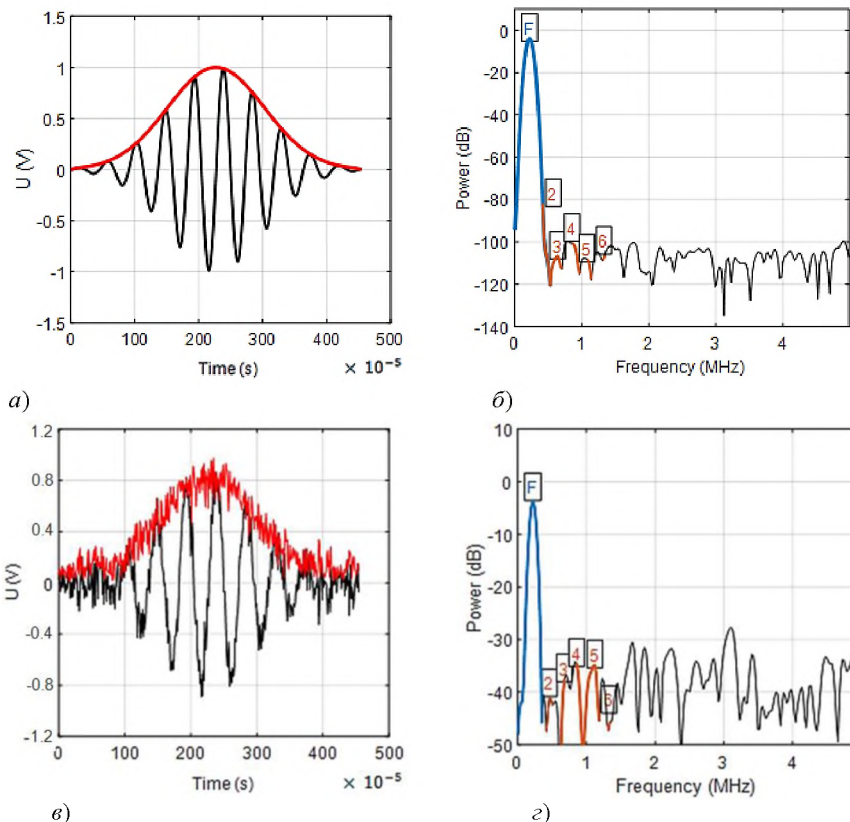
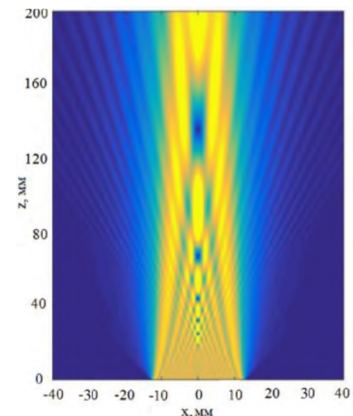


Рис. 5. Результати моделювання впливу на огинаючу ультразвукового сигналу змін нелінійних параметрів середовища та шумів у вимірювальному каналі: а, б - початковий імпульс та його спектральна характеристика; в, г - спотворений нелінійним середовищем імпульс та його спектральна характеристика

Розглянемо метод визначення нелінійної функції розповсюдження акустичного сигналу, заснований на формуванні та поширенні у досліджуваному середовищі ультразвукових синусоїдальних імпульсів з різною піковою напругою збудження.

Інформацію про нелінійне середовище можна вивести з різниці між огинаючими прийнятих сигналів, що пройшли відповідну відстань у середовищі, та у порівнянні специфікацій, які визначають їх гармонічне та повне спотворення.

Передбачається, що імпульси збудження, що генеруються, з піковими напругами A_1 та A_2 , визначається виразами

$$V_{in1} = A_1 x(t), \quad (26)$$

$$V_{in2} = A_2 x(t). \quad (27)$$

Відповідно до рівняння (25) огинаючі двох прийнятих сигналів дорівнюють H_1 і H_2 . Коефіцієнти посилення підсилювача сигналу вимірювальної системи налаштовуються таким чином, щоб виконувалось рівняння

$$N_1 A_1 = N_2 A_2, \quad (28)$$

де N_1 і N_2 - коефіцієнти посилення підсилювача; A_1 і A_2 , - пікові напруги імпульсів збудження.

В якості характеристичної функції, яка відображає нелінійні особливості досліджуваного середовища використовується наступна різниця [22]

$$L(t) = I_2(t) - I_1(t) = D \ln(H_2(t)) - D \ln(H_1(t)), \quad (29)$$

$$H_1(t) = N_1 G_1 A_1 x(t) \operatorname{sech} \left(e^{-\alpha_1 z} C A_1 x(t) \frac{\beta k_1}{2 \rho_0} \ln \frac{z}{z_0} \right), \quad (30)$$

$$H_2(t) = N_2 G_1 A_2 x(t) \operatorname{sech} \left(e^{-\alpha_1 z} C A_2 x(t) \frac{\beta k_1}{2 \rho_0} \ln \frac{z}{z_0} \right). \quad (31)$$

де D - лінійний член, який вибирається з урахуванням бажаного динамічного діапазону вимірювань; G_1 - загальний коефіцієнт посилення системи.

З урахуванням (26)-(28) функція відображення $L(t)$ нелінійної залежності поширення ультразвукового сигналу має вигляд [22]

$$L(t) = D \ln(\cosh(Q \beta A_1) \operatorname{sech}(Q \beta A_2)), \quad (32)$$

де
$$Q = e^{-\alpha_1 z} C x(t) \frac{k_1}{2 \rho_0} \ln \frac{z}{z_0}. \quad (33)$$

Рівняння (32) показує, що у разі відомих A_1 та A_2 функція $L(t)$ являє собою рівень додаткового нелінійного послаблення основної частотної складової через нелінійні ефекти. Крім того, з рівняння (32) видно, що коефіцієнт посилення підсилювача, акустичний опір середовища, характеристика розсіювання, дифракційні ефекти та інші фактори не мають відношення до результату. Отже, функція нелінійного відображення $L(t)$ залежить від наявності і виявляє розподіл нелінійного елемента в середовищі.

В процесі моделювання методу визначення нелінійної функції розповсюдження акустичного сигналу, заснованого на формуванні та поширенні у досліджуваному середовищі ультразвукових синусоїдальних імпульсів з різною піковою напругою збудження визначалась залежність нелінійного параметру β , тобто значення функції нелінійного відображення $L(t)$, від пікових напруг сигналів збудження A_1 та A_2 . Встановлено, що при зміні пікових амплітуд сигналів збудження частотою 220 кГц у діапазоні 100-600 В і співвідношення A_1/A_2 в діапазоні 15,6 дБ значення $L(t)$ змінювались з 1,352 до 3,784.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Останнім часом ультразвукові вимірювання нелінійних параметрів привертають значну увагу з метою оцінки характеристик досліджуваного середовища. При поширенні ультразвукової хвилі нелінійні ефекти призводять до спотворення форми хвилі, генерації гармонік та додаткового згасання. Запропоновано метод оцінки фазової неоднорідності гірської породи, заснований на визначенні функції відображення нелінійної залежності поширення в ній акустичного сигналу, що включає формування ультразвукових синусоїдальних імпульсів фіксованої частоти, але різної амплітуди, випромінювання їх у досліджуване середовище, спектральний аналіз та обчислення функції відображення нелінійної залежності, що враховує різницю огинаючих прийнятих імпульсів різної амплітуди, їх гармонічне та повне спотворення, що дозволяє визначити рівень додаткового нелінійного ослаблення основної частотної складової прийнятого сигналу, який не залежить від коефіцієнта посилення підсилювача, акустичного опору середовища, характеристик розсіювання, дифрак-

ційних ефектів і визначається лише наявністю та розподілом фазових неоднорідностей у гірській породі.

Напрямок подальших досліджень є кількісна оцінка функції відображення нелінійної залежності поширення ультразвукового сигналу у гірській породі, зокрема залізорудній сировині, з різними мінералогічними ознаками.

Список літератури

1. **Yongping Zheng, Roman Gr. Maev, Igor Yu. Solodov.** Nonlinear acoustic applications for material characterization: A review. - *Can. J. Phys.* 77: 927-967 (1999).
2. **J.H. Cantrell and W.T. Yost.** *J. Appl. Phys.* 81, 2957 (1997).
3. **S.U. Fassbender, M. Kroening, W. Arnold.** *Mater. Sci. Forum*, (Part 2, Nondestructive characterization of materials VII), 210, 783 (1996).
4. **I.Yu. Solodov.** *Ultrasonics*, 36, 383 (1998).
5. **A.M. Sutin and V.E. Nazarov.** *Radiophys. Quantum Electron.* 38, 109 (1995).
6. **A.M. Sutin, C. Delclos, and M. Lenclud.** In *Proc. 2nd Int. Symp. on Acoustic and Vibration Surveillance Methods and Diagnostic Techniques*. Senlis, France. 1995. p. 725.
7. **L.K. Zarembo, V.A. Krasil'nikov, and I.E. Shkol'nik.** *Soviet J. Nondestructive Testing.* 25, 706 (1990).
8. **J.K. Na, W.T. Yost, and J.H. Cantrell.** In *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*. Vol. 12B. Edited by D.O. Thompson and D.E. Chimenti. Plenum Press, New York. 1993. p. 2075.
9. **K.E.A. Van Den Abeele, J. Carmeliet, J.A. TenCate, and P.A. Johnson.** In *Proc. 2nd. Int. Conf. Emerging Technologies in NDT*. Athens, 1999.
10. **Галанін В.В., Адишпрін-Заде К.А.** Визначення нелінійного параметру В/А біологічних рідин на основі спектрального аналізу інтенсивних ультразвукових хвиль. - *Вісник нових медичинських технологій*, том 26, 2, 2019, 107-110 с. DOI: [10.24411/1609-2163-2019-16333](https://doi.org/10.24411/1609-2163-2019-16333).
11. **Sloun RV, Demi L, Shan C, et al.** Ultrasound coefficient of nonlinearity imaging. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Control.* 2015;62:1331-1341.
12. **Pieur F, Johansen TF, Holm S, et al.** Fast simulation of second harmonic ultrasound field using a quasi-linear method. *J Acoust Soc Am.* 2012;131:4365-4375.
13. **M. L. Wang, J. P. Lynch, and H. Sohn.** *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*. – Woodhead Publishing is an imprint of Elsevier, 80 High Street, Sawston, Cambridge.
14. **В.С. Жуков, Ю.О. Кузьмін.** Експериментальні дослідження впливу тріщинуватості гірських порід та модельних матеріалів на швидкість поширення поздовжньої хвилі. - *Фізика землі*, 2020 № 4, С. 39-50.
15. **Туранк К., Фурментро Д., Денні А.** Поширення хвиль і межі розділу в породах. *Механіка гірських порід стосовно проблем розвідки та видобутку нафти. Переклад з англ. та фр. / За ред. В. Морі, Д. Фурментро.* - Мир. 1994. С. 176-184.
16. **Жуков В.С.** Оцінка тріщинуватості колекторів за швидкістю поширення пружних хвиль. - 2012. С. 148-152.
17. **Cliff J. Lissenden.** Nonlinear ultrasonic guided waves. Principles for nondestructive evaluation. *Journal of Applied Physics* 129, 021101 (2021). <https://doi.org/10.1063/5.0038340>.
18. **Фарлю С.** Рівняння з частковими похідними для науковців та інженерів. - Мир, 1985.
19. **Поршнев С. В.** Комп'ютерне моделювання фізичних процесів у пакеті MATLAB. - Видавництво «Лань», 2011. - 736 с.
20. **F. Varray, O. Basset, P. Tortoli, C. Cachard.** CREANUIS: A Nonlinear Radio Frequency Ultrasound Image Simulator. - *Ultrasound in Medicine and Biology*, vol. 39, no. 10, pp. 1915-1924, 2013. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ultrasmedbio.2013.04.005>.
21. **F. Varray, A. Ramalli, C. Cachard, P. Tortoli, O. Basset.** Fundamental and second-harmonic ultrasound field computation of inhomogeneous nonlinear medium with a generalized angular spectrum method. - *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control*, vol. 58, no. 7, pp. 1366-1376, 2011.
22. **Wuxuan Chen, Peng Wang, Zhihong Zhang, Xudong Deng, Congyao Zhang, Shenggen Ju** (2019) Nonlinear ultrasonic imaging in pulse-echo mode using Westervelt equation: a preliminary research, *Computer Assisted Surgery*, 24:sup2, 54-61.
DOI: 10.1080/24699322.2019.1649065/24699322.2019.1649065.
23. **Nikoonahad M, Liu DC.** Pulse-echo single frequency acoustic nonlinearity parameter (B/A) measurement. *IEEE Trans Ultrason Ferroelect Freq Control.* 1990;37: 127-134

Рукопис подано до редакції 15.05.2023

А.О. ХРУЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., Ю.Г. ГОРБАЧОВ, канд. техн. наук, проф.,
А.С. ГРОМАДСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.,
В.А. ГРОМАДСЬКИЙ, Вік.А. ГРОМАДСЬКИЙ, кандидати техн. наук, доценти
Криворізький національний університет

ВІРТУАЛЬНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ З ПЛАНУВАННЯ НАУКОВИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Мета. Розробка віртуальних лабораторних стендів для реалізації практичної підготовки здобувачів вищої освіти при плануванні та проведенні наукових досліджень. На сьогодні, коли практично усі навчальні заклади країни працюють у режимі дистанційного навчання, підготовка якісних фахівців з інженерних спеціальностей потребує використання у навчальному процесі віртуальних лабораторних стендів, головними перевагами яких є можливість вивчати теорію та практику в одному місці, економія часу та ресурсів на організацію лабораторних робіт та можливість повторення практичних завдань необмежену кількість разів, що дозволяє здобувачам глибше засвоїти матеріал та отримати необхідні навички. А найголовніше те, що такі віртуальні практикуми дозволяють здобувачам отримувати досвід роботи з різними пристроями та обладнанням без потреби фізичної присутності в лабораторії, залишаючись у безпечному місці. Таким чином, тема дослідження важлива та актуальна.

Методи дослідження. У роботі використано аналіз та узагальнення досвіду відомих досліджень та розробок з впровадження віртуальних лабораторних практикумів у навчальний процес, математичне моделювання роботи вимірювальних приладів.

Наукова новизна. Розроблено математичні моделі, покладені в основу віртуальних стендів. У якості моделей використовуються відрізки ступеневих рядів Тейлора у вигляді алгебраїчних поліномів, складні нелінійні залежності з декількома локальними екстремумами, а також ступеневі залежності. Особливістю розроблених математичних моделей є забезпечення ними унікальності результатів для кожного дослідження завдяки додаванню генератор випадкових чисел для імітації похибки приладів та вимірювання.

Практична значимість. Розроблено віртуальний лабораторний практикум з дисципліни «Методи планування та проведення наукових досліджень гірничого устаткування» для здобувачів третього освітньо-наукового рівня вищої освіти. Наведено загальну схему дисципліни із застосуванням віртуального лабораторного практикуму. Розроблені віртуальні стенди що мають інтерфейс, який тотожний до лицьових панелей контрольно-вимірювальної апаратури.

Результати. Використовуючи методику створення віртуальних лабораторних стендів при підготовці фахівців з галузевого машинобудування, розроблено віртуальний лабораторний практикум, що налічує 6 стендів, які розміщено Освітньому порталі КНУ, який базується на системі модульного об'єктно-орієнтованого динамічного навчального середовища Moodle. Віртуальний лабораторний практикум отримав схвальні відгуки від здобувачів, які проходили курс, що дає привід подальшого розвитку цього напрямку.

Ключові слова: лабораторні роботи, віртуальний лабораторний стенд, структурна схема дисципліни, віртуальна симуляція, модульне об'єктно-орієнтоване динамічне навчальне середовище.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На сьогодні, коли практично усі навчальні заклади країни працюють у режимі дистанційного навчання, підготовка якісних фахівців з інженерних спеціальностей потребує використання у навчальному процесі віртуальних лабораторних стендів, які дозволяють здобувачам отримувати досвід роботи з різними пристроями та обладнанням без потреби фізичної присутності в лабораторії, залишаючись у безпечному місці.

Як вже зазначалося у [3, 11, 14, 15], головними перевагами віртуальних лабораторних стендів є можливість вивчати теорію та практику в одному місці, економія часу та ресурсів на організацію лабораторних робіт та можливість повторення дослідів необмежену кількість разів, що дозволяє здобувачам глибше засвоїти матеріал та отримати необхідні навички.

Такі стенди мають бути максимально прості у використанні, щоб здобувачі могли швидко освоїтися з ними та зосередитись на засвоєнні матеріалу. Важливо також, щоб віртуальні лабораторії були доступні на різних пристроях, наприклад комп'ютерах, планшетах і смартфонах [3, 11, 14, 15].

Аналіз досліджень і публікацій. Наведена у статті [3] методика створення віртуальних лабораторних стендів при підготовці фахівців з галузевого машинобудування, яка розроблена на основі аналізу відомих досліджень та наробок, дозволяє створити віртуальний лабораторний практикум для усіх рівнів вищої освіти. Згідно цієї методики початком роботи над таким прак-

тикумом є аналіз робочої програми дисципліни та визначення необхідних практичних та лабораторних завдань, які сприятимуть закріпленню теоретичного матеріалу, отриманого здобувачами під час лекцій. Наступним етапом є розробка сценаріїв та шляхів реалізації таких практикумів.

Розглянемо відомі шляхи реалізації віртуальних лабораторних практикумів.

Проект PhET Interactive Simulations [9] (рис 1) в Університеті Колорадо в Боулдері надає безкоштовні інтерактивні математичні та природничі симуляції. Симулятори PhET базуються на великих освітніх дослідженнях і залучають студентів через інтуїтивно зрозуміле середовище, схоже на гру, де студенти навчаються через дослідження та відкриття.

Такі симулятори PhET будуються як баузерні додатки написані з використанням мови HTML 5.

Програма STAR в MIT [12] прагне подолати розрив між науковими дослідженнями та аудиторією. Метою STAR є розробка інноваційних та інтуїтивно зрозумілих засобів навчання для використання в класі.

Усі навчальні інструменти STAR доступні у вільному доступі як додатки, що потрібно завантажувати на персональний комп'ютер.

Ще один яскравим прикладом реалізації лабораторних робіт у віртуальному середовищі є інтерактивний лабораторний практикум класичної термодинаміки, що охоплює основні теми курсу: внутрішня енергія, закони газів, перенесення тепла, теплове розширення, термодинамічні цикли [4] (рис. 2).

Ця розробка призначена для проведення лабораторних експериментів за умов відсутності реального лабораторного устаткування. Лабораторні установки виконані відповідно до їх реальних аналогів. Кожна лабораторна робота включає короткі методичні вказівки та довідкові відомості, необхідні обробки експериментальних даних. Поряд із математичною складовою, реалізована імітаційна модель експерименту, що включає комплекс графічних об'єктів, які візуально відображають лабораторне обладнання. Стенд побудовано з використанням мови програмування високого рівня AppGameKit.

Відмінною особливістю віртуальної лабораторії є її імплементарна гнучкість, яка обумовлена мультиплатформною підтримкою. Виконання імітаційних лабораторних робіт можливе на персональних комп'ютерах, мобільних пристроях та у веб-браузері без необхідності встановлення програмного забезпечення на пристрій користувача.

На рис.2 представлений фрагмент екрана, що демонструє віртуальну лабораторію у веб-браузері, яка забезпечує повноцінну апаратну підтримку 3D графіки на основі стандарту HTML5 та технології WebGL.

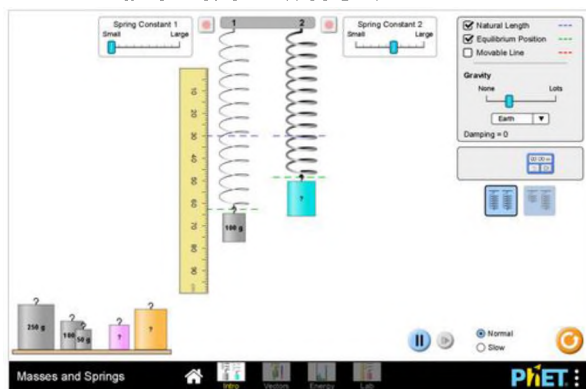


Рис 1. Проект PhET Interactive Simulations



Рис 2. Лабораторний практикум класичної термодинаміки

На сайті Math And Physics Applets [10] (рис 3) пропонується великий вибір фізичних і математичних симуляцій. Існує також досить вичерпна пояснювальна інформація про науку та обчислення, що стоять за дослідями, реалізованими у додатках. Самі додатки досить малі та швидко завантажуються, але мають дуже широке охоплення тем. Вони написані на мові програмування Java, але здебільшого їх перетворено на Javascript.

Віртуальна лабораторія [13] (рис 4), дає змогу проводити практичні експерименти з жорстким маятником. Разом із матеріалом, представленим у лекційній аудиторії, можна вивчити ос-

новні питання, такі як гармонічний осцилятор і резонанс, а також складні теми, такі як параметричний резонанс, нелінійна динаміка та хаос. Лабораторна установка реалізована на мові HTML/Java, отже має працювати у будь-якому веб-браузері, що підтримує Java.

Лабораторні стенди побудовані наступним чином. У центрі вікна знаходиться область анімації, де показано рух маятника. Зліва в області параметрів можна змінити різні параметри. У зоні вимірювання доступний секундомір або осцилограф для вимірювання певних властивостей системи. Область параметрів показує панелі керування кількома параметрами. Кожна панель показує свою назву разом із її фізичними одиницями.

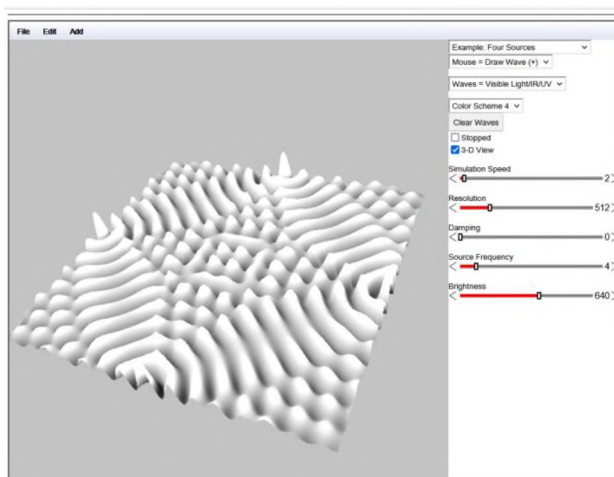


Рис 3. Фізична симуляція з сайту Math And Physics Applets

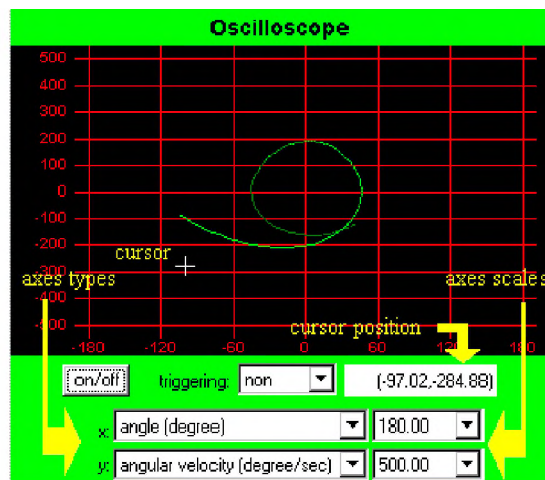


Рис 4. Практичні експерименти з жорстким маятником

У результаті проведено аналізу відомих прикладів реалізації віртуальних лабораторій встановлено, що основним засобом реалізації віртуальних лабораторних практикумів у світі на сьогодні є створення браузерних аплетів на основі мови Java, Javascript, HTML5.

Постановка задачі. Метою статті є розробка віртуальних лабораторних стендів для реалізації практичної підготовки здобувачів вищої освіти при плануванні та проведенні наукових досліджень.

Викладення матеріалу та результати досліджень. Використовуючи методику створення віртуальних лабораторних стендів при підготовці фахівців з галузевого машинобудування, наведену у статті [3], розроблено віртуальну лабораторію, що налічує 6 стендів, для вивчення дисципліни «Методи планування та проведення наукових досліджень гірничого устаткування» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 133 Галузеве машинобудування.

Структура дисципліни з використанням віртуальних стендів наведена у вигляді схеми (рис. 5), запропонованої у статті [3]. У навчальних 14 темах розкриваються основні положення теорії планування експериментів, згідно [1, 2, 7, 8], які потім закріплюються при виконанні 8 практичних робіт. Теми практичних робіт підібрано таким чином, щоб здобувачі краще засвоїли теоретичний матеріал з ключових напрямів теорії планування експериментальних досліджень, забезпечуючи певну різноманітність для підвищення зацікавленості та підтримки вивчення дисципліни, а також урахуванням рівня підготовки самих здобувачів.

Як видно з рис. 5, практично усі віртуальні стенди використовуються для окремих практичних робіт, а один – для двох робіт.

Віртуальні стенди пошукового характеру використовуються у практичних роботах для визначення невідомих залежностей, у ході яких здобувач власноруч повинен спланувати і провести експеримент, обробити отримані дані та визначити невідому залежність між вхідними та вихідними параметрами.

Центральним елементом таких стендів для пошукових робіт є закладені у них математичної моделі досліджуваного процесу. Розглянемо покладені в основі віртуальних стендів математичні моделі:

стенд 1 для проведення попередніх досліджень

$$Y(x_1) = 750 \cdot RND() + 750 \cdot x_1; \quad (1)$$

стенд 2 для проведення повнофакторного експерименту

$$Y(x_1, x_2, x_3) = 25 + 75 \cdot RND() + 75 \cdot x_1 + 45 \cdot x_2 - 65 \cdot x_3 + 12 \cdot x_1 \cdot x_2 + 22 \cdot x_1 \cdot x_3 - 5 \cdot x_2 \cdot x_3; \quad (2)$$

стенд 3 для побудови дробових планів експерименту

$$Y(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = 28 + 75 \cdot RND() + 75 \cdot x_1 + 45 \cdot x_2 - 65 \cdot x_3 - 38 \cdot x_4 - 61 \cdot x_5. \quad (3)$$

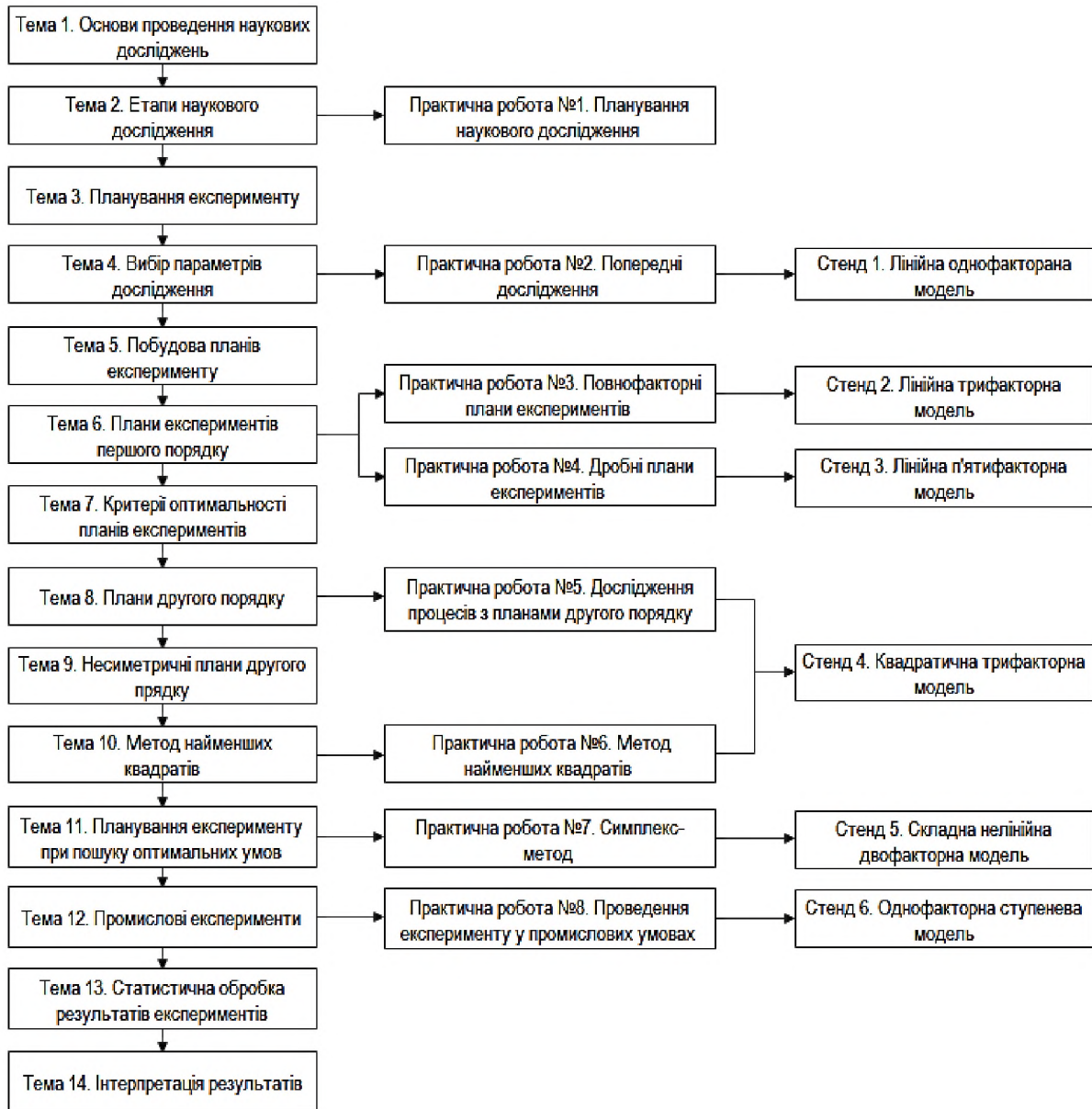


Рис 5. Структурна схема дисципліни

стенд 4 для побудови планів другого порядку та використання методу найменших квадратів

$$Y(x_1, x_2, x_3) = 28 + 75 \cdot RND() + 75 \cdot x_1 + 45 \cdot x_2 - 65 \cdot x_3 + 15 \cdot x_1^2 - 25 \cdot x_2^2 + 12 \cdot x_3^2 + 12 \cdot x_1 \cdot x_2 + 22 \cdot x_1 \cdot x_3 - 75 \cdot x_2 \cdot x_3 \quad (4)$$

стенд 5 для проведення досліджень при пошуку оптимальних умов

$$Y(x_1, x_2, x_3) = 3 \cdot (1 - x_2)^2 \cdot e^{-x_1^2 - (x_2 + 1)^2} - 10 \cdot \left(\frac{x_1}{5} - x_1^2 - x_2^5 \right) \cdot e^{-x_1^2 - x_2^2} - 3 \cdot e^{-x_2^2 - (x_1 + 1)^2} + 0,5 \cdot (2 \cdot x_1 + x_2) \quad (5)$$

стенд 6 для проведення експерименту у промислових умовах

$$x_1 = 10 \cdot RND(); \quad Y(x_1) = a \cdot x_1^b; \quad a \in [-5; 5]; \quad b \in [-1; 2] \quad (6)$$

де $RND()$ – функція, що повертає випадкові числа від 0 до 1.

У перших чотирьох стендах використовуються найбільш поширений вид математичних моделей – алгебраїчні поліноми, які є відрізками ступеневих рядів Тейлора. Додатково у ці математичні моделі додано генератор випадкових чисел для імітації похибки приладів та вимірювання. Це забезпечує унікальність результатів для кожного здобувача.

Для п'ятого стенду, який не має генератора випадкових чисел, використовується складна нелінійна модель, що має декілька локальних максимумів та мінімумів. Результат, що отримує здобувач буде залежати від початкової точки, з якої буде розпочато пошук екстремуму, довільно обраної здобувачем. Це також забезпечить унікальність результатів кожного здобувача.

Шостий стенд моделює промислові умови проведення експерименту, тобто пасивний експеримент, у ході якого дослідник просто збирає значення вхідних та, відповідних їм, вихідних сигналів, не впливаючи на процес. Тут використовується ступенева математична модель, яка залежно від значень коефіцієнтів a і b , підібраних певним чином для кожного варіанту, може дати досить різноманітні результати.

Для реалізації віртуальних стендів обрано Освітній портал КНУ, який базується на системі модульного об'єктно-орієнтованого динамічного навчального середовища Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment), яка є потужною системою управління навчанням (LMS), системою управління курсами (CMS), віртуальним навчальним середовищем (VLE) [5]. Вона надає викладачам, здобувачам та адміністраторам дуже розвинутий набір інструментів для комп'ютеризованого навчання. Слід окремо зазначити, що усі навчальні матеріали, розміщені на Освітньому порталі КНУ, доступні на різних пристроях таких як комп'ютери, планшети і смартфони, тобто забезпечено мультиплатформений доступ.

До того ж система Moodle надає можливість використання окремих модулів, створених користувачами з використанням мови програмування JavaScript.

Перша версія віртуальних стендів мала мінімалістичний дизайн і функціонал та була написана на мові програмування JavaScript. Приклад такого інтерфейсу віртуального стенду №2 для лінійної трифакторної моделі наведено на рис 6.

Експериментальний стенд №2



X1:

X2:

X3:

Y

Рис 6. Приклад мінімалістичного дизайну інтерфейсу віртуального стенду

Віртуальний лабораторний практикум отримав схвальні відгуки від здобувачів, які проходили курс. Це підштовхнуло до подальшого розвитку й удосконалення цього практикуму.

Наступним кроком удосконалення віртуальних стендів стала розробка прийнятного зовнішнього виду, що нагадував би лицьові панелі контрольно-вимірювальної апаратури. У ході поліпшення зовнішнього виду стендів було перероблено інтерфейс, а саме способи введення вихідних даних, одержання результатів та зовнішній вид приладів. Для цього було застосовано спеціальне програмне забезпечення Articulate Storyline 3 Demo, яке є одним з найпопулярніших інструментів для створення електронних навчальних матеріалів, що відрізняється високою якістю готових навчальних матеріалів [6]. До речі, ця система також підтримує мову програмування JavaScript, а готовий проект можна легко завантажити у середовище Moodle (рис 7).

Додатково було розроблено методичне забезпечення проведення практичних робіт, що включало в себе опис роботи з віртуальними стендами, хід роботи та обробка результатів експерименту.

Після аналізу навчальних компонентів другого та третього освітньо-наукових рівнів вищої освіти, було встановлено, що деякі з розроблених віртуальних стендів можуть бути застосовані в інших навчальних компонентах. Так, наприклад, стенд №2 може бути застосовано при вивченні дисципліни «Моделювання та оптимізація параметрів гірничих машин» другого (магістерського) освітньо-наукового рівня вищої освіти.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Використовуючи методику створення віртуальних лабораторних стендів при підготовці фахівців з галузевого машинобудування, розроблено віртуальний лабораторний практикум, що налічує 6 стендів, для вивчення дисципліни «Методи планування та проведення наукових досліджень гірничого устаткування» для здобувачів третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти спеціальності 133 Галузеве машинобудування. У стендах використовуються алгебраїчні поліноми, які є відрізками ступеневих рядів Тейлора та складні нелінійні моделі. Самі стенди реалізовано на Освітньому порталі КНУ, який базується на системі модульного об'єктно-орієнтованого динамічного навчального середовища Moodle.

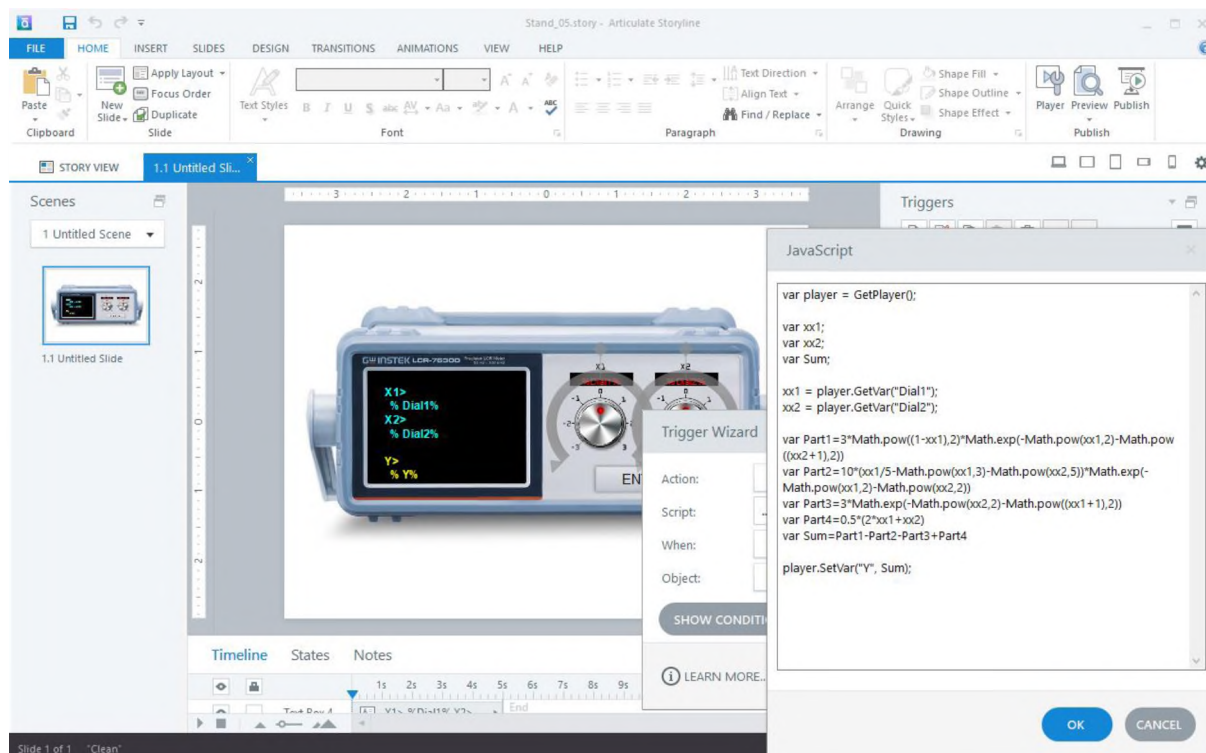


Рис. 7. Створення віртуального стенду в програмі Articulate Storyline 3 Demo

Віртуальний лабораторний практикум отримав схвальні відгуки від здобувачів, які проходили курс, що дає привід подальшого розвитку цього напрямку.

Список літератури

1. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий.-М.: Изд-во «Наука», 1971.-286 с.
2. Гальченко В.Г., Гладкова Т.А., Берестнева О.Г. Планирование и обработка результатов эксперимента: учебное пособие / В.Г. Гальченко, Т.А. Гладкова, О.Г.Берестнева; Томский политехнический университет.-Томск: Изд-во Томского политехнического университета,2014.-83 с.
3. Горбачов Ю.Г. Методика створення віртуальних лабораторних стендів при підготовці фахівців з галузевого машинобудування / Ю.Г. Горбачов, А.О. Хруцький, А.С. Громадський, В.А. Громадський, О.С.Ліфенцов // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2022. – Вип. 55. – С. 70–76
4. Интерактивная лаборатория термодинамики как эффективное средство имитационного обучения. URL: <https://habr.com/ru/articles/470011/>
5. Що take Moodle. URL: <https://moodle.org/mod/page/view.php?id=8174>
6. Articulate 360. URL: <https://articulate.com/360/teams#resource-menu>
7. D.R. Cox. Planning of Experiments.- Wiley-Interscience; First Edition (August 4, 1992) 320 pg
8. H. Scott Fogler. Elements of Chemical Reaction Engineering (Prentice Hall International Series in the Physical and Chemical Engineering Sciences) 5th Edition. Published by Pearson, 2021.-1080 pg.
9. Interactive Simulations for Science and Math. URL: <https://phet.colorado.edu/>
10. Math And Physics Applets. URL: <http://www.falstad.com/mathphysics.html>
11. Sriadhi Sriadhi, Abdul Hamid, Restu Restu. Web-Based Virtual Laboratory Development for Basic Practicum in Science and Technology // TEM Journal, 2022.- Volume 11.- Issue 1, pp 396-402.
12. Software Tools for Academics and Researchers. URL: <http://star.mit.edu/>
13. The Pendulum Lab. URL: <https://www.elmer.unibas.ch/pendulum/index.html>

14. Virtual Laboratory: An Alternative Method of Practicum Learning in Higher Education during the Covid-19 Pandemic / Abd. Qadir Muslim1, Hernawan, Erlita Cahyasari, Muhammad Adip Fanani // Journal of Education Technology, 2022.- Volume 6.- Number 2.- pp. 226-236

15. Virtual Laboratory for Online Practicum Learning/ Sri Subekti, A. Ana, Cica Yulia, Nia Lestari, Muktiarni, Indah Khoerunnisa, Asep Maosul // Journal of Engineering Education Transformations, 2022.- Volume: 35.- Issue: Special Issue 2.- pp 116-123

Рукопис подано до редакції 23.05.2023

УДК 622.1:528.7

О. В. ДОЛГІХ, Л. В. ДОЛГІХ, кандидати техн. наук, доценти
Криворізький технічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЦИФРОВИХ ЗЙОМОК ПРИ ДОСЛІДЖЕННІ ЗОНИ ЗРУШЕНЬ ВІД ШАХТИ ІМ. КОЛАЧЕВСЬКОГО

Метою досліджень є розробка ефективного способу спостереження за деформаціями денної поверхні та спорудами, розташованими в зоні впливу підземних гірничих робіт та на прилеглих територіях, використовуючи для цього методи цифрової фотограмметрії, яка ґрунтується на отриманні даних про об'єкт на деякій відстані від нього.

Методика досліджень ґрунтується на даних аналізу результатів експериментальних робіт на об'єктах відкритої та підземної розробки корисних копалин. В результаті досліджень деформацій на територіях шахти та кар'єру була використана методика, яка включає такі методи, як спостереження, вимірювання, обчислення, експеримент, порівняння тощо. При цьому було використано різні цифрові камери з відповідними їм характеристиками.

Результатом дослідження є удосконалення методики виконання знімальних робіт на об'єктах гірничодобувних підприємств, з метою дослідження горизонтальних та вертикальних деформацій, використовуючи для цього результати опрацювання аеро- та наземних цифрових знімків, отриманих відповідно з БПЛА та з земної поверхні. Встановлено, що для виконання цифрової зйомки необхідно попередньо дослідити відповідність характеристик цифрової камери вимогам, що ставляться до геометричних властивостей отриманих нею знімків, що впливає на точність визначення деформацій.

Наукова новизна результатів дослідження полягає в отриманні з необхідною точністю величин деформацій денної поверхні та об'єктів, розташованих на ній, завдяки запропонованій методиці виконання знімальних робіт та суворому фотограмметричному опрацюванню знімків, отриманих за результатами як аеро- та наземного знімання. Аналіз цифрових знімальних камер дозволяє зробити вибір камери, яка, завдяки своїм характеристикам, дозволяє підвищити точність пущаних величин.

Практична значимість виконаних досліджень полягає в отриманні горизонтальних та вертикальних деформацій за результатами опрацювання растрових зображень, отриманих цифровими камерами, встановленими на БПЛА чи при зніманні з «руки» з земної поверхні. За опрацьованими цифровими знімками, можна виявляти зміни, які відбулися за проміжок часу між спостереженнями, та планувати чи уточнювати розміщення на земній поверхні профільних ліній та додаткових реперів, а також визначати величини деформацій. Запропоноване фарбування у відповідні кольори пущаних величин деформацій, дозволяє наочно представляти розподіл їх по досліджуваній ділянці.

Ключові слова: цифрова зйомка, камери, деформації, зображення, гірничі об'єкти

Проблема і її зв'язок з науковими та практичними задачами. Останнім часом, використовуючи для зйомок гірничих виробок сучасні цифрові камери та легкі носії для них, актуальним питанням є дослідження точності вирішення задач маркшейдерського забезпечення за отриманими зображеннями за допомогою сучасних камер та носіїв. Відомо, що на точність даних, отриманих за результатами опрацювання цифрових знімків, впливає ряд факторів [1,2]. Серед інших факторів, важливим є якість зображення, тобто висока роздільна здатність, відсутність різного роду спотворень тощо. Питанню підвищення ефективності маркшейдерського забезпечення відкритих та підземних розробок корисних копалин за рахунок впровадження у виробництво новітніх наукових досягнень, присвячена достатня кількість робіт вітчизняних та зарубіжних вчених.

Аналіз досліджень та публікацій. Сучасні тенденції в маркшейдерській справі та в гірничій галузі у цілому пов'язані з впровадженням у виробництво інноваційних технологій і процесів [3-6]. Головною тенденцією є цифровізація всіх процесів і робіт. Цьому сприяє використання супутникових технологій, електронних та лазерних приладів для виконання вимірів, цифро-

вих камер та БПЛА для зйомочних робіт, сучасних комп'ютерних технологій для опрацювання даних тощо [7]. Новітні технології дозволяють скоротити витрати на устаткування, так як інколи один сучасний прилад дозволяє замінити декілька застарілих. Крім цього вони дозволяють зменшити кількість виконавців робіт та час виконання робіт, скоротити кількість простоїв та аварій на гірничому підприємстві, підвищити безпеку працівників.

Постановка задачі. На маркшейдерську службу гірничого підприємства покладено відповідальність за достовірність та точність даних, які використовуються для проектування та ведення гірничих робіт. Впроваджуючи нові технології у виробничий процес, маркшейдер повинен бути впевненим в їх ефективності. На сучасному етапі значна увага приділяється використанню цифрових зйомок для таких об'єктів як: кар'єри, розрізи, відвали пустих порід, хвостосховища тощо. Для досягнення необхідної точності цифрової зйомки, важливим є вірний вибір знімальної камери та методики виконання знімальних робіт в певних умовах.

Викладення матеріалу та результати. Для підвищення ефективності маркшейдерського забезпечення гірничих робіт використовуються новітні технології при виконанні вимірювальних, обчислювальних та графічних робіт. Для зйомок широко використовуються методи цифрової фотограмметрії.

З появою таких камер, як Canon D30 та D60, розпочалося масове їх використання для знімальних робіт у різних галузях. В роботі розглянута не вся лінійка цифрових камер, а тільки ті моделі, які застосовувались чи могли би застосовуватись у фотограмметрії. З 2005 року по теперішній час при складанні маркшейдерських планів та при дослідженнях за процесом зсуву земної поверхні в зоні впливу гірничих робіт шахти ім. Колачевського ПрАТ «ЦГЗК» кафедру маркшейдерії КНУ використовувалися цифрові камери (рис. 1).



Рис. 1. Використання камер Canon на об'єктах гірничодобувних підприємств

Дослідження можливості виконання цифрових зйомок об'єктів гірничодобувних підприємств були розпочаті з використання для цього моделі Canon EOS350D, яка на 2005 рік була безперечним лідером та у поєднанні з 50-міліметровим об'єктивом Canon EF 50mm 1:1.8II задовольняла вимогам до точності побудови маркшейдерських планів. Це посприяло використанню цієї камери для наземного стереознімання на кар'єрі Інгалецького ГЗК. Зйомка за допомогою камери Canon EOS350D виконувалася, як зі штатива, так і «з руки». План складався з використанням вітчизняної програми DigitalS. На цей час фотографічна зйомка конкурувала з цифровою, і цей період можна назвати перехідним, коли одночасно використовувалися фотографічні та цифрові камери. Але фотографічна зйомка при достатньо високому розрізненні характеризувалася низькою оперативністю через необхідність попереднього опрацювання отриманих зображень на спеціальних сканерах, наприклад Delta Scan.

Майже через кілька років параметри камери Canon EOS350D значно застаріли. Здійснювалася стрімка еволюція CMOS-матриць, яка призвела до появи 18-ти та 23-х мегапіксельних матриць. Останнім часом спостерігається суттєве збільшення кількості пікселів матриці (кожні 2-3 роки), змінюється розмір матриці, вдосконалюється систем фокусування, що впливає на підвищення якості знімків, зменшення шумів зображення, особливо при недостатньому освітленні об'єктів зйомки. В табл. 1 продемонстровано поліпшення характеристик камер, а саме збільшення кількості пікселів матриці, на прикладі камер одного класу.

У 2018 році, у рамках НДР, зйомки укосу на території шахти ім. Колачевського, виконувалися цифровою камерою Canon 1200D, основними характеристиками якої є: CMOS-матриця з 17,9 млн пікселів (5184×3456) та розміром 22,3×14,9 мм; з коефіцієнтом crop factor $K_F = 1,6$ (коефіцієнт, що характеризує зменшення поля зору відповідно до параметрів матриці повного кадру з розмірами 24×36мм); процесор DIGIC 4; байонет EF і EF-S тощо.

Перехід від камери Canon EOS350D до Canon 1200D характеризується збільшенням кількості пікселів матриці, і відповідно – підвищенням детальності зображення. Перехід до цифрово-

го способу опрацювання знімків дозволяє обробляти їх більшу кількість, що характерно для сучасних зйомок. Але камера Canon 1200D не має GPS-модуля для прив'язки знімків. З цієї причини було здійснено перехід до використання камери Canon 750D, в якій є можливість використання GPS-ресиверу GP-E2. На ринку нашої країни дана модель з'явилася у 2015 році, у 2019 році камера Canon 750D була використана при фотограмметричному зніманні укосу в зоні зсуву земної поверхні на території шахти ім. Колачевського ПрАТ «ЦГЗК».

Таблиця 1

Збільшення кількості пікселів в матрицях камер

Камери к кроп-фактором 1,6	Рік виходу моделі	Кількість мегапікселів
Canon 1100D	2011	12,2
Canon 1200D	2014	17,9
Повнокадровий сегмент		
5D Mark II	2008	21,1
5D Mark III	2012	22,3
Професійний сегмент		
EOS-1D Mark IV	2009	16
EOS-1D X	2012	17,9

Камера Canon 750D має CMOS-матрицю з 24 млн пікселів (6000×4000) розміром 22,3×14,9 мм і коефіцієнтом crop factor $K_f = 1,6$. Ця камера має процесор DIGIC 6 та байонет EF і EF-S.

Використання додаткового програмного забезпечення дозволило в режимі пост обробки присвоювати знімкам відповідні координати, записані в пам'яті ресивер. Тому при виконанні зйомок за допомогою цієї камери, важливо здійснювати синхронізацію поточного часу з часом Інтернету.

Використання камери Canon 750D дозволило підвищити якість знімків, чому сприяло підвищення кількості пікселів матриці та інноваційна система фокусування. Але через недолік цієї камери, пов'язаний з незручністю деяких програмних продуктів, які здійснюють перерахування фокусної відстані у еквівалент повного кадру, з 2020 року фотограмметрична зйомка виконується повнокадровою цифровою камерою Canon EOS 6D Mark II.

Слід відзначити, що параметрами цифрової камери Canon EOS 6D Mark II є: CMOS-матриця з 26,2 млн пікселів (6240 x 4160); розмір кадру 36,0x24,0 мм; коефіцієнт crop factor $K_f = 1$. Камера має процесор DIGIC 7 та Байонет EF; вбудований GPS-приймач з підтримкою бездротових мереж Wi-Fi, Bluetooth и технології NFC (табл. 2).

Таблиця 2

Характеристики камер

	Canon EOS350D	Canon 1200D	Canon 750D	Canon EOS 6D Mark II
CMOS-матриця, мпкс.	8	17,9	24	26,6
Розмір матриці, мм	22,2 x 14,8	22,3 x 14,9	22,3 x 14,9	36,0 x 24,0
Процесор	DIGIC II	DIGIC 4	DIGIC 6	DIGIC 7
K_f	1,62	1,6	1,6	1
Додаткові функції	-	-	Можливість роботи з виносним GPS	Вбудований GPS, Wi-Fi, Bluetooth, NFC.

Аналіз знімальних робіт з використанням цифрових камер, показав перспективність цього напрямку підвищення ефективності маркшейдерському забезпеченні гірничих робіт. За результатами аналізу встановлено, що для виконання фотограмметричного знімання можуть використовуватися камери: Canon EOS 90D з кроп-фактором 1,6 та 32,5 мегапіксельною матрицею (модель 2019 року); Canon EOS-1D X Mark III з 20,1 мегапіксельною матрицею та з 191 зоною фокусування; Canon EOS 5D Mark IV з 31,7 мегапіксельною матрицею, яка здатна значно підвищити детальність знімків. Але проблеми якості знімків гірничих виробок, отриманими вище наведеними камери, до кінця не вирішені. На сьогодні фірми Canon, Sony та інші випускають і бездзеркальні цифрові камери з вищою кількістю пікселів: Canon EOS R5 (47,1 мегапікселів), Nikon Z7 (46,9 мегапікселів).

Внаслідок відпрацювання покладу залізистих руд «Південно-магнетитова» шахтою ім. Колачевського, на земній поверхні утворюється муляда зсуву, з'являються зони тріщин та терас, проваль та вивв. Вимоги до виконання спостережень регламентуються відповідними докумен-

тами [8] та [9,10], які ґрунтуються на багаторічному досвіді інструментальних спостережень за деформаціями земної поверхні та дослідження мультиспектральної зсуву і критичних деформацій.

Маркшейдерська служба гірничодобувного підприємства здійснює постійний моніторинг деформацій, яких зазнає земна поверхня та споруди, розташовані на ній, і які спричинені підземними гірничими роботами. На теперішній час спеціалісти комбінату мають можливість досліджувати такі ділянки за допомогою растрових зображень, отриманих за результатами аерофотознімання (рис. 2).

За растровими зображеннями можна виявити зміни, які відбулися за проміжок часу між аерозніманнями (рис. 2), але для отримання метричних характеристик деформаційних процесів необхідно виконати фотограмметричне опрацювання цих зображень.

Відомо, що знімання кар'єрів, відвалів та промислових майданів методом сканування не має широкого застосування через високі ціни на обладнання та складність організації робіт, а більш поширеними є наземне стереознімання та з використанням БПЛА. Фотограмметрична обробка отриманих при цьому знімків може здійснюватися за допомогою вітчизняних чи зарубіжних програм. Відповідно до договору з ПрАТ «ЦГЗК», було отримано знімки на зону зрушень за допомогою безпілотного літального апарату, та виконане їх фотограмметричне опрацювання.

Виконані дослідження дозволяють отримати достатньо повну інформацію про розвиток процесу деформацій в зонах терас та вирв, та про стан утворених пустот (ведення кадастру пустот).

Шахтою у 2021-2022 рр. виконані роботи з видобутку руди на поверсі гор.527/447м, виконанні гірничопідготовчі роботи та проходка нарізних виробок на поверххах гор.607/527м та гор.527/447м.



Рис. 2. Растрові зображення досліджуваної ділянки

Гірничі роботи з видобутку магнетитових кварцитів велися у блоках: $(-19) \div (-26)$ вісі, $(-26) \div (-34)$ вісі, $(-32) \div (-40)$ вісі, та $(-46) \div (-53)$ вісі висячого боку. Готуються до очисного виймання запаси блоку $(-46) \div (-53)$ вісі в/б у поверсі гор.527/387м. Планом розвитку гірничих робіт шахти ім. Колачевського на 2021-2022 рр. було передбачено відпрацювання 10 елементів блоків покладу «Південний-Магнетитовий». При цьому, з часом відбувається заповнення відпрацьованого простору за рахунок обвалення, прогину порід висячого боку.

Для дослідження стану ділянки (рис. 2) була виконана аерофотозйомка за допомогою БПЛА ПрАТ «ЦГЗК» з наступною її обробкою фахівцями КНУ. Також кафедрою маркшейдерії КНУ виконана наземна стереозйомка цієї ділянки території шахти ім. Колачевського, за результатами опрацювання якої отримані характеристики деформаційних процесів в зоні вирв, що дозволяє контролювати процес заповнення пустот та визначати їх об'єми з врахуванням коефіцієнту розпушення [8,9].

Для наочності, дані про стан досліджуваної поверхні, були представлені різними кольорами. На рис. 3 наведені результати дослідження стану поверхні за результатами обробки матеріалів аерознімання, переданих ПрАТ «ЦГЗК» спеціалістам КНУ. На рис. 4 наведено характерис-

тику поверхні, отриману за результатами наземного знімання. При виконанні цих робіт для прив'язки знімків було використано GPS, а для зйомки 24-мегапіксельна камера. Зйомка виконана з віддалення 600-700 метрів.

Слід підкреслити, що суворе фотограмметричне опрацювання знімків, отриманих за результатами як аеро- та наземного знімання, дозволяє суттєво підвищити точність шуканих даних, які дозволяють планувати та уточнювати розміщення на земній поверхні профільних ліній та додаткових реперів, а також визначати величини деформацій, які зазнає поверхня. Наприклад, зафіксоване положення репера та зображене відповідним кольором (5/7, профільної лінії 2) може свідчити про можливі деформації денної поверхні у майбутньому.

Запропонована методика моніторингу денної поверхні була досліджена на таких об'єктах, як територія шахті ім. Колачевського та південний борт кар'єру № 4 ПрАТ «ЦГЗК». Впровадження методики здійснено в рамках договору на виконання НДР з ПрАТ «ЦГЗК».

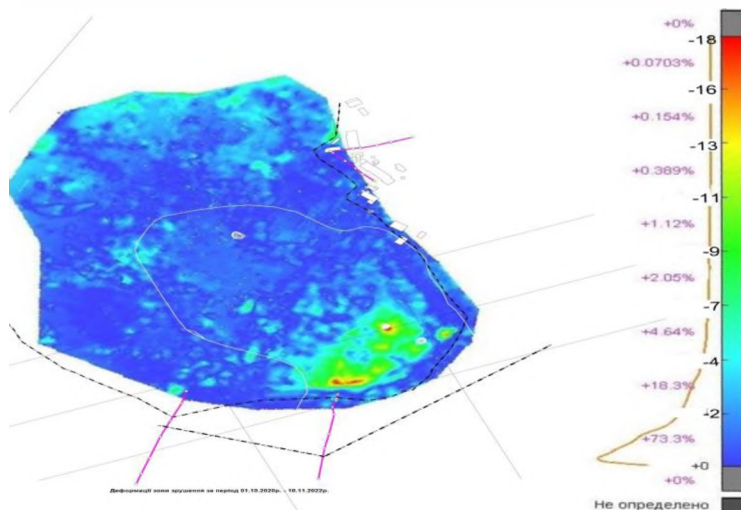


Рис. 3. Результати дослідження стану поверхні за результатами обробки матеріалів аерознімання

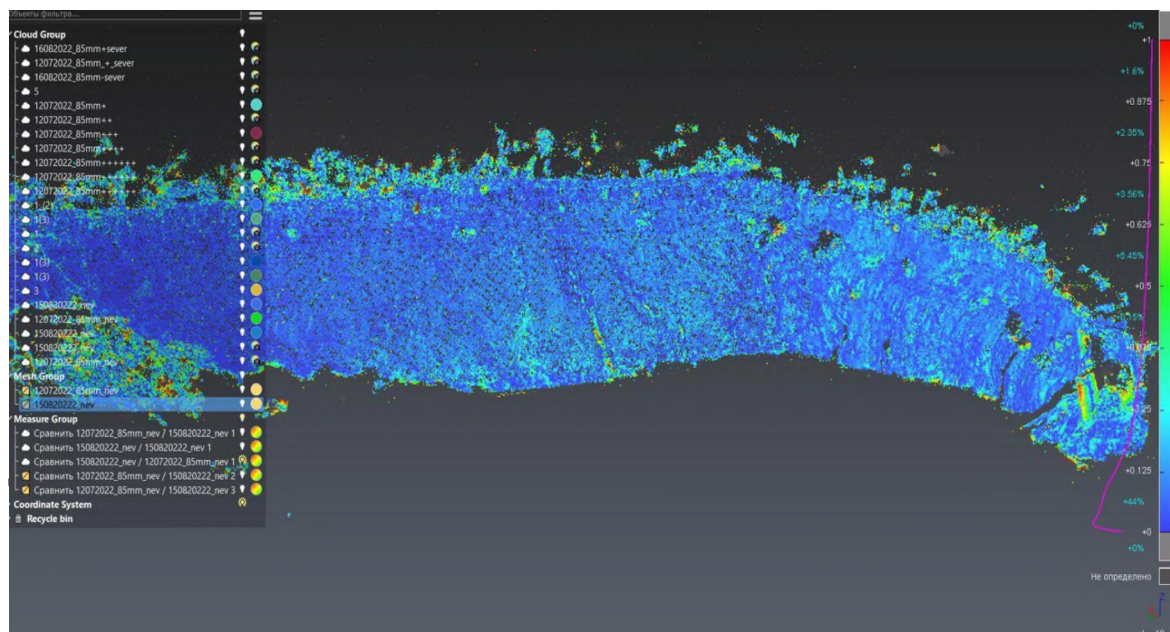


Рис. 4. Характеристика поверхні, отримана за результатами наземного знімання

Висновки та напрям подальших досліджень. Дослідження способів спостереження за зсувними процесами направлені на їх удосконалення та підвищення ефективності робіт зі своєчасного прийняття засобів з охорони навколишнього середовища та розробки достовірного прогнозу подальшого стану досліджуваних об'єктів, на стан яких впливають гірничі роботи. При цьому, одним з важливих напрямків є удосконалення зйомочних робіт, які, з огляду на ха-

рактеристики цих об'єктів, повинні бути переважно дистанційними, тобто безпечними. Тому доцільним є подальше дослідження використання цифрових зйомок в гірництві, так як цифрові технології стрімко розвиваються, що дозволяє удосконалювати маркшейдерське забезпечувати.

Список літератури

1. Yao H., Qin R., Chen X. Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications - A review Remote Sens., 11 (12) (2019), p. 1443
2. Yuda M., Xiangjun Z., Weiming S., Shaofeng L. Target accurate positioning based on the point cloud created by stereo vision 2016 23rd International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice, M2VIP, IEEE (2016), pp. 1-5
3. Rysbekov K., Huayang D., Kalybekov T., Sandybekov M., Idrissov K., Zhakypbek Y. Bakhmagambetova G., Application features of the surface laser scanning technology when solving the main tasks of surveying support for reclamation. Mining of Mineral Deposits. 2019, 13(3):40-48. <https://doi.org/10.33271/mining13.03.040>
4. Choquet, P., Taylor, R.M., and Byerley, C. Payback of automated geotechnical instrumentation monitoring for open pit mines as compared to manual data collection. In Proceedings of the CIM Conference 2016, Vancouver.
5. Dolgikh O., Dolgikh L., Ilezov K., Maletskii N. The use of the construction with a digital camera and GPS receiver while researching dangerous areas. E3S Web of Conferences 280, 08009 (2021). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128008009>
6. Kalinichenko V., Dolgikh O., Dolgikh L., Pysmennyi S. Choosing a camera for mine surveying of mining enterprise facilities using unmanned aerial vehicles. Mining of Mineral Deposits. (2020). 14(4), 31-39. <https://doi.org/10.33271/mining14.04.031>
7. Kalinichenko V., Dolgikh O., Dolgikh L. Digital survey in studying open pit wall deformations. E3S Web of Conferences 123, 0 (2019) Ukrainian School of Mining Engineering - 2019 1047 <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301047>
8. Инструкция по наблюдениям за сдвижением горных пород и земной поверхности при подземной разработке рудных месторождений. М.: Недра, 1988, - 112
9. Правила охраны сооружений и природных объектов от вредного влияния подземных горных работ в Криворожском железорудном бассейне. ЛВНИИ, 1975, - 68 с.
10. Правила виконання маркшейдерських робіт під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 06 липня 2021 року № 884/36506, - 112 с

Рукопис подано до редакції 23.05.2023

УДК 622.8

А.К. ГАЦЬКИЙ, канд. техн. наук, доц., І.А. ГАЦЬКИЙ, аспірант
Криворізький національний університет

СИНТЕЗ УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ В КАМЕРІ АВАРІЙНОГО ПОВІТРОПОСТАЧАННЯ

Стаття присвячена обґрунтуванню експериментальних досліджень параметрів стану мікроклімату, та як результат проведення синтезу управління мікроклімату в камері аварійного повітропостачання.

Метою цього дослідження є створення системи управління мікрокліматом в мобільній камері аварійного повітропостачання за для утворення нормальних санітарно-гігієнічних умов в негерметичній камері аварійного повітропостачання, шляхом реалізації стабілізації концентрації кисню та температури в повітрі.

Метод дослідження. При створенні системи управління мікрокліматом в КАПП використано статистичний метод завдяки якому доведена адекватність математичної моделі повітрообміну в робочій камері КАПП, також використано метод ступінчатого обурення та метод дії релейних керуючих впливів по концентрації кисню в повітрі та величині температури повітря на вході в камеру аварійного повітропостачання.

Наукова новизна отриманих результатів. На основі градієнтного (ступінчатого) методу синтезовано алгоритм управління повітрообміном та теплообміном в камері аварійного повітропостачання з метою створення оптимальних кліматичних умов для робітників. Шляхом експериментальних досліджень за допомогою статистичних методів доведена адекватність синтезу управління мікрокліматом в робочій камері КАПП, яка підтвердила гідродинамічну структуру близьку до ідеального перемішування повітря.

Практична цінність. Створення синтезу управління мікрокліматом в камері аварійного повітропостачання надасть можливість підтримки заданої концентрації кисню в повітрі камери аварійного повітропостачання із забезпеченням надлишкового тиску в КАПП та підтримки заданої температури повітря в камері, що надає належні умови перебування робітників в мобільній камері.

Результат. Доведена за допомогою експериментальних досліджень доцільність застосування підтримки мікроклімату в камері аварійного повітропостачання шляхом стабілізації, згідно вимог техніки безпеки концентрацій кисню у повітрі і температури повітря в камері аварійного повітропостачання, за рахунок дії релейних керуючих впли-

вів по концентрації кисню та величині температури повітря в КАПП, що дозволить підвищити рівень безпеки та нормалізації умов життєдіяльності робітників, які знаходяться в камері.

Ключові слова: камера аварійного повітропостачання, математичне моделювання, повітрообмін, теплообмін, структурний синтез, ідентифікація параметрів, мікроклімат, кисень, повітря, надлишковий тиск, залежність концентрації.

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Проблема полягає в тому що, під час проведення гірничих робіт в підземних виробках шахт відбувається порушення нормальних умов праці, яке інколи спричиняється аварією, що може призвести до загибелі робітників [1-3]. Для підвищення рівня безпеки під час ліквідацій аварій необхідні нові методи та впровадження, які знизять коефіцієнт частоти травмування та смертності робітників у підземних гірничих виробках [4]. Тому виникає завдання у розробці нових конструктивних рішень, заходів безпеки при виникненні аварій у вибоях гірничих виробок шахт та створення задовільних умов за рахунок синтезу управління мікрокліматом.

Для синтезу управління мікрокліматом потрібен час, за який об'єкт змінюється непередбачуваним чином, в результаті чого це управління вже приведе до бажаного результату. Ефективним способом боротьби з параметрами складного об'єкта управління є екстраполяція його поведінки. У цьому випадку управління здійснюється з випередженням, з урахуванням зміни об'єкта. Таким чином, що для побудови системи управління кліматом в КАПП необхідне проведення математичного моделювання процесів, які визначають цей мікроклімат [5].

Аналіз досліджень і публікацій. Нормалізація параметрів мікроклімату здійснюється за допомогою комплексу заходів та засобів колективного захисту, які включають будівельно-планувальні, організаційно-технологічні, санітарно-гігієнічні, технічні та інші [6]. Норми виробничого мікроклімату встановлені системою безпеки праці СанПіН 2.2.4.548-96. За ступенем впливу на самопочуття людини, його працездатність мікрокліматичні умови підрозділяються на оптимальні, допустимі, шкідливі і небезпечні. Оптимальні мікрокліматичні умови характеризуються такими параметрами показників мікроклімату, які при їх одночасному впливі на людину протягом робочої зміни забезпечують збереження теплового стану організму. У цих умовах напруга терморегуляції мінімально, загальні та/або локальні дискомфортні тепловідчуття відсутні, що є передумовою збереження високої працездатності.

Складовими системи вентиляції (повітропостачання) КАПП є повітрозабірні пристрої, протипилові фільтри, фільтри-поглиначі, вентилятори, розвідна мережа, повітрорегулювальні і захисні пристрої, а також при необхідності засоби регенерації, теплоємні фільтри (повітроохолоджувачі), фільтри для очищення повітря від окису вуглецю [7].

Система повітропостачання повинна забезпечувати осіб, що укриваються у КАПП, необхідною кількістю повітря відповідної температури, вологості і газового складу.

При випробуванні (перевірці) на герметичність застосовують метод виміру підпору повітря. Він полягає у вимірі різниці між надмірним тиском усередині КАПП (при працюючій системі повітропостачання) і шахтним. Надмірний тиск при подачі у приміщення визначеної кількості повітря створюється лише у тому випадку, коли немає більшого його витоку через нещільності та інші місця в огорожувальних конструкціях, тобто коли КАПП герметична.

Проте питання управління мікрокліматом в камері аварійного повітропостачання та його моделювання не підіймалось та не проводилось, в результаті чого не має ідеальної моделі (формули) функціонування мікроклімату в камері.

Постановка завдання. Головним завданням є визначити в експериментальних умовах ефективність нормалізації мікроклімату та управління його параметрами в камері аварійного повітропостачання. Розробити методику забезпечення нормальних умов перебування людей в негерметичній камері аварійного повітропостачання з використанням математичного моделювання процесів повітрообміну.

Викладення матеріалу та результати. Для побудови управління мікрокліматом в КАПП необхідно реалізація двох задач: підтримки заданої концентрації кисню в повітрі КАПП та забезпечення надлишкового тиску в КАПП.

Обидві задачі відносяться до задач стабілізації вибраних режимів. Перша задача, де реалізується стабілізація концентрації кисню в повітрі КАПП, обумовлена необхідністю створення

комфортних умов в робочій камері КАПП для людей, які опинилися в небезпеці під час гірничих робіт [8]. Звісно, що якість повітря, яке необхідно для підтримки життєвих процесів всіх живих організмів Землі, визначається вмістом у ньому кисню.

Вміст кисню в повітрі повинна знаходитися в межах 19,5% – 22,3%. Якщо вміст кисню в повітрі нижче $C_{\min} = 19,5\%$, то це буде дефіцит кисню або якщо вище $C_{\max} = 22,3\%$, то це є надлишок кисню. Враховуючи межі концентрації кисню в повітрі, можна припустити, що комфортною концентрацією кисню в повітрі буде середня величина

$$\bar{C} = \frac{C_{\min} + C_{\max}}{2} = \frac{19.5 + 22.3}{2} = 20.9\% . \quad (1)$$

Математичне моделювання повітрообміну в камері дозволило здобути формулу

$$C = C_0 + (C_n - C_0) \cdot e^{-\frac{0.154}{V} \tau} . \quad (2)$$

Формула (2) дає можливість визначити концентрацію кисню в повітрі КАПП (C) в залежності від початкової концентрації кисню в повітрі КАПП (C_n), ступінчастої дії концентрації кисню в повітрі КАПП (C_0), а також від робочого об'єму КАПП (V) і часу спостереження (τ). Треба підкреслити, що, як було знайдено в відповідних експериментах, об'ємна швидкість повітря в камері становила $v=0,154 \text{ м}^3/\text{хв.}$

В якості прикладу розглянута ситуація, яка представлена в (табл.1).

Таблиця 1

Залежність концентрації кисню в повітрі камери від часу спостереження

$C_0, \%$ $\tau, \text{хв}$	19.5	20	20.5	21
0	19	19	19	19
10	19.04	19.08	19.12	19.16
20	19.08	19.16	19.24	19.31
30	19.11	19.23	19.34	19.45
40	19.14	19.29	19.43	19.58
50	19.17	19.35	19.52	19.70
60	19.20	19.40	19.60	19.80
70	19.23	19.45	19.68	19.90
80	19.25	19.50	19.74	19.99
90	19.27	19.54	19.81	20.07
100	19.29	19.57	19.86	20.15
110	19.30	19.61	19.91	20.22
120	19.32	19.64	19.96	20.28

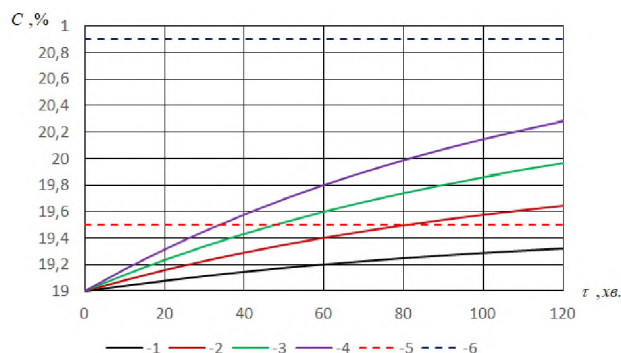
Згідно проведених розрахунків, вважалось, що в камері не було людей, тобто, $V=18 \text{ м}^3$ початкова концентрація кисню в повітрі камери становила $C_n = 19\%$. Таким чином, формула має вигляд

$$C = C_0 + (19 - C_0) \cdot e^{-8.556 \cdot 10^{-3} \tau} . \quad (3)$$

На (рис.1) представлено графічне зображення результатів, представлених в (табл.1). Аналіз даних (табл.1) і графіків, приведених на (рис.1), показує, що зі збільшенням часу спостереження концентрація кисню в повітрі камери зростає. При зростанні вхідної концентрації кисню з більшою швидкістю зростає також і концентрація кисню в повітрі камери. Мінімальну концентрацію кисню в повітрі, яка визначена червоною горизонтальною пунктирною лінією, графіки концентрації кисню в повітрі камери перетинають через 30–80 хвилин. Середній рівень концентрації кисню в повітрі, який визначений на (рис.1) синьою горизонтальною пунктирною лінією, не досягається за визначений час.

Рис.1. Графіки залежності концентрації кисню в камері залежно від часу спостереження при діях різних вхідних концентрацій кисню: 1- $C_0 = 19.5\%$; 2- $C_0 = 20\%$; 3- $C_0 = 20.5$; 4- $C_0 = 21\%$; 5- $C_{\min} = 19.5\%$; 6- $\bar{C} = 20.9\%$.

В (табл.2) представлені результати розрахунків залежності концентрації кисню в повітрі від часу спостереження для різної кількості людей в камері, при вхідній концентрації кисню $C_0=20,9\%$. Згідно даних (табл.2) на (рис.2) представлені відповідні графіки.



Таблиця 2

Залежність концентрації кисню в повітрі камери від часу спостереження для різної кількості людей в камері

n , людей τ , хв	0	2	4	6	8
0	19	19	19	19	19
10	19.16	19.17	19.20	19.23	19.27
20	19.30	19.33	19.38	19.43	19.50
30	19.43	19.48	19.53	19.61	19.70
40	19.55	19.61	19.68	19.76	19.87
50	19.66	19.73	19.80	19.90	20.02
60	19.76	19.83	19.92	20.02	20.15
70	19.86	19.93	20.02	20.13	20.25
80	19.94	20.02	20.11	20.22	20.35
90	20.02	20.10	20.19	20.30	20.42
100	20.09	20.17	20.27	20.37	20.49
110	20.16	20.24	20.33	20.44	20.55
120	20.22	20.30	20.39	20.49	20.60

C, %

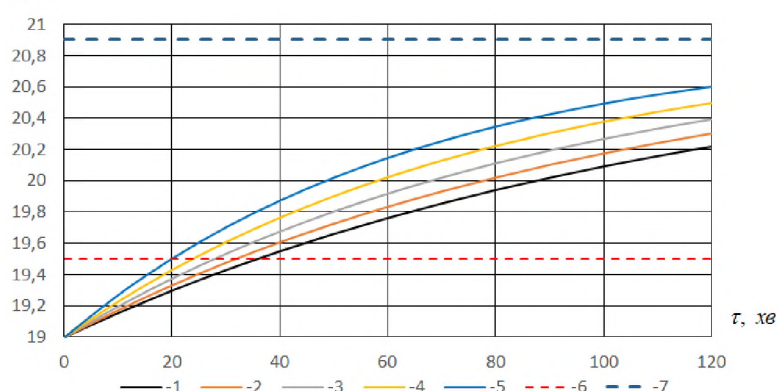


Рис.2. Графіки залежності концентрації кисню в камері залежно від часу спостереження для різної кількості людей в камері: 1- $n = 0$; 2- $n = 2$; 3- $n = 4$; 4- $n = 6$; 5- $n = 8$; 6- $n = 10$; $C_{\min} = 19.5\%$; $C_{\max} = 20.9\%$

Аналіз даних, приведених в (табл.2) і на (рис.2), показує, що із зростом часу спостереження концентрація кисню в камері зростає при різній наповненості камери людьми. Разом з цим при збільшенні кількості людей

в камері швидкість збільшення концентрації кисню в повітрі камери зростає, що пояснюється зменшенням вільного робочого об'єму камери. Важливо, що нижня межа концентрації кисню в повітрі, яка визначена горизонтальною пунктирною червоною лінією, перетинається через 10-20 хвилин. В свою чергу, середня межа концентрації кисню в повітрі, яка визначена горизонтальною пунктирною синьою лінією, досягається більш ніж за 120 хвилин.

Формула (2) дозволяє розрахувати величину керуючого впливу у вигляді ступінчастої функції по концентрації кисню у повітрі, який подається в камеру, з метою досягнення заданої концентрації кисню в повітрі камери за визначений час. Дійсно, розв'яжемо рівняння (2) відносно концентрації C_0 , розглядаючи її як керуючий вплив,

$$C_{\text{кв}} = \frac{C_{\text{зад}} - C_{\text{п}} \cdot e^{-\frac{0.154}{V} \tau_{\text{зад}}}}{1 - e^{-\frac{0.154}{V} \tau_{\text{зад}}}}, \quad (4)$$

де $C_{\text{зад}}$ – задана концентрація кисню в камері, %, $\tau_{\text{зад}}$ – заданий час досягнення $C_{\text{зад}}$, хв.

В якості прикладу було розглянуто алгоритм нанесення керуючих впливів по концентрації кисню в повітрі на вході камери, коли

$$V = 18 \text{ м}^3, C_{\text{п}} = 18\%, C_{\text{зад}} = 20.9\%, \tau_{\text{зад}} = 25 \text{ хв}, C_{\min} = 19.5\%, C_{\max} = 22.3\%. \quad (5)$$

Згідно формули (4) знаходимо, що величина керуючого впливу становить $C_{\text{кв}} = 33.1\%$. Разом з цим, враховуючи, що час спостереження становить 120 хв., а величина концентрації кисню в повітрі камери обмежена, тобто, згідно формули (1),

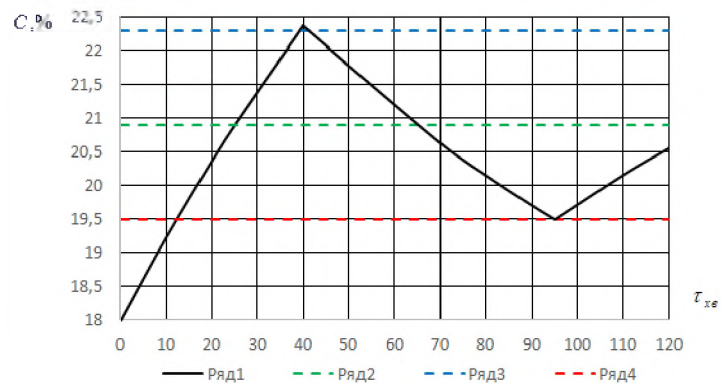
$$19.5\% \leq C \leq 22.3\%, \quad (6)$$

треба так обчислювати керуючі впливи по концентрації кисню в повітрі на вході камери, щоб виконувалась умова (6). Результати дії таких керуючих впливів показані на (рис.3).

На (рис.3) різнокольоровими пунктирними лініями показані обмеження, які накладаються на величину концентрації кисню в камері. Червона лінія відповідає нижній межі концентрації кисню в повітрі $C_{\min} = 19.5\%$, синя лінія – верхній межі концентрації кисню в повітрі $C_{\max} = 22.3\%$. Сенс керування полягає в тому, щоб, згідно інформації в рівності (5), через

$\tau_{\text{зад}} = 25$ хв концентрація кисню в повітрі камери стала $C_{\text{зад}} = 20.9\%$. Разом з цим, в подальшому концентрація кисню в повітрі камери продовжує зростати, досягаючи в момент часу $\tau = 40$ хв верхньої межі концентрації кисню $C_{\text{max}} = 22.3\%$. В цей момент часу наноситься управляюче керування по концентрації кисню, яке дорівнює $C_{\text{кв}} = 15\%$. В результаті концентрація кисню в повітрі камери буде зменшуватися, що підтверджує відповідна лінія на графіку (рис.3). В той момент часу, коли концентрація кисню в камері досягає мінімальної межі $C_{\text{min}} = 19.5\%$, наноситься управляюче керування по концентрації кисню $C_{\text{кв}} = 25\%$. В результаті концентрація кисню в повітрі камери почне зростати, що обмежується заданим часом $\tau = 120$ хв. Зрозуміло, що можлива й інша послідовність нанесення керуючих впливів по концентрації кисню у вхідному повітрі камери. Важливо підкреслити, що послідовність керуючих впливів носить релейний характер, в результаті чого зміна концентрації кисню в повітрі камери приймає «пилкоподібний» вигляд.

Рис.3. Графік зміни концентрації кисню в камері при дії керуючих впливів з метою стабілізації концентрації кисню в межах, визначених умовою (6)



Математичне моделювання повітрообміну в КАПП дозволило здобути формулу, яка визначає відносний приріст тиску повітря в камері в залежності від концентрації кисню в повітрі камери. При виведенні формули приймемо, що повітря складається із двох рідин – кисню і азоту.

Тоді масова доля цих рідин визначиться по формулам [9]

$$\omega_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2}, \quad \omega_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2}, \quad (7)$$

де m_1 – маса кисню, кг; m_2 – маса азоту, кг. В свою чергу масова концентрація кожної із них визначиться по формулам

$$C_1 = \frac{m_1}{V_1}, \quad C_2 = \frac{m_2}{V_2}, \quad (8)$$

де V_1 – об'єм кисню, м^3 , V_2 – об'єм азоту, м^3 . Оскільки в нашому випадку $V_1 = V_2 = V$, де V – об'єм камери, м^3 , то формула (8) приймає вигляд

$$C_1 = \frac{m_1}{V}, \quad C_2 = \frac{m_2}{V}. \quad (9)$$

Знайдемо зв'язок між двома видами концентрацій (масовій долі і масовій концентрації)

$$\omega_1 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} = \frac{\frac{m_1}{V}}{\frac{m_1}{V} + \frac{m_2}{V}} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}, \quad \omega_2 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} = \frac{\frac{m_2}{V}}{\frac{m_1}{V} + \frac{m_2}{V}} = \frac{C_2}{C_1 + C_2}. \quad (10)$$

Із здобутих формул (10) знаходимо

$$\omega_2 = \omega_1 \frac{C_2}{C_1}. \quad (11)$$

Далі скористаємось рівнянням Клапейрона-Менделєєва [10],

$$p \cdot V = \frac{m}{M} R \cdot T \quad (12)$$

Згідно рівняння (12) маємо для кисню і азоту, відповідно, формули

$$p_1 \cdot V = \frac{m_1}{M_1} R \cdot T, \quad p_2 \cdot V = \frac{m_2}{M_2} R \cdot T \quad (13)$$

Із формул (13) знаходимо парціальні тиски для кисню і азоту, відповідно,

$$p_1 = \frac{C_1}{M_1} R \cdot T, \quad p_2 = \frac{C_2}{M_2} R \cdot T \quad (14)$$

Далі знаходимо загальний тиск як суму парціальних тисків, враховуючи формулу (14),

$$p = p_1 + p_2 = \frac{C_1}{M_1} R \cdot T + \frac{C_2}{M_2} R \cdot T, \quad p = \left(\frac{C_1}{M_1} + \frac{C_2}{M_2} \right) \cdot R \cdot T. \quad (15)$$

Скористаємось рівняннями (10), щоб здобути

$$\begin{cases} \omega_1 \cdot (C_1 + C_2) = C_1 \\ \omega_2 \cdot (C_1 + C_2) = C_2 \end{cases} \quad (16)$$

Із системи рівнянь (16) знаходимо

$$C_1 = \frac{\omega_1}{1-\omega_1} C_2. \quad (17)$$

Із рівнянь (15), згідно формули (17), знаходимо

$$p = C_2 \cdot \left(\frac{1}{M_1} \frac{\omega_1}{1-\omega_1} + \frac{1}{M_2} \right) \cdot R \cdot T \quad (18)$$

Знайдемо приріст тиску в камері завдяки збільшенню масової долі кисню в повітрі камери

$$\Delta p_1 = C_2 \frac{R \cdot T}{M_1} \Delta \left(\frac{\omega_1}{1-\omega_1} \right) \quad (19)$$

Враховуючи, що приріст приблизно дорівнює

$$\Delta \left(\frac{\omega_1}{1-\omega_1} \right) \approx \left(\frac{\omega_1}{1-\omega_1} \right)' \cdot \Delta \omega_1 = \frac{\Delta \omega_1}{(1-\omega_1)^2}, \quad (20)$$

формула (19) прийме вигляд

$$\Delta p_1 = C_2 \frac{R \cdot T}{M_1} \cdot \frac{\Delta \omega_1}{(1-\omega_1)^2}. \quad (21)$$

Відносне збільшення тиску повітря в камері знаходимо, як відношення рівняння (21) до (18)

$$\frac{\Delta p_1}{p} = \frac{C_2 \frac{R \cdot T}{M_1} \frac{\Delta \omega_1}{(1-\omega_1)^2}}{C_2 \left(\frac{1}{M_1} \frac{\omega_1}{1-\omega_1} + \frac{1}{M_2} \right) \cdot R \cdot T},$$

або, після алгебраїчних перетворень,

$$\frac{\Delta p_1}{p} = \frac{\Delta \omega_1}{(1-\omega_1)^2 \left(\frac{\omega_1}{1-\omega_1} + \frac{M_1}{M_2} \right)} \quad (22)$$

Враховуючи, що $\Delta \omega_1 = \omega - \omega_n$, $\omega_1 = \omega_n$, $M_1 = 32$, $M_2 = 28$, отримуємо формулу для обчислення відносного збільшення тиску повітря в камері внаслідок збільшення масової долі кисню в повітрі камери

$$\frac{\Delta p_1}{p} = \frac{\omega - \omega_n}{(1-\omega_n)^2 \left(\frac{\omega_n}{1-\omega_n} + \frac{8}{7} \right)} \quad (23)$$

На (рис.4) представлений графік залежності збільшення відносного тиску в камері від вмісту кисню в повітрі камери.

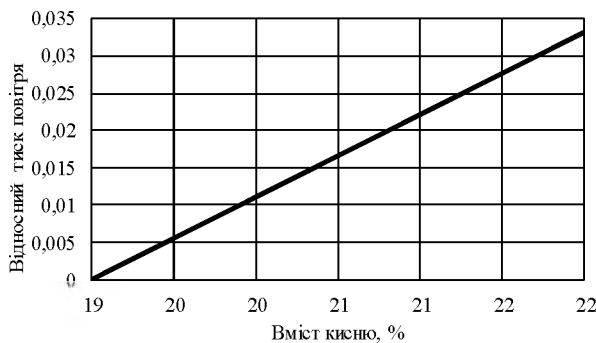


Рис.4. Графік залежності відносного збільшення тиску повітря від вмісту кисню в повітрі камери.

Аналіз графіка на (рис.4) показує, що відносний тиск повітря в камері лінійно збільшується при збільшенні вмісту кисню в повітрі камери, що дає можливість утворити умови для блокування проникнення зовнішнього повітря в камеру.

Таким чином, загальний синтез управління станом мікроклімату в випробувальній камері визначається двома моделями: концентрації кисню в повітрі та забезпечення надлишкового тиску в камері.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Доведена необхідність експериментальних досліджень на базі застосування сучасних засобів обчислювальної техніки з метою вивчення стану мікроклімату в камері аварійного повітропостачання.

Шляхом експериментальних досліджень за допомогою статистичних методів доведена адекватність математичної моделі повітрообміну в робочій камері КАПП, яка підтвердила гідродинамічну структуру близьку до ідеального перемішування повітря.

Доведена за допомогою експериментальних досліджень доцільність застосування підтримки мікроклімату в камері аварійного повітропостачання шляхом стабілізації комфортних згідно

вимог техніки безпеки концентрацій кисню у повітрі та надлишкового тиску в камері, методом дії релейних керуючих впливів.

Список літератури

1. **Лапшин О.Є., Гацький А.К., Гацький І.А.** Розроблення заходів безпеки при виникненні аварій у гірничих виробках шахт на основі використання мобільної камери повітропостачання. Вісник Криворізького національного університету. Випуск 52. Кривий Ріг 2021. 44-49 с.
2. **Бизов В.Ф., Лапшин О.Є.** Охорона праці в гірництві: в 14 т.: підручник для вузів за напрямком "Гірництво". Т.7/Бібліотека гірничого інженера. – Кривий Ріг: Мінерал, 2001. – 251 с.
3. Аерологія гірничих підприємств / **А.О. Гурін, П.В. Бересневич, А.А. Немченко, І.Б. Ошмянський.** – Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2007. – 461 с.
4. Пересувна камера повітропостачання в гірничих виробках. Патент на корисну модель UA №151129, E21F 11/00, опубл. Бюл. № 23, 2022 р. **Лапшин О.Є., Лапшин О.О., Гацький А.К., Гацький І.А., Піддубний О.В.**
5. Математичне моделювання новітніх технологічних систем.: Монографія / **Матвійчук В.А., Веселовська Н.Р., Шаргородський С.А.** – Вінниця: 2021. – 193 с.
6. ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень». Постанова Міністерства охорони здоров'я України від 01.12.1999 №42.
7. Інструкція щодо утримання захисних споруд цивільної оборони у мирний час. Наказ Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи від 09.10.2006 №653.
8. Кислород – основа жизни: монография / под. ред. **Сыровой А.О.** / Харьков, ХНМУ, 2013. – 232 с.
9. **Якібчук П.М., Клим М.М.** Молекулярна фізика. Підручник. – Львів: ЛНУ імені Івана Франка. 2013. – 584 с.
10. Рівняння стану ідеального газу (рівняння Клапейрона-Менделєєва). Отримано з <https://formula.kr.ua/vlastivosti-gaziv-gazovi-zakoni/rivniannia-stanu-idealnoho-hazu-rivniannia-klapeirona-mendelieieva.html>

Рукопис подано до редакції 23.05.2023

УДК [502.174:627.533]:622.831.6

Ступнік М.І., Бровко Д.В., Калініченко В.О., Федько М.Б., Грищенко М.А., Болотніков А.В., Чирва О.І., Айгарс О.Г. Дослідження рекультиваційних перспектив відвалу № 4 Центрального гірничо-збагачувального комбінату, підпрацьованого підземними гірничими роботами

Мета дослідження полягає у визначенні фактичного стану масиву гірських порід в підопшві та тілі відвалу № 4 ПрАТ «ЦГЗК», розташованого в зоні впливу гірничих робіт шахти «Ювілейна» ПрАТ «Суха Балка», та встановленні рекультиваційних перспектив даної земельної ділянки.

Методи дослідження. Візуальне обстеження ярусів та відкосів відвалу і прилеглої території, аерофотознімання об'єктів, аналіз стану підземного виробленого простору та геофізичні дослідження, геомеханічні розрахунки та математичне моделювання стійкості гірських порід методом кінцевих елементів.

Наукова новизна дослідження полягає у встановленні впливу підземних гірничих робіт на стан денної поверхні та прогнозуванні розвитку процесу зрушення гірських порід та деформації земної поверхні, підпрацьованих підземними гірничими роботами.

Практичне значення. Встановлено фактичний стан земельної ділянки відвалу № 4, підпрацьованої гірничими роботами шахти «Ювілейна», та визначені перспективи її рекультивації.

Результати. Встановлені фактичні границі зон зсуву земної поверхні, утворення тріщин, терас, воронок та провалів. Встановлено, що при веденні поточних гірничих робіт на шахті «Ювілейна» вихід воронок на денну поверхню в районі розміщення відвалу № 4 є неможливим внаслідок затухання цього процесу у масиві гірських порід. Отримані при математичному моделюванні процесу деформації гірського масиву під впливом підземних гірничих робіт дані свідчать, що ця ділянка знаходиться у зоні некритичних деформацій, які не загрожують масовим обваленням масиву. Разом з тим дані геофізичних досліджень показали на окремих ділянках протікання у масиві порід активних геодинамічних процесів, що свідчить про наявність порожнин на раніше відпрацьованих горизонтах. Враховуючи їх значно меншу глибину розташування існує потенційна небезпека, що при впливі поточних гірничих робіт (особливо масових вибухів) з часом це може призвести до їх самообвалення з утворенням на деяких ділянках провалів або воронок. За результатами досліджень виконано прогнозування розвитку процесу зрушення гірських порід та земної поверхні і здійснено зонування земельної ділянки відвалу за ступенем безпеки виконання робіт з його рекультивації.

Ключові слова: підземна розробка, гірські породи, порожнини, мульда зрушення, геодинамічні процеси, напружено-деформований стан, деформація поверхні, воронкоутворення, маркшейдерські спостереження, геофізичні дослідження.

Stupnik M.I., Brovko D.V., Kalinichenko V.O., Fedko M.B., Hryshchenko M.A., Bolotnikov A.V., Chyryva O.I., Aigars O.G. On reclamation prospects for dump no. 4 of the Central mining and processing plant underworked by underground mining operations

Purpose. To determine the actual state of the rock massif at the toe and body of dump No. 4 of the PJSC Central GZK located in the zone of influence of mining operations of the Yuvileyna underground mine PJSC Sukha Balka and to establish prospects for the land area reclamation.

Research methods. Visual inspection of the dump tiers and slopes and the surrounding area, aerial photography of the facilities, analysis of the state of the underground workings and geophysical surveys, geomechanical calculations and mathematical modeling of rock stability applying the finite element method.

Scientific novelty. Establishing the influence of underground mining operations on the daylight surface state and forecasting the development of the process of rock shifts and earth's surface strains triggered by underground mining.

Practical significance. Determining the actual state of the dump No. 4 land area undermined by the Yuvileyna mine and prospects for the land reclamation.

Results. The study has resulted in determining actual boundaries of zones of the earth's surface shifts, crack, terrace, crater and sinkhole formation, and establishing the fact that in the course of current mining operations at the Yuvileyna mine, craters cannot come out to the daylight surface within the dump No. 4 area due to attenuation of this process in the rock massif. The data obtained during mathematical modeling of the rock massif strains caused by underground mining operations indicate that this area is located in the zone of non-critical disturbances that do not threaten with rock massif caving. At the same time, geophysical survey data show active geodynamic processes in the rock massif in some areas, which testifies to availability of cavities in previously mined out levels. Due to their much shallower depth, there is a potential danger that current mining operations (especially bulk blasting) could eventually lead to their self-caving and formation of craters or sinkholes in some areas. The study results underlie forecasting the development of the rock and earth's surface shifts and zoning the dump area according to the degree of safety of its reclamation.

Key words: underground mining, rocks, cavities, shift trough, geodynamic processes, stress-strain state, surface disturbance, crater formation, survey observations, geophysical exploration

УДК 622.271

Луценко С.О., Жуков С.О., Григор'єв Ю.І., Федоренко С.О. Системні невідповідності за традиційного проектування залізрудних кар'єрів

Мета дослідження полягає в уточненні закономірностей утворення відхилень від проектів за умов підвищення динаміки зовнішніх впливів на функціонування кар'єрів.

Методами дослідження є ретроспективний, компаративний та каузальний аналіз розвитку невідповідності між видобувними та розкривними роботами у кар'єрі як чинника коригувань гірничих проектів, а також – оцінка періодичності даного явища.

Наукова новизна дослідження полягає в установленні системного характеру параметричних реакцій «кар'єр-системи» на зміну інтенсивності принципово значимих для неї кон'юнктурних коливань актуальної цінності руди.

Практичне значення: встановлення головних детермінантів перегляду принципів проектування розвитку гірничих робіт в кар'єрі адекватно динаміці стрибків цін на руду та обсягів потенційного її збуту, а також – приведення до відповідності можливостей прогнозування динаміки коливань зовнішнього середовища та відповідного оперативного реагування на них динамічною адаптацією проектування та планування.

Результати. На підставі виконаного авторами аналізу регулярності, масштабів, причин та наслідків виникнення й накопичення відхилень гірничих робіт від проектних рішень й зумовлених цим відхилень головних параметрів кар'єрів Кривбасу від чинних нормативів, наочно доведено, що існуюче нині традиційне коригуюче проектування відпрацювання кар'єрів при непередбачуваній зміні продуктивності є не результатом належної стратегії розвитку гірничих робіт, а – лише вимушеною та завжди запізнілою, суто компенсаторною реакцією на зміну потреби в залізорудній продукції, в результаті чого гірничодобувні підприємства несуть значні збитки при повній неможливості адекватного гнучкого реагування на зміну цін і попиту на мінерально-сировинних ринках.

Викладена аргументація актуалізує необхідність коригування на концептуальному рівні ряду принципів проектування залізорудних кар'єрів та планування розвитку гірничих робіт стосовно підвищення оперативності та гнучкості взаємодії в системі «проект – рудник – відхилення від проекту – компенсаторне коригування», реалізація чого вбачається лише в розвитку засад динамічного проектування.

Ключові слова: кар'єр, розвиток гірничих робіт, руда, проектування та планування рудників

Lutsenko S.O., Jukov S.O., Hryhoriev YU.I., Fedorenko S.O. Systemic inconsistencies in the traditional design of iron ore pits

Purpose. To clarify the patterns of deviations from projects under the conditions of increased dynamics of external influences on the functioning of quarries.

Research methods. Retrospective, comparative and causal analysis of the development of the discrepancy between overburden and extractive mining works in the open-pits as a factor in the adjustment of mining projects, as well as an assessment of the periodicity of this phenomenon.

Scientific novelty. Establishing the systemic nature of the parametric reactions of the "open-pit-system" to the change in the intensity of the fundamentally significant for it conjunctural fluctuations in the actual value of the ore.

Practical significance. Establishing the main determinants of revising the design principles of the development of mining operations in the open-pit adequately to the dynamics of changes in ore prices and the volumes of its potential sales, as well as bringing into conformity the possibilities of forecasting the dynamics of fluctuations in the external environment and corresponding operational response to them by dynamic adaptation of design and planning.

Results. On the basis of the authors' analysis of the regularity, scope, causes and consequences of the occurrence and accumulation of deviations of mining operations from design solutions and the resulting deviations of the main parameters of the Kryvbas open-pits from the current regulations, it is clearly proven that the existing traditional corrective design of open-pit working in case of the unpredictable changes in productivity are not the result of a appropriate strategy for the development of mining operations, but only a forced and always belated, purely compensatory reaction to a change in the demand for iron ore products, as a result of which mining enterprises bear significant losses with the complete impossibility of an adequate flexible response to changes in prices and demand for mineral-raw material markets.

The presented argument actualizes the need to adjust at the conceptual level a number of principles of designing iron ore open-pit and planning the development of mining operations in order to increase the efficiency and flexibility of interaction in the "project - mine - deviation from the project - compensatory adjustment" system, the implementation of which can be seen only in the development of the principles of dynamic design.

Key words: open-pit, mining development, ore, mining design and planning

УДК 622.272

Ковбик К.М., Калініченко В.О. Методика моделювання випуску насичених водою багатих залізних руд в умовах Криворізького залізорудного басейну

Мета. Дослідження випуску обводненої руди та розробка удосконаленої методики випуску з додатковими параметрами, які враховують насиченість руди водою. Процес випуску посідає одну з ключових позицій по системі. Саме від нього залежить ефективне та своєчасне вилучення корисної копалини із надр. В свою чергу сам процес досить суттєво залежить від гірничо-геологічних умов, та фізико механічних властивостей руд. Тому за для вивчення процесу випуску, вченими, було виконано багато лабораторних та практичних дослідів. В них вчені прослідковували вплив зміни різних характеристик руди, та умов залягання на протікання процесу випуску руди. Тому дослідження та моделювання процесу випуску обводненої руди є актуальним завданням. Оскільки багаті залізні руди криворізького басейну мають здатність до злежування то при їх насиченні водою процес випуску відбитої руди значно погіршується. Це призводить до збільшення втрат руди по системі розробки в цілому та виникненню проблем з подальшим відпрацюванням очисних блоків. Незважаючи на значну кількість науково-дослідницьких робіт в області випуску руди, питання відпрацювання обводнених руд залишається відкритим.

Методи дослідження. Аналіз науково дослідної та методичної літератури, яка була присвячена випуску руди та технологіям ресурсозбереження, створення макету для фізичного моделювання випуску руди в лабораторних умовах із урахуванням додаткових показників обводнення руди.

Наукова новизна. Встановлені закономірності випуску обводненої руди із очисних блоків. Визначені залежності показників випуску та встановлені відповідні коефіцієнти та параметри, які враховують насиченість руд водою.

Практична значимість. Удосконалено методику випуску обводненої руди. На основі запропонованої методики виконано серію дослідів для визначення зміни параметрів випуску обводненої рудної маси при камерних системах розробки.

Результати. Було удосконалено методику випуску руди в лабораторних умовах з урахуванням обводненості руди та отримані відповідні залежності показників випуску від насиченості руди водою.

Ключові слова: випуск руди, обводненні руди, насиченість руд, обводнені родовища, методика випуску, шахтна вода, підземна розробка.

Kovbyk K.M., Kalinichenko V.O. Methodology for modeling the release of water-saturated rich iron ores in the conditions of the Kryvyi Rih iron ore basin

Purpose. Study the tapping of watered ore and to develop an improved tapping technique with additional parameters that take into account the water saturation of the ore. The production process occupies one of the key positions in the system. It is the process that ensures the efficient and timely extraction of minerals from the subsoil. In turn, the process itself depends on mining and geological conditions and physical and mechanical properties of ores. Therefore, scientists have performed many laboratory and practical experiments to study the release process. In these experiments, scientists traced the impact of changes in various ore characteristics and ground conditions on the ore release process. Therefore, the study and modelling of the watered ore release process is an urgent task. Since the rich iron ores of the Kryvyi Rih basin have the ability to caking, the process of watered ore extraction is significantly deteriorated when they are saturated with water. This leads to an increase in ore losses in the mining system as a whole and problems with the subsequent development of treatment blocks. Despite a significant amount of research and development work in the field of ore recovery, the issue of mining waterlogged ores remains open

Research methods. Analysis of research and methodological literature on ore production and resource saving technologies, creation of a model for physical modeling of ore production in laboratory conditions, taking into account additional indicators of ore watering.

Scientific novelty. Regularities of release of watered ore from treatment blocks have been established. The dependencies of output indicators are determined and the corresponding coefficients and parameters are established, taking into account the saturation of ores with water.

Practical significance. Improved method of tapping watered ore. Based on the proposed methodology, a series of experiments was carried out to determine the change in the parameters of the production of watered ore mass in chamber mining systems.

Results. The method of ore tapping in laboratory conditions was improved, taking into account the water cut of the ore, and the corresponding dependencies of the tapping indicators on the saturation of the ore with water were obtained.

Key words: ore release, watered ores, water-saturated ores, watered deposits, output technique, mine water, underground mining.

УДК 621.9

Кравцова Д.Ю., Зюган У.І. Статистична обробка інженерних вимірювань зі комп'ютеризацією розрахунків у табличному процесорі

Метою роботи є створення універсального шаблону в табличному процесорі для розрахунку статистики емпіричної вибірки із ста розмірів навання вибраних деталей із партії.

Методи дослідження. Вибірка із ста розмірів навання вибраних деталей із партії отримана емпірично шляхом технічних вимірювань. Обчислення статистики виконано аналітичним способом зі застосуванням функцій та цифрових інструментів табличного процесора із метою комп'ютеризації та автоматизації розрахунків.

Наукова новизна полягає у пошуку, визначенні, тестуванні та налагодженні роботи функцій та цифрових засобів візуалізації розрахунку табличного процесора, які повністю задовільняють вимоги до статистичної обробки інженерних вимірювань, які будуть спроможні максимально автоматизувати обчислення і миттєво повертати результат для кожної наступної вибірки.

Практична значимість. У галузі прикладної механіки технолог відділу механічної обробки має на меті весь час вдосконалювати виробничий процес: зменшувати кількість браку, якщо робота без браку неможлива, то зменшувати витрати на брак, зменшувати зношування інструменту, оптимізувати процес механічної обробки усіма можливими способами. Для цього інженер-механік вимушений проводити вимірювання, статистично їх оброблювати, аналізувати результати, а із аналізу робити висновки та знаходити шляхи вдосконалення виробництва через прийняття конкретних технічних рішень. Тому висока практична значимість отриманого шаблону таблиці полягає не тільки у скороченні витрат часу інженера-механіка на рутинні обчислення, а і поліпшення морально-психологічного стану інженера у робочий час.

Результати. Отримана таблиця, яка після введення вибірки і граничних розмірів по кресленню автоматично перевіряє вибірку по правилу трьох сигм, будує гістограму частот емпіричної вибірки, будує теоретичну криву нормального розподілу Гауса, будує область допуску на одній діаграмі, обчислює відсоток виправного і невиправного браку, проводить дослідження нульової гіпотези по критерію Пірсона і критерію Колмогорова.

Ключові слова: вибірка із розмірів деталей, гістограма частот, нормальний розподіл Гауса, статистика Пірсона, статистика Колмогорова, автоматизація розрахунків.

Kravtsova D.Yu., Ziuhan U.I. Statistical processing of engineering measurements with computerized calculations in a table processor

Purpose. To create a universal template in a spreadsheet for calculating the statistics of an empirical sample of one hundred sizes of randomly selected parts from the batch.

Research methods. A sample of one hundred sizes of randomly selected parts from the batch was obtained empirically by means of technical measurements. The calculation of statistics was carried out analytically using the functions and digital tools of a spreadsheet for the purpose of computerization and automation of calculations.

Scientific novelty. Finding, defining, testing and debugging the functions and digital visualization tools of the calculation of the table processor, which will fully satisfy the requirements for statistical processing of engineering measurements, which will be able to automate calculations as much as possible and instantly return the result for each subsequent sample.

Practical significance. In the field of applied mechanics, the technologist of the machining department aims to improve the production process all the time: to reduce the amount of scrap, to reduce the cost of scrap, to reduce tool wear, to optimize the

machining process in all possible ways. For this, the mechanical engineer is forced to take measurements, statistically process them, analyze the results, and draw conclusions from the analysis and find ways to improve production through the adoption of specific technical decisions. Therefore, the high practical significance of the obtained table template consists not only in reducing the mechanical engineer's time spent on routine calculations, but also in improving the moral and psychological state of the engineer during working hours.

Results. The resulting table automatically checks the sample according to the three-sigma rule, constructs a histogram of the frequencies of the empirical sample, constructs a theoretical curve of the Gaussian normal distribution, constructs the tolerance area on one diagram, calculates the percentage of correctable and uncorrectable defects, conducts a study of the null hypothesis according to the Pearson test and the Kolmogorov test after entry of the sample and limit sizes according to the drawing.

Key words: sampling from the sizes of parts, frequency histogram, Gaussian normal distribution, Pearson statistics, Kolmogorov statistics, automation of calculations.

УДК 622.271.0123.004.15

Костянський О.М., Жуков С.О. Визначення параметрів вантажопотоків на ДПП конвеєрних підйомників робочої зони глибоких залізрудних кар'єрів

Мета даної роботи спрямована на підвищення завантаження дробильно-перевантажувального пункту автомобільно-конвеєрного транспорту при відкритому видобутку залізної руди шляхом управління формуванням рудопотоків. При цьому повнота завантаження дробильно-перевантажувальних пунктів має вирішальне значення для ефективної роботи всього транспортного комплексу.

Методи досліджень. В роботі використовувалися методи статистично-логічного, каузального і компаративного аналізу й узагальнень щодо визначення закономірностей розвитку кар'єрних рудопотоків та причинних зв'язків і параметричних залежностей в них з урахуванням найбільш впливових факторів на основі удосконалених аналітичних розрахунків, що дозволило обґрунтувати авторську інтерпретацію результатів. За допомогою методу моделювання вивчався процес формування вантажопотоків на дробильно-перевантажувальний пункт (ДПП).

Наукова новизна. При встановленні розрахункових рудопотоків на проектований ДПП для обґрунтування раціональних границь групи уступів, що обслуговуються ним, використовується аналітична залежність розподілу обсягів руди, обумовлена глибиною закладення горизонту і показано взаємозв'язок між розташуванням видобувних уступів, їх кількістю та завантаженням обслуговуючого ДПП.

Практичне значення. З використанням встановлених залежностей визначено ступінь завантаження дробильно-перевантажувального пункту рудою, а також обсяг сформованого рудопотоку з групи уступів, закріплених за цим ДПП та відстань перевезення до ДПП руди за подальшого поглиблення залізрудного кар'єру.

Результати. З використанням отриманих залежностей легко визначити розрахункове завантаження ДПП рудою, орієнтовну відстань її перевезення до даного ДПП. Запропонований методичний підхід до формування вантажопотоків на наступний ДПП при поглибленні конвеєрного підйомника дозволить оцінити його завантаження та рекомендувати раціональні параметри вантажопотоків для конкретних умов у майбутній період роботи кар'єру.

Враховуючи тенденції щодо формування рудних вантажопотоків на глибоких горизонтах при наступному облаштуванні ДПП, може бути рекомендованим вибір дробарок менших типорозмірів, що дозволить підвищити їх завантаження та знизити висоту перепадів руди за подальшої розробки залізрудних покладів кар'єром.

Ключові слова: дробильно-перевантажувальний пункт, завантаження, розподіл руди по глибині кар'єру, керування рудопотоком

Kostianskyi O.M., Zhukov S.O. Determination of ore flow parameters for crushing and loading points of conveyor lifts in the working area of deep iron ore pits

Purpose. To increase the loading of the crushing and loading point of the automobile-conveyor transport by controlling formation of ore flows in iron ore open-pit mining. The frequency of occupancy of crushing and loading points may be extremely important for the efficient operation of the entire transport complex.

Research methods. The paper applies methods of statistical, logical, causal and comparative analysis and generalizations to determining patterns of developing open-pit ore flows and causal relationships and parametric dependencies in them, taking into account the most influential factors based on advanced analytical calculations, which allow substantiating the author's interpretation of the results. The modeling method is used to study the process of forming ore flows at the crushing and loading point.

Scientific novelty. When setting estimated ore flows to the designed crushing and loading point, the analytical dependence of ore volume distribution, determined by the level depth, is used to justify rational boundaries of benches served, and the relationship between the location of mining benches, their number and the loading of the crushing and loading point is shown.

Practical significance. The established dependencies are used to determine the degree of ore loading of the crushing and loading point, as well as the volume of ore flow formed into a group of benches assigned to this point, and the distance of ore transportation to it with further deepening of the iron ore pit.

Results. Using the obtained dependencies, it is easy to determine the estimated ore loading of the crushing and loading point and the approximate distance of its transportation to this point. The proposed methodological approach to the formation of cargo flows for the next crushing and loading points with the deepening of the conveyor lift allows to evaluate its load and recommend rational parameters of cargo flows for specific conditions in the future period of the quarry. Taking into account the trends in forming of ore flows at deep levels, when developing the crushing and loading point, smaller crushers may be recommended to increase their loading rate and reduce the height of ore overhauling in the course of further open pit mining.

Key words: crushing and loading point, loading, ore distribution over the open pit depth, ore flow control.

УДК 628.5:620

Худик М. В., Шепель О. Л. Пилопригнічення вугільного пилу при перевантаженні вугілля у паливно-транспортних

цехах ТЕС

Мета. Аналіз ефективності боротьби з вугільним пилом за допомогою піни для зниження пилового навантаження, яке шкодить здоров'ю працівників паливно-транспортних цехів теплових електростанцій. Транспортування вугілля конвеєрами та його перевантаження супроводжуються утворенням та поширенням вугільного пилу. Для попередження виділення вугільного пилу у приміщення паливно-транспортних цехів, джерела його утворення (вузли перевантаження) обладнують аспіраційними укриттями, повітря з яких спрямовується до очисних апаратів. Недосконалість монтажу аспіраційних укриттів або невірний підбір вентиляційно-очисного обладнання призводить до зниження їх ефективності погіршуючи умови праці працівників та підвищуючи небезпеку утворення вибухонебезпечних сумішей.

Методи дослідження. Проведено узагальнення та аналіз наукової літератури, свідоцтв і патентів на винаходи та корисні моделі щодо засобів боротьби з пиловиділенням на вузлах перевантаження вугілля.

Наукова новизна. Розглянуто можливості зниження пиловиділення при перевантаженні вугілля у паливно-транспортних цехах за рахунок використання повітряно-механічної піни.

Практична значимість. Результати проведеного аналізу показують, що для зниження виділення вугільного пилу у приміщеннях паливно-транспортних цехів теплових електростанцій під час перевантаження вугілля доцільно використовувати барботажні піногенератори, які дозволять забезпечити утворення необхідної для пилопригнічення кількості піни і стабільність зниження виділення вугільного пилу на перевантажувальних вузлах паливоподачі без постійного оперативного контролю з боку працівників станцій.

Результати. Проведені дослідження роботи аспіраційних систем перевантажувально-розвантажувальних ліній показали, що основними недоліками в проектуванні систем аспірації у приміщеннях паливно-транспортних цехів є заниження об'ємів аспіраційного повітря, непогодженість повузлових тисків у цих системах і відсутність запасу продуктивності вентиляторів на непродуктивні підсмоктування повітря. Використання піни є ефективним засобом зниження пиловиділення при перевантаженні вугілля, але застосування такого способу пилопригнічення без використання аспіраційних систем, які знижують тиск в укриттях вузлів перевантаження, погіршує його ефективність. Підвищення ефективності пилопригнічення можливе при використанні для пилоочищення апаратів, працюючих при невеликих швидкостях руху повітря. Ці заходи дозволять поліпшити умови праці працівників паливно-транспортних цехів теплових електростанцій.

Ключові слова: вугільний пил, аспіраційна система, пилопригнічення, перевантажувальний вузол, повітряно-механічна піна, піноутворювач, барботажний піногенератор.

Khudyk M. V., Shepel O. L. Dust suppression of coal dust during the overloading of coal in the fuel and transport departments of thermal power plants

Purpose. To analyze the effectiveness of combating coal dust with the help of foam to reduce the dust load, which harms the health of workers in fuel and transport departments of thermal power plants. Coal transportation by conveyors and its overloading are accompanied by the formation and spread of coal dust. To prevent the release of coal dust into the premises of fuel and transport departments, the sources of its formation (overloading nodes) are equipped with aspiration shelters, the air from which is directed to cleaning equipments. Imperfect installation of aspiration shelters or incorrect selection of ventilation and cleaning equipment leads to a decrease in their efficiency, worsening the working conditions of workers and increasing the risk of formation of explosive compounds.

Research methods. A generalization and analysis of scientific literature, certificates and patents for inventions and useful models regarding means of combating dust emission at coal overloading nodes has been carried out.

Scientific novelty. Possibilities of reducing dust emission during coal overloading in fuel and transport departments due to the use of air-mechanical foam were considered.

Practical significance. The results of the analysis show that in order to reduce the release of coal dust in the premises of fuel and transport departments of thermal power plants during coal overloading, it is advisable to use bubbling foam generators, which will make it possible to ensure the formation of the amount of foam necessary for dust suppression and the stability of the reduction of coal dust release at the transshipment nodes of the fuel supply without constant operational control by station employees.

Results. Conducted studies of the operation of aspiration systems of transshipment and unloading lines showed that the main shortcomings in the design of aspiration systems in the premises of fuel and transport departments are the underestimation of the volumes of aspiration air, the inconsistency of the nodal pressures in these systems and the lack of a margin of performance of fans for non-productive air suction. The use of foam is an effective means of reducing dust emission during coal overloading, but the use of this method of dust suppression without the use of aspiration systems, which reduce the pressure in the shelters of the overload nodes, worsens its effectiveness. Increasing the efficiency of dust suppression is possible when using devices operating at low air speeds for dust cleaning. These measures will improve the working conditions of employees of fuel and transport departments of thermal power plants.

Key words: coal dust, aspiration system, dust suppression, overload node, air-mechanical foam, foam generator, bubbling foam generator.

УДК 528.48

Куліковська О. Є. Про зарубіжний досвід геодезичних робіт

Мета. Сучасні вимоги із забезпечення потрібними даними органів державної влади та місцевого самоврядування, профільних підприємств, установ і організацій, а також громадян із метою регулювання земельних та інших відносин, дефініція розміру плати за землю і цінності земель у складі природних ресурсів, контролювання за застосуванням та охороною земель, економічного, екологічного мотивування бізнес-планів та хазяйських проєктів обумовили мету дослідження щодо аналізу практики організації геодезичних, картографічних робіт за кордоном на прикладі розгляду історії та теперішнього стану картографо-геодезичного забезпечення й проведення геодезичних робіт за кордоном, зокрема на території Сполучених Штатів Америки.

Методи дослідження. Поставлена мета та завдання дослідження дозволили використання загальнонаукових підходів, логічних законів формування висновків, професійних методів пізнання. Під час виконання задач дослідження опиралися на світовий досвід застосування описового методу, порівняльно-історичного методу (компаративізму) на підставі комплексного та системного підходів. Інформаційною основою виконання роботи слугували збірники наукових праць, періодичні фахові видання, Інтернет-ресурси, нормативні документи.

Наукова новизна. Означено вибір результативних методів практики проведення геодезичних, картографічних і моніторингових робіт за кордоном на прикладі обговорення історії та сучасного стану картографо-геодезичного забезпечення, проведення геодезичних та інших спеціальних робіт на території Сполучених Штатів Америки.

Практична значимість. Позначається цільовою направленістю цього дослідження задля потреб спеціалістів геодезичної галузі та для землевпорядників і метою виконання результативної роботи щодо методів і способів збирання просторових даних, які можуть забезпечити оперативне автоматизоване отримання картографічної інформації з необхідною точністю і потрібним обсягом інформації як для потреб країни, так і зацікавлених користувачів.

Результати. У роботі досліджено історію та сьогодинішній стан картографо-геодезичного забезпечення закордонної території, виконано розгляд практик виконання геодезичних і картографічних робіт Національною геодезичною службою NOAA (NGS) Сполучених Штатів Америки. Представлено правила проведення моніторингу та обстеження територій і споруд, описано правила проведення національної геодезичної й картографічної діяльності, які служать основою для прийняття управлінських рішень. Досліджено шляхи удосконалення інфраструктури просторових даних, яка є доступною для всіх користувачів на теренах Інтернету.

Ключові слова: геодезія, картографія, Сполучені Штати Америки, інфраструктура геопросторових даних, державна геодезична мережа, моніторинг

Kulikowska O. On foreign experience of geodetic works

Purpose. Modern requirements for providing the necessary data to state and local government bodies, industrial enterprises, institutions and organizations, as well as citizens for the purpose of regulating land and other relations, determining the amount of payment for land and the value of land as part of Natural Resources, controlling the use and protection of land, economic and environmental motivation of business plans and business projects have determined the purpose of the study to analyze the practice of organizing Geodetic surveys, cartographic works abroad on the example of considering the history and current state of cartographic and geodetic support and conducting Geodetic works abroad, in particular in the United States of America.

Research methods. The set goal and objectives of the study allowed the use of general scientific approaches, logical laws of forming conclusions, and professional methods of cognition. When performing the tasks, the research was based on the world experience of applying the descriptive method, the comparative historical method (comparativism) based on complex and systematic approaches. The information basis for the work was collections of scientific papers, periodicals, internet resources, and regulatory documents.

Scientific novelty. The choice of effective methods of conducting Geodetic, cartographic and Monitoring works abroad is indicated on the example of discussing the history and current state of cartographic and geodetic support, conducting Geodetic and other special works on the territory of the United States of America.

Practical significance. It is indicated by the target orientation of this study for the needs of specialists in the Geodetic industry and for land managers and the purpose of performing effective work on methods and methods of collecting spatial data that can provide operational automated receipt of Cartographic Information with the necessary accuracy and the necessary amount of information both for the needs of the country and interested users.

Results. The paper examines the history and current state of cartographic and geodetic support of foreign technology, reviews the practices of performing Geodetic and cartographic works by the National Geodetic Service NOAA (NGS) of the United States of America. The rules for monitoring and surveying territories and structures are presented, and the rules for conducting National Geodetic and cartographic activities that serve as the basis for making managerial decisions are described. Ways to improve the spatial data infrastructure, which is accessible to all users on the Internet, are investigated.

Key words: Geodesy, cartography, United States of America, geospatial data infrastructure, State geodetic network, monitoring

УДК 622.1:622.271.3

Переметчик А.В., Федоренко С.О., Подойніцина Т.О. Геометричне моделювання та прогнозування якості залізних руд

Мета. Розробка методики геометризації та якісних показників залізрудних родовищ для побудови такої гірничо-геометричної моделі родовища, яка давала б можливість описати закономірності розміщення найважливіших якісних показників у просторі для того, щоб спрогнозувати їх зміну в процесі розвитку гірничих робіт.

Методи дослідження. Застосовано комплексний метод досліджень, що включає проведення теоретичних досліджень, лабораторні та промислові експерименти. Рівняння геохімічного поля і випадкового геохімічного поля реалізуються на основі використання аналітичних методів прогнозування, що самоорганізуються. Графоаналітична модель родовища будується з допомогою геостатистичних методів.

Наукова новизна. Описано методику прогнозування, на основі методів, що самоорганізуються, ефективно реалізує рівняння математичної моделі багатовимірного випадкового геохімічного поля. Описано розроблений авторами багатовимірний евристичний алгоритм прогнозування, який використовує поліном довільного ступеня, що дозволяє описати будь-яку функціональну залежність. Показано, що як математичний опис елементів прогнозованого гірського масиву доцільно приймати систему рівнянь багатовимірного випадкового геохімічного поля.

Практичне значення. Розроблено гірничо-геометричний метод прогнозування якісних показників залізрудних покладів, що дозволяє вирішувати завдання перспективного та поточного планування за результатами, отриманими під час геометризації. Особливо важливим аспектом геометризації родовищ залізрудних корисних копалин є гірни-

чо-геометричне прогнозування їх якісних показників для вирішення завдань перспективного та поточного планування для того, щоб налагодити з максимальною ефективністю роботу гірничодобувного підприємства в режимі усереднення якості руди та підвищити раціоналізацію освоєння родовища.

Результати. Запропоновано вирішення актуального наукового завдання, що полягає у розробці гірничо-геометричного методу прогнозування якісних показників залізрудних родовищ, заснованого на математичній моделі багатовимірного випадкового геохімічного поля, яка реалізована на основі раніше існуючих та розроблених методів, що самоорганізуються. Визначено, що на родовищах Кривбасу метод крайгінгу є найбільш прийнятним для оцінки та підвищення достовірності вихідної геологічної інформації, оскільки детальна геологічна розвідка проводиться за допомогою нерегулярної мережі свердловин.

Ключові слова: геометризація, гірничо-геометричні методи прогнозування, геостатистичні методи, крігінг, багатовимірне випадкове геохімічне поле, евристичні алгоритми прогнозування.

Peremetchyk A.V., Fedorenko S.O., Podoyntsina T.O. Geometric modeling and forecasting of the quality of iron ores

Purpose. To develop methods of geometrization of quality indicators of iron ore deposits to build a mining geometrical model of the deposit capable of describing patterns of spatial location of the most important quality indicators in order to predict their change in the process of mining.

Research methods. A complex method of research including theoretical research, laboratory and industrial experiments is applied. Geochemical field and random geochemical field equations are realized using self-organizing analytical prediction methods. The analytical model of the deposit is built using geostatistical methods.

Scientific novelty. The paper describes methods of prediction based on self-organizing methods that effectively realizes equations of the mathematical model of a multidimensional random geochemical field. The authors develop a multidimensional heuristic prediction algorithm that uses a polynomial of arbitrary power and enables description of any functional dependency. It is demonstrated that a system of equations of a multidimensional random geochemical field should be used to mathematically describe elements of the rock massif.

Practical significance. The developed mining and geometrical method of predicting quality indicators of iron ore deposits enables solution of problems of long-term and current planning based on the results obtained during geometrization. A particularly important aspect of geometrization of iron ore deposits is geometrical prediction of their quality indicators for solving tasks of long-term and current planning in order to provide the most efficient performance of the mining enterprise in terms of ore blending and to improve rationalization of deposit development.

Results. The paper proposes solution of the topical scientific problem that consists in developing a geometrical method of predicting quality indicators of iron ore deposits, applying a mathematical model of a multidimensional random geochemical field which is realized on the basis of previously developed self-organizing methods. It is determined that at Kryvbas deposits the kriging method is the most suitable for assessing and improving reliability of the input geological data since detailed geological exploration is carried out by means of an irregular grid of boreholes.

Key words: geometrization, mining geometrical methods of prediction, geostatistical methods, kriging, multidimensional random geochemical field, heuristic algorithms of prediction

УДК 624.042:624.044:624.071.32

Астахов В.І., Єрьоменко О.Ю., Волков С.О. Використання критерію критичних рівнів внутрішньої потенційної енергії деформації тіла при вирішенні задач будівельної механіки

Мета. Розглянути методику розв'язку задач будівельної механіки на основі критерію критичних рівнів енергії. На підставі розв'язку класичної задачі опору матеріалів визначити ефективність запропонованого методу розв'язку, виконати порівняння методики розв'язку на основі критерію критичних рівнів енергії з традиційними методами.

Методи дослідження. Використано комплекс методів досліджень, який охоплює аналіз та узагальнення літературних джерел відповідно до мети роботи, формулювання концепцій та їх перевірка шляхом виконання практичних розрахунків.

Наукова новизна. Показано можливість дослідження процесів деформування конструкцій на основі поділу полів зовнішніх впливів і поля деформацій твердого деформованого тіла, як існуючих за власними законами. Введено поняття критичних рівнів енергії та показана періодична природа завдань про критичні рівні енергії та їх зв'язок зі станами самонапрути конструкцій. На прикладі розрахунку стержня на розтяг показана методика розрахунку конструкцій на критичних рівнях енергії, дано роз'яснення існуючих невідповідностей "класичної" теорії розрахунку та експериментальних даних.

Практична значимість. Гіпотеза про існування критичних рівнів потенційної деформації твердих деформованих тіл знайшла своє підтвердження як у теоретичному плані, так і реалізована у методиці вирішення практичних задач. Варіаційний критерій критичних рівнів енергії показав свою працездатність при вирішенні практичних задач. Критерій критичних рівнів енергії дає теоретично-математичну основу для формулювання завдань будівельної механіки з єдиних позицій у вигляді задачі на власні значення.

Результати. Критерій критичних рівнів енергії дозволив отримати нові результати, що уточнюють дані лінійної теорії розтягання стержневих конструкцій, а також показав свою ефективність порівняно з ітераційними процедурами геометрично нелінійних завдань. Внутрішня потенційна енергія має на критичних рівнях екстремальне значення та обмежена на області допустимих значень параметрів, що дозволяє ставити і вирішувати завдання граничного стану конструкції для будь-якої формулювання граничного стану у вигляді завдання на власні значення. Теорія критичних рівнів внутрішньої потенційної енергії деформованих тіл, дозволяє більш точно та ефективно вирішувати завдання оптимального проектування конструкцій.

Ключові слова: потенційна енергія, розрахунок, деформація, критичний рівень, розтягання, стержень.

Astakhov V.I., Yeremenko O.Yu., Volkov S.O. Criterion of critical levels of internal potential energy of body deformation in solving problems of structural mechanics

Purpose. To review the methodology for solving problems of structural mechanics based on the criterion of critical levels of energy. Based on the solution of the classical problem of material resistance, to determine the effectiveness of the proposed solution method and to compare the solution methodology based on the criterion of critical levels of energy with traditional methods.

Research methods. A complex of research methods was used, which includes analysis and generalization of literary sources in accordance with the purpose of the work, formulation of concepts and their verification by performing practical calculations.

Scientific novelty. The possibility of studying deformation processes of structures based on the division of fields of external influences and the field of deformations of a solid deformed body, which exist according to their own laws, has been shown. The concept of critical levels of energy has been introduced, and the periodic nature of problems of critical energy levels and their connection with states of self-stress in structures has been demonstrated. Using the example of calculating a rod under tension, a methodology for calculating structures at critical energy levels has been shown, and explanations for existing discrepancies between "classical" calculation theory and experimental data have been provided.

Practical significance. The hypothesis of the existence of critical levels of potential deformation of solid deformed bodies has found its confirmation both in theory and in the implementation of the methodology for solving practical problems. The variation criterion of critical levels of energy has demonstrated its effectiveness in solving practical problems. The criterion of critical energy levels provides a theoretical-mathematical basis for formulating problems in structural mechanics from a unified perspective in the form of an eigenvalue problem.

Results. The criterion of critical energy levels allowed obtaining new results that refine the data of linear theory of elongation of rod structures, as well as demonstrated its effectiveness compared to iterative procedures of geometrically nonlinear problems. The internal potential energy has an extreme value at critical levels and is limited to the range of permissible parameter values, which allows to formulate and solve boundary value problems for the construction of any formulation of the boundary state in terms of eigenvalues. The theory of critical levels of internal potential energy of deformed bodies allows more accurate and efficient solution of problems of optimal design of structures.

Key words: potential energy, calculation, deformation, critical level, elongation, rod

УДК 622.788.36

Савельєв С.Г., Бабасвська О.В., Ярош Т.П., Кондратенко М.М. Аналіз прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів

Відзначено існування декількох прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів, більшість яких ґрунтуються на використанні водно-фізичних характеристик шихти або показників гранулометричного складу грудкуємого матеріалу. Проведено аналіз використовуваних методик, що визначення характеристичних вологемностей шихти, що застосовуються для визначення оптимальної вологості тонкодисперсних матеріалів, а також формул для її розрахунку. Результати аналізу вказують на певну перевагу застосування прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів, які базуються на характеристичних вологемностях шихти, що піддається огрудкуванню, завдяки їх більшій універсальності. Вказано на доцільність формування стандартних методів визначення характеристичних вологемностей матеріалів, які входять до складу шихти для виробництва залізородних окатишів.

Мета. Порівняльна оцінка достовірності результатів визначення за різними методиками і формулами оптимальної вологості тонкодисперсних матеріалів, які використовуються при виробництві окатишів.

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

Наукова новизна. На основі проведеного аналізу встановлено, що основні прийоми визначення оптимальної вологості шихти з тонкодисперсних матеріалів, яка використовується для виробництва залізородних окатишів, мають приблизно однакову достовірність, але більшу перспективу мають такі, що базуються на застосуванні характеристичних вологемностей грудкуємого матеріалу.

Практична значимість роботи полягає у представленні практичних рекомендацій щодо використання прийомів визначення оптимальної вологості шихти для виробництва окатишів, що мають високу представницькість результатів і не вимагають багато часу на їх визначення.

Результати роботи дають підстави вважати, що розробка і застосування прийомів визначення оптимальної вологості залізородної шихти для ефективного протікання процесу її грануляції є одним з важливих напрямків розвитку теорії і технології виробництва окатишів, подальший розвиток якого пов'язаний з встановленням стандартних методів визначення водно-фізичних характеристик (характеристичних вологемностей) шихт, які піддаються огрудкуванню, і ефективним використанням їх для визначення вмісту води в шихті, який сприяє отриманню сирих окатишів кондіційної якості.

Ключові слова: вологемність, матеріал, метод визначення, гранулометричний склад, окатиш, вологість

Saveliev S.G., Babaivska O.V., Yarosh T.P., Kondratenko M.M. Analysis of methods for determining the optimal moisture content of the charge for pellets production

The article notes the existence of several methods for determining the optimal moisture content of the charge for pellet production, most of which are based on the use of water-physical characteristics of the charge or indicators of the granulometric composition of the granular material. The article analyses the methods used to determine the characteristic moisture capacity of the charge used to determine the optimal moisture content of finely dispersed materials, as well as the formulas for its calculation. The results of the analysis indicate a certain advantage of using the methods for determining the optimal moisture content of the charge for pellet production based on the characteristic moisture content of the charge to be pelletised due to their greater versatility. The article indicates the expediency of developing standard methods for determining the characteristic moisture content of materials that make up the charge for the production of iron ore pellets.

Purpose. To compare the reliability of the results of determining the optimal moisture content of fine materials used in the

production of pellets using different methods and formulas.

Research methods. Generally logical methods of scientific research - analysis and synthesis, analogy, generalisation – were used in the work.

Scientific novelty. Based on the analysis, it was found that the main methods for determining the optimal moisture content of a charge of finely dispersed materials used for the production of iron ore pellets have approximately the same reliability, but those based on the use of the characteristic moisture capacity of the granular material have greater prospects.

Practical significance. The presentation of practical recommendations for the use of methods for determining the optimal moisture content of the charge for pellet production, which are highly representative of the results and do not require much time for their determination.

Results. The development and application of methods for determining the optimal moisture content of iron ore charge for the efficient course of the process of its granulation is one of the important directions of development of the theory and technology of pellet production, the further development of which is associated with the establishment of standard methods for determining the water-physical characteristics (characteristic moisture capacity) of pelletised charges and their effective use to determine the moisture content in the charge, which contributes to the production of green pellets of conditional quality.

Key words: moisture capacity, material, method of determination, particle size distribution, pellet, humidity

УДК 331.43:[622.7:549.6]

Лапшин О.Є., Ярошенко Г.М. Дослідження стану умов праці в цехах збагачення титано-цирконієвої руди виробництва Вільногірського ГМК

Мета. Визначення стану умов праці та ефективність вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвої руди.

Методи дослідження. Фактичний аналіз умов праці на робочих місцях в цехах збагачення титано-цирконієвої руди. Аналіз літературних джерел з методів визначення шкідливих речовин при збагаченні руд.

Наукова новизна роботи полягає в розробці методик визначення концентрацій шкідливих речовин на робочих місцях та ефективності вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвих руд.

Практична значимість. Наведені фактичні величини концентрацій шкідливих речовин при роботі обладнання, мікрокліматичні умови праці в різні періоди року та ефективність вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвих руд, які в подальшому будуть використані при розробці заходів з покращення умов та безпеки праці на робочих місцях.

Результати. В результаті опрацювання науково-дослідницьких матеріалів з розробки заходів боротьби зі шкідливими речовинами, які виділяються під час роботи промислового обладнання, установлено наявність розбіжностей в методичних джерелах визначення їх концентрацій на робочих місцях, ефективності вентиляції в промислових цехах, зокрема в робочих зонах обслуговуючого персоналу. Недостатньо вивчені умови праці в несприятливий сезонні кліматичні коливання, а відповідно бракує рекомендацій з регулювання вентиляційних режимів під час максимальних навантажень роботи обладнання та в теплий і холодний періоди року. Приведені вказівки з методів визначення вмісту шкідливих речовин в повітрі робочих зон, рекомендації з визначення метеорологічних умов в промислових приміщеннях, зокрема температури, вологості і швидкості повітря в сезонні періоди року. Надані відомості з визначення ефективності вентиляції в промислових приміщеннях, які є актуальними для сучасних умов цехів збагачення титано-цирконієвих руд. Рекомендовані методичні посилання були застосовані при визначенні стану умов праці та ефективності вентиляції в цехах збагачення титано-цирконієвих руд, а на їх підставі даються рекомендації з поліпшення умов праці, у першу чергу, підвищення ефективності вентиляції виробничих приміщень. Результати вимірювань вмісту шкідливих речовин в повітрі і мікроклімату в приміщеннях наведені.

Ключові слова: умови праці, повітря, шкідливі речовини, пил, температура, вологість, швидкість, профзахворювання, руда, вентиляція

Lapshyn O.Ye., Yaroshenko H.M. Working conditions in the titanium-zirconium ore enrichment shops at Vilnohirsk Mining and Metallurgical Plant

Purpose. To determine the state of working conditions and the effectiveness of ventilation in titanium-zirconium ore enrichment shops.

Research methods. Actual analysis of working conditions at workplaces in titanium-zirconium ore enrichment shops. Analysis of literary sources on methods of determining harmful substances during ore enrichment.

Scientific novelty. The development of methods for determining the concentrations of harmful substances at workplaces and the effectiveness of ventilation in titanium-zirconium ore enrichment shops.

Practical significance. The actual values of the concentrations of harmful substances during the operation of the equipment, the microclimatic working conditions in different periods of the year and the efficiency of ventilation in the titanium-zirconium ore enrichment shops are given, which will be used in the future in the development of measures to improve working conditions and safety at workplaces.

Results. As a result of the processing of scientific and research materials on the development of measures to combat harmful substances that are released during the operation of industrial equipment, it was established that there are discrepancies in the methodical sources of determining their concentrations at workplaces, the effectiveness of ventilation in industrial workshops, in particular in the working areas of service personnel. Working conditions in unfavorable seasonal climatic fluctuations are insufficiently studied, and accordingly there is a lack of recommendations for regulating ventilation modes during maximum equipment operation loads and in warm and cold periods of the year.

Instructions on methods for determining the content of harmful substances in the air of working areas, recommendations for determining meteorological conditions in industrial premises, in particular temperature, humidity and air speed in seasonal periods of the year, are given. Information on determining the efficiency of ventilation in industrial premises, which is relevant for modern conditions of titanium-zirconium ore enrichment shops, is provided.

The recommended methodical references were applied when determining the state of working conditions and the efficiency of ventilation in the titanium-zirconium ore enrichment shops, and based on them, recommendations are made for improving

working conditions, primarily, increasing the efficiency of ventilation in industrial premises. The results of measuring the content of harmful substances in the air and the microclimate in the premises are shown.

Key words: working conditions, air, harmful substances, dust, temperature, humidity, speed, occupational disease, ore, ventilation.

УДК658.562.012.7.681.26

Азарян А.А., Крапивний Н. С. Гравітаційний метод оперативного контролю вмісту заліза в подрібненій гірничій масі

Мета. Дослідження можливості оперативного контролю вмісту корисного компонента в окислених гематитових рудах в діапазоні від 30 до 68 відсотків вмісту заліза з гранулометричним складом -3мм.

Метод дослідження. Гравітаційний.

Наукова новизна. Встановлення стійкого кореляційного зв'язку між питомою вагою та вмістом заліза у подрібненій руді, а також використання у поєднанні нечіткої логіки, нейронних мереж для виявлення параметрів залежності і отримання максимально точного результату, та гравітаційного методу. Перевагою запропонованого методу в порівнянні з іншими геофізичними методами є швидкість та вартість експрес аналізу однієї проби, що приблизно на порядок нижче від існуючих. Крім того, цей метод не вимагає використання радіоактивних джерел випромінювання, що дозволяє спростити процедуру проведення аналізу та не потребує отримання дозволів та серйозного контролю за такою типом обладнанням, в свою чергу це на порядок підвищує безпеку та охорону праці на підприємстві.

Практичність значимість запропонованого пристрою у гірничодобувному виробництві України є те, що він дозволить максимально швидко отримувати результати аналізу, знизить вартість аналізу однієї проби, та знизить втрати руд та засмічення підірваної гірничої маси, що розширить сировинну базу країни.

Результати проведених лабораторних досліджень показали, що за всіма вимогами оперативного контролю вмісту заліза в гематитових рудах - гравітаційний метод не поступається відомим геофізичним методам, таким як ядерно-фізичні, магнітометричні, ультразвукові, акустичні, радіометричні та інші, залежно від фізико-механічних властивостей мінералів. У статті наведено основні моменти роботи такого методу та вимоги до використання експрес-аналізу гематитових руд гравітаційним методом. Також представлена блок-схема алгоритму роботи такої системи та основні її компоненти, як електронні ваги, прес, манометр, кювета з пробною, персональний комп'ютер. В результаті досліджень також було розроблено ПЗ, яке забезпечує стабільну роботу системи та виконує усі обчислення та перетворення, його основні характеристики також було описано в даній статті.

Ключові слова. Питома вага, нейронні мережі, штучний інтелект, нечітка логіка, гравітаційний, гематитовий, гранулометричний, ущільнення

Azaryan A.A., Krapivny N.S. Gravity method of operational control of the iron content in crushed mining mass

Purpose. To investigate the possibility of operational control of the content of a useful component in oxidized hematite ores in the range from 30 to 68 percent of iron content with a granulometric composition of -3 mm.

Research method is gravity.

Scientific novelty. Establishing a stable correlation between specific gravity and iron content in crushed ore, as well as the combined use of fuzzy logic, neural networks to detect dependence parameters and obtain the most accurate result, and the gravity method. The advantage of the proposed method in comparison with other geophysical methods is the speed and cost of express analysis of one sample, which is about an order of magnitude lower than the existing ones. In addition, this method does not require the use of radioactive radiation sources, which simplifies the analysis procedure and does not require obtaining permits and serious control over this type of equipment, which in turn increases safety and occupational health at the enterprise by an order of magnitude.

Practical significance of the proposed device in the mining industry of Ukraine is obtaining analysis results as quickly as possible, reduce the cost of analysis of one sample, and reduce ore losses and clogging of mined mass, which will expand the country's raw material base.

Results. In terms of all the requirements for operational control of iron content in hematite ores, the gravity method is not inferior to known geophysical methods, such as nuclear-physical, magnetometric, ultrasonic, acoustic, radiometric, and others, depending on the physical and mechanical properties of minerals. The article presents the main points of operation of this method and the requirements for the use of express analysis of hematite ores by the gravity method. Also presented is a block diagram of the algorithm of such a system and its main components, such as electronic scales, a press, a manometer, a cuvette with a sample, and a personal computer. As a result of the research, software was also developed, which ensures the stable operation of the system and performs all calculations and transformations, its main characteristics were also described in this article.

Key words. Specific gravity, neural networks, artificial intelligence, fuzzy logic, gravity, hematite, granulometric, compaction

УДК 622.271.4

Штанько Л.О., Антонік В.І., Баранов І.В. Визначення можливостей складування окислених кварцитів при подальшій розробці крутоспадних залізрудних родовищ на прикладі кар'єру № 3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»

Мета. Видобуток залізистих кварцитів відкритим способом супроводжується величезними обсягами виїмання розкривних порід. До складу порід розкриття входять окислені кварцити, які необхідно складувати окремо з метою їх використання у якості залізрудної сировини в майбутньому. Однією з умов підтримання продуктивності кар'єру за рудою є своєчасне, у необхідному обсязі, виїмання розкривних порід. Для її виконання потрібна наявність або створення вільних відвальних ємностей, а також визначення технології подальшого розміщення порід розкриття у відповідності кращім доступним технологіям і методам управління, які відомі на сьогодні.

Методи досліджень. Аналіз наукових досягнень і практичного досвіду з розміщення та складування розкривних порід залізрудних кар'єрів. Проаналізовано попередні проектні рішення, які пов'язані з можливим збільшенням

продуктивності кар'єру за рудою та підтримання її на заданому рівні. Використані методи технологічної та економічної оцінки можливостей з подальшого складування окислених кварцитів при розробці Валявкінського родовища.

Наукова новизна полягає в подальшому розвитку теорії планування відвальних робіт при відкритому способі розробки залізрудних родовищ, що дозволяє враховувати конкретні гірничо-технологічні умови роботи кар'єрів і відвалів та підвищити їх ефективність.

Практична значимість. Враховуючи гірничо-технологічні умови, які склалися при відпрацюванні кар'єрів, можна визначити кращу технологічну схему, оптимальний варіант розміщення розкривних порід (окислених кварцитів), що дозволить підвищити ефективність видобутку залізрудної сировини та техніко-економічні показники роботи гірничовидобувного підприємства в цілому.

Результати. Запропонована технологічна схема розширення тимчасового складу окислених кварцитів на борту кар'єру та на території ліквідованої шахти. Тобто буде використовуватися територія земельних площ, яка вже порушена гірничими роботами. При впровадженні технологічної схеми складування окислених кварцитів можливо значно знизити відстань транспортування окисленої руди, знизити негативний вплив на оточуюче середовище без відчуження додаткових сільськогосподарських земельних площ. При цьому є можливість підтримання продуктивності кар'єру за рудою на найближчу перспективу.

Ключові слова: кар'єр, окислена руда, відвал, земельні площі, технологія, параметри, гірниче обладнання, технологічні показники.

Stanko L.O., Antonik V.I., Baranov I. V. Determination of the possibilities of oxidised quartzite storage in the further development of steeply dipping iron ore deposits on the example of a quarry № 3 PJSC ArcelorMittal Kryvyi Rih

Purpose. Mining of ferruginous quartzites by the open method is accompanied by huge volumes of extraction overburden rocks. The composition of overburden rocks includes oxidized quartzites, which must be stored separately for their purpose use as iron ore raw material in the future. One of the conditions for maintaining the productivity of an ore quarry there is timely, in the necessary volume, extraction of overburden. Its implementation requires the availability or creation of free ones dump containers, as well as the definition of the technology for the further placement of overburden rocks in accordance with the best available technologies and management methods that are known today.

Research methods. In order to achieve the specified goal, the work analyzes scientific achievements and practical ones experience in placement and storage of overburden in iron ore quarries. Previous project plans were also analyzed decisions that are related to the possible increase in the productivity of the ore pit and its maintenance at a given level. The methods of technological and economic assessment of the possibilities of further storage of oxidized quartzites during the development of the Valyavka deposit were used.

Scientific novelty. The further development of the theory of planning dump works with an open method of developing iron ore deposits, which allows taking into account specific mining and technological conditions operations of quarries and dumps and increase their efficiency.

Practical significance. Taking into account the mining and technological conditions that have developed during the development of quarries, it is possible to determine the best technological scheme, the optimal option for placement of overburden (oxidized quartzite), which will allow to increase the efficiency of iron ore raw material extraction and technical and economic indicators of work mining enterprise as a whole.

Results. A technological scheme for expanding the temporary composition of oxidized quartzite on board the quarry and on the territory of the liquidated mine was proposed. This means that the territory of land areas that have already been disturbed by mining operations will be used. With the implementation of the technological scheme of storage of oxidized quartzites, it is possible to significantly reduce the distance transportation of oxidized ore, to reduce the negative impact on the environment without alienating additional ones agricultural land areas. At the same time, it is possible to maintain the productivity of the quarry for ore on the near future.

Key words: quarry, oxidized ore, dump, land areas, technology, parameters, mining equipment, technological indicators

УДК 621.9.022.1

Бугай Л.А. Зниження трудоемкості механічної обробки продукції з високомарганцевих сталей

Мета. Аналіз методів та засобів зниження трудомісткості операцій механічної обробки деталей з високомарганцевих сталей гірничо-збагачувального обладнання, а саме – визначення оптимальних режимів різання, періоду стійкості ріжучої крайки ріжучого інструменту при різних умовах обробки.

Методи дослідження. Були проведені дослідження стійкості змінних твердосплавних пластин з урахуванням різних факторів процесу різання. Результати роботи по оптимізації режимів різання, що застосовуються для обробки зносостійких високомарганцевих сталей отримані шляхом теоретичних і експериментальних досліджень. Теоретичні дослідження полягають у визначенні параметрів та шляхів оптимізації процесу механічної обробки. Експериментальні дослідження засновані на комплексному вивченні взаємозв'язку режимів різання, геометрії ріжучого інструменту з різними умовами обробки деталі броні конусної дробарки.

Наукова новизна. Отримані дані про стан параметрів якості обробленої поверхні заготовок, що виготовлені зі зносостійких високомарганцевих сталей при обробці збірними різцями з різними інструментальними матеріалами та державками. Виявлені оптимальні режими різання при найбільшому періоді стійкості ріжучої крайки для пластин з різних сплавів на різних проходах. Досліджено залежності режимів різання від застосовуваного ріжучого матеріалу та геометричних параметрів різців.

Практичне значення. Термічна обробка сталі впливає на її структуру. Для поліпшення обробки різанням виробів зі сталі, її піддавали довгостроковому нагріванню. Структура сталі, ставала менш в'язкою і піддавалась різанню твердосплавним інструментом. Плазмово-механічна обробка покращує механічну обробку виробів зі сталі, але має небезпечний вплив на стан верстатника. Високих результатів набули різці з механічним кріпленням пластин з кубічного нітриду бору вітчизняних та закордонних виробників.

Проведені дослідження дозволили з високою точністю визначити період стійкості різальних крайок змінних твердосплавних пластин і зробити їх порівняльний аналіз для раціонального використання часу і фінансових ресурсів. Встановлені раціональні режими різання та геометричні параметри різців.

Результати. Встановлено, що використання запропонованого ріжучого інструменту німецької корпорації «HAHN – KOLB» дозволило скоротити трудомісткість механічної обробки деталей зі зносостійких високомарганцевих сталей майже до 5 разів.

Ключові слова: високомарганцеві сталі, режими різання, твердосплавні пластини, стійкість, трудомісткість обробки.

Buhai L.A. Reducing the labour intensity of machining products from high-manganese steels

Purpose. Analysis of methods and means of reducing the labor intensity of machining operations high-manganese steel parts of mining enrichment equipment, namely, determination of optimal modes cutting, the period of stability of the cutting edge of the cutting tool under different processing conditions.

Research methods. Studies of the stability of variable carbide plates were carried out taking into account various factors of the cutting process. Results of work on optimization of cutting modes used for processing of wear-resistant high-manganese steels obtained through theoretical and experimental studies. Theoretical research consists in determining the parameters and ways to optimize the machining process. Experimental research is based on a comprehensive study of the relationship between cutting modes, the geometry of the cutting tool with under different processing conditions of the armour part of the cone crusher.

Scientific novelty. Obtained on the state of the parameters of the quality of the processed product surfaces of workpieces made of wear-resistant high-manganese steels when processed with prefabricated cutters with different instrumental materials and tools. Optimum cutting modes at the largest period have been identified stability of the cutting edge for plates from different alloys on different passes. The dependence of cutting modes on used cutting material and geometric parameters of cutters.

Practical significance. Heat treatment of steel affects its structure. For improvement of cutting processing of products made of steel, it was subjected to long-term heating. The structure of steel became less viscous and could be cut with a carbide tool. Plasma-mechanical processing improves the mechanical processing of products made of steel, but has dangerous influence on the condition of the machine tool. High results were obtained by cutters with mechanical fastening of plates made of cubic boron nitride of domestic and foreign manufacturers. The conducted research made it possible to determine the period of stability of cutting tools with high accuracy edges of replaceable carbide plates and make their comparative analysis for rational use of time and financial resources. Rational and geometric cutting modes are installed cutter parameters.

Results. It was established that the use of the proposed cutting tool of the German corporation "HAHN -KOLB" made it possible to reduce the labor-intensiveness of mechanical processing of parts made of wear-resistant high-manganese steels almost 5 times.

Key words: high-manganese steels, cutting modes, hard-alloy plates, toughness, labor hardness of processing.

УДК 622.7: 534

Моркун В.С., Моркун Н.В., Грищенко С.М., Гапоненко І.А., Гапоненко А.А., Бобров Є.Ю. Моделювання електромагнітного акустичного перетворювача

Метою дослідження є моделювання процесів електромагнітного акустичного перетворення для конструювання безконтактного із досліджуваним середовищем ультразвукового вимірювального каналу.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного та імітаційного моделювання, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

Наукова новизна полягає у дослідженні механізмів електромагнітного акустичного перетворення для формування ультразвукових пружних хвиль.

Практичне значення полягає в обґрунтуванні застосування електромагнітних акустичних перетворювачів для визначення фізико-механічних властивостей феромагнітної гірської породи.

Результати. У феромагнітних провідних матеріалах одночасно присутні три механізми акустичного перетворення: сила Лоренца, магнітострикційна сила і сила намагнічування. Звичайний електромагнітний акустичний перетворювач складається з джерела постійного магнітного поля, джерела змінного магнітного поля та деякого обсягу досліджуваної середовища, де відбуваються процеси перетворення енергії електромагнітного поля в енергію пружних коливань його частинок. Конструкція та конфігурація зазначених джерел визначають режими перетворення для формування різних типів хвиль, таких як поздовжні та поперечні об'ємні хвилі, збуджувані перпендикулярно поверхні зразка похилі поперечні хвилі та спрямовані моди (включаючи складні для збудження горизонтальної поляризації). Амплітуда та частота пружних ультразвукових коливань, сформованих електромагнітним способом, при розповсюдженні їх у гірському масиві залежить від вмісту та структури розподілу феромагнітного компонента, фізико-механічних характеристик та стану досліджуваної середовища, тобто мінералогічних структурно-текстурних особливостей порід, що його складають. Цей процес обумовлений поглинанням та розсіюванням енергії ультразвукових хвиль і відповідно несе інформацію щодо середовища розповсюдження. Моделювання зазначеної процедури вимірювань відбувалось у два етапи: спочатку визначалися особливості формування магнітного поля у феромагнітній гірській породі під впливом електромагнітного імпульсу, а потім імітувалася генерація ультразвукових сигналів у досліджуваній середовищі та вплив на їх характеристики випадкових збурень. Запропонований підхід дозволяє дослідити метод неруйнівного безконтактного вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

Ключові слова: електромагнітний акустичний перетворювач, моделювання, руда, феромагнітний компонент

Morkun V.S., Morkun N.V., Gryshchenko S.M., Gaponenko I.A., Gaponenko A.A., Bobrov Ye.Yu. Modelling of an electromagnetic acoustic transducer

Purpose. To model the processes of electromagnetic acoustic transformation for the design of an ultrasonic measuring channel that is not in contact with the medium under study.

Research methods. The methods of analysis of domestic and foreign experience, methods of mathematical and simulation modelling, as well as methods of mathematical statistics and probability theory were used to form an assessment of the research results.

Scientific novelty. Study of the mechanisms of electromagnetic acoustic transformation for the formation of ultrasonic elastic waves.

Practical significance. Use of electromagnetic acoustic transducers to determine the physical and mechanical properties of ferromagnetic rock.

Results. Three mechanisms of acoustic transformation are simultaneously present in ferromagnetic conductive materials: the Lorentz force, the magnetostrictive force, and the magnetisation force. A conventional electromagnetic acoustic transducer consists of a source of a constant magnetic field, a source of an alternating magnetic field, and a certain volume of the medium under study, where the processes of converting the energy of the electromagnetic field into the energy of elastic vibrations of its particles take place. The design and configuration of these sources determine the conversion modes for generating various types of waves, such as longitudinal and transverse bulk waves, inclined transverse waves excited perpendicular to the sample surface, and directional modes (including those difficult to excite horizontal polarisation). The amplitude and frequency of elastic ultrasonic vibrations generated by the electromagnetic method, when propagating in a rock mass, depends on the content and distribution structure of the ferromagnetic component, physical and mechanical characteristics and the state of the medium under study, i.e., the mineralogical structural and textural features of the rocks that compose it. This process is caused by the absorption and scattering of ultrasonic wave energy and, accordingly, provides information about the propagation medium. The modelling of this measurement procedure was carried out in two stages: first, the peculiarities of magnetic field formation in ferromagnetic rock under the influence of an electromagnetic pulse were determined, and then the generation of ultrasonic signals in the studied medium and the effect of random disturbances on their characteristics were simulated. The proposed approach makes it possible to investigate the method of non-destructive non-contact measurement of ferromagnetic rocks characteristics.

Key words: electromagnetic acoustic transducer, modelling, ore, ferromagnetic component.

УДК: 624.131.1:69.04

Лашин О.О., Ярошенко В.О. Інженерна геологія та геотехніка в контексті забезпечення стійкості будівель, споруд та комунікацій

Мета. Ознайомлення з організацією і складом робіт при інженерно-геологічних та інженерно-геотехнічних вишукуваннях, основними задачами передпроектних інженерно-геологічних вишукувань, інженерно-геологічної розвідки, а також зі складом та змістом типових звітів з інженерних досліджень.

Методи дослідження. Аналіз літературних джерел щодо питання інженерно-геологічних та інженерно-геотехнічних вишукувань. Вивчення нормативних документів, державних будівельних норм з огляду питання інженерних вишукувань.

Наукова новизна. Узагальнені та структуровані інформації щодо організації та складу робіт при інженерно-геологічних, геотехнічних вишукуваннях та надання її широкому загалу; описі основних задач рекогносцирувальних маршрутних обстежень, як основних робіт які передують початку будь-якого об'єкту будівництва; узагальнені та структуровані інформації щодо основних характеристик ґрунтів та їх розрахунків; описі методів визначення основ, підвалів та фундаментів.

Практична значимість. В даній статті приведені й структуровані матеріали стосовно інженерно-геологічних, геотехнічних робіт, аналізу нормативних документів стосовно даного питання, що можуть слугувати основою для розробки превентивних методів та засобів зменшення шкоди при просіданні земної поверхні, а також інженерного захисту територій, будівель і споруд від зсувів та обвалів тощо.

Результати. За результатами опрацювання літературних науково-дослідницьких джерел і нормативних документів було вивчено та описано: як стійкість порід впливає на процес будівництва; ведення передпроектних робіт; проведення досліджень. Детально описано для чого потрібні рекогносцирувальні маршрутні обстеження. Вказано, що таке геофізичні дослідження, яку роль вони виконують та приведення діючих державних будівельних норм з їх видів та об'ємів робіт. В результаті виявлено, що геофізичні роботи повинні йти завжди на випередження усіх інших інженерно-геологічних робіт. Описано основні фізичні розрахункові характеристики ґрунтів.

Вказана підбірка методів та їх принципи, за якими можна визначати процеси осідання основ, підвалів та фундаментів. Описана методика розрахунку осідання основ наближеним методом, запропонована професором І. О. Розенфельдом.

Ключові слова: інженерна геологія, будівництво, зсуви, обвал, просідання поверхні, ґрунт, вишукування, геотехнічні роботи, стійкість, землетрус.

Lapshyn O.O., Yaroshenko V.O. Engineering geology and geotechnics in the context of ensuring the sustainability of buildings, structures and communications

Purpose. To get acquainted with the organization and composition of works during engineering-geological and engineering-geotechnical investigations, the main tasks of pre-project engineering-geological investigations, engineering-geological exploration, as well as with the composition and content of typical reports on engineering investigations.

Research methods. Analysis of literary sources on the issue of engineering-geological and engineering-geotechnical investigations. Study of regulatory documents, state building codes with a view to the issue of engineering investigations.

Scientific novelty. Generalisation and structuring of information on the organisation and composition of works in engineering, geological and geotechnical surveys and its provision to the general public; description of the main tasks of reconnaissance route surveys as the main works preceding the start of any construction project; generalisation and structuring of information on the main characteristics of soils and their calculations; description of methods for determining the foundations, bases and foundations.

Practical significance. This article contains materials related to engineering-geological, geotechnical works, analysis of normative documents related to this issue, which can serve as a basis for the development of preventive methods and means of reducing damage in case of subsidence of the earth's surface, as well as engineering protection of territories, buildings and structures from landslides and collapses etc.

Results. Based on the results of literary research sources and normative documents, it was studied and described in the article how the stability of rocks affects the construction process, what pre-project works are being conducted and what research is being conducted. It is described in detail why reconnaissance route surveys are needed. It is indicated what geophysical studies are, what their role is, and current state building regulations on their types and scope of work are given. As a result, it was found that geophysical works should always precede all other engineering and geological works. The basic physical calculation characteristics of soils are described. A selection of methods and their principles are indicated, by which it is possible to determine the processes of subsidence of bases, foundations and foundations. The method of calculating foundation settlement using the approximate method by Professor I. O. Rosenfeld is described.

Key words: engineering geology, construction, landslides, collapse, surface subsidence, soil, search, geotechnical works, stability, earthquake.

УДК 625.861

Валовой О.І., Афанасьев В.В., Валовой М.О. Дослідження фізико-механічних характеристик хвостів СМС Інгулєцького гірничо-збагачувального комбінату для будівництва та відновлення залізничних колій

Мета. Визначення фізико-механічних властивостей піска і щебеню з хвостів. Точкові проби хвостів відібрано з терміналу окремої технологічної лінії грохочення. Лабораторні випробування хвостів проведено згідно зі зернового складу, вмісту зерен лешадної і голчатої форми, насипної щільності і пустотності, подрібнення (марки за міцністю).

Методи дослідження. До випробувань використовували лабораторну пробу, яку висушували до постійної маси, з котрої брали аналітичні проби. Просіювали ручним засобом через сита з отворами нормативних розмірів. Результати випробування полягали у визначенні залишку на кожному ситі.

Наукова новизна. Експериментальним шляхом були отримані фізико-механічні показники, дані про хімічний та гранулометричний склад щебеню та піску з відходів збагачення залізних руд.

Практична значимість. Для уникнення деформацій під залізничним навантаженням забезпечують загальну стійкість верхньої будови залізничної колії, стійкість і міцність основного майданчика земляного полотна (ущільнення, укоси, берми, укладання геотекстильних матеріалів, запас на осадку). Ці передбачені заходи економічно не завжди є доцільними. З другого боку, запаси нерудних будівельних матеріалів (граніт), які є у залізрудному кар'єрі, обмежені, видобуток - епізодичний. У зв'язку з цим для будівництва і відновлення земляного полотна на слабких основах і для верхньої будови залізничних колій актуальним є використання хвостів.

Результати. Щебень з хвостів рекомендовано застосовувати для підсилення слабких основ при будівництві земляного полотна залізничних колій. Щебень з хвостів рекомендовано застосовувати для верхньої будови залізничних колій. За рахунок використання відходів при будівництві залізниць у залізобетонних блоках можливо суттєве покращення екологічного стану підприємства на відвалах та в кар'єрі. Нова розроблена конструкція верхньої будови залізничної колії є екологічно захищеною від утворювання пилу, допускає роботи з виправлення колії, заміни шпал і рейок.

Ключові слова: щебень, залізничні колії, відходи збагачення, міцність

Valovoi O.I., Afanasiev V.V., Valovoi M. O. Research of the physical and mechanical characteristics of the tails obtained in result of dry magnetic separation at Inhuletskyi mining and processing plant for the construction and restoration of railway tracks

Purpose. Determination of physical and mechanical properties of sand and crushed stone from tails. The point samples of tails were taken from the terminal of a separate technological screening line. Laboratory tests of the tails were carried out according to the grain composition, the content of grains of a flake and needle shape, bulk density and porosity, grinding (grades according to strength).

Research methods. In the tests, a laboratory sample was used that was dried to a constant mass, from which analytical samples were taken. It was screened manually through screens with holes of standard sizes. The results of the test lied in determination of the residue on each screen.

Scientific novelty. The physical and mechanical parameters, data on the chemical and granulometric composition of crushed stone and sand from iron ore beneficiation waste were obtained experimentally.

Practical significance. The general stability of the upper structure of the railway track, the stability and strength of the main area of track bed (compactions, slopes, berms, laying of geotextile materials, reserve for subsidence) are ensured to avoid deformations under the railway load. These planned measures are not always economically feasible. On the other hand, the reserves of non-metallic building materials (granite) in the iron ore quarry are limited, and their mining is episodic. In this regard, the use of tails is relevant for the construction and restoration of the track bed on weak foundations and for the upper structure of railway tracks.

Results. Crushed stone from the tails is recommended to be used to strengthen weak foundations at the construction of the track beds of railway tracks. It is recommended to use crushed stone from tails for the upper structure of railway tracks. Due to the use of waste during the construction of railways in reinforced concrete blocks, it is possible to significantly improve the environmental condition of the enterprise at the dumps and in the quarry. The newly developed construction of the upper structure of the railway track is environmentally protected from dust formation, allows work on track correction, replacement of sleepers and rails.

Key words: crushed stone, railway tracks, beneficiation product, strength.

УДК 622.235:622.271

Малих Д.Ю., Єременко Г.І., Тітов Д.А. Уточнення розрахунку руйнування гірських порід свердловинними зарядами з диференційовано розподіленою ВР в їх рядах

Мета. Уточнення розрахунків при математичному моделюванні взаємодії свердловинних зарядів, у яких частини вибухової речовини розосереджені по довжині свердловини інертним матеріалом, які підриваються послідовно. При цьому проаналізовано особливості динамічного навантаження скельного масиву, який підривається, в залежності від послідовності відривання цих зарядів та їх частин. Це уточнення стосується удосконалення методики параметричних розрахунків і спрямоване на вирішення актуальної проблеми – зниження питомої витрати вибухових речовин для руйнування скельних гірських порід.

Методи дослідження. Аналіз геомеханічних процесів математичним моделюванням динамічного напруження породного масиву вибухом на відкритих гірничих розробках.

Наукова новизна дослідження полягає в уточненні закономірностей взаємодії енергії вибуху свердловинних зарядів спеціальної конструкції з оточуючим їх скельним масивом.

Практичне значення. Подальший розвиток і виробниче застосування результатів досліджень забезпечить значне зниження собівартості залізорудної продукції за рахунок підвищення ефективності бурових і вибухових робіт у залізорудному кар'єрі.

Результати. Для теорії і практики ведення вибухових робіт важливо знати особливості формування і взаємодії силових полів свердловинних зарядів ВР, що підривають із затримкою. Основну роль в процесі руйнування гірського масиву за цих умов відіграє конструкція підривних свердловинних зарядів. Підбором мас зарядів з різним співвідношенням їх частин в свердловинах послідовних рядів і варіюванням тривалості затримки між вибухами можна регулювати процес вибухового навантаження в залежності від конкретних гірничо-геологічних умов ведення вибухових робіт. За рахунок зміни способів формування і порядку підривання зарядів ВР в руйнованому обсязі, можна впливати на процес руйнування, знаючи особливості формування силових полів. З огляду на часові та геометричні характеристики породного масиву, можна припустити, що його напружений стан буде повністю відповідати фізичним параметрам інтегральної зони, за яких вірата енергії вибухових хвиль мінімізується. Отримані результати можуть бути використані для розробки вибухових технологій, заснованих на руйнуванні гірського масиву, приведенного попередньо в напружений стан від вибуху зарядів ВР, конструкція яких пропонується авторами даного дослідження.

Ключові слова: гірська порода, вибух, вибухове руйнування, скельне середовище, свердловинні заряди

Malykh D.Yu., Yeremenko G.I., Titov D.A. Calculating the destruction of mountain rocks by drilling charges with differentially distributed explosives in their series

Purpose. To increase the accuracy of calculations in the mathematical modeling of the interaction of well-hole charges, in which parts of the explosive substance are dispersed along the length of the well with inert material, which are detonated sequentially. The peculiarities of the dynamic load of the rock massif being blown up were analyzed, depending on the sequence of separation of these charges and their parts. This clarification relates to the improvement of the parametric calculation method and is aimed at solving the actual problem – reducing the specific consumption of explosives for the destruction of rocky massif.

Research methods. Analysis of geomechanical processes by mathematical modeling of the dynamic stresses of a rock mass by an explosion in open pits.

Scientific novelty. Clarifying the regularity of interaction of the explosion energy of borehole charges of a special design with the rock massif surrounding them.

Practical significance. Further development and industrial application of research results ensures a significant reduction in the cost price of iron ore products due to increased efficiency of drilling and blasting operations in iron ore pits.

Results. For the theory and practice of blasting, it is important to know the features of the formation and interaction of the force fields of borehole charges that detonate with a delay. The main role in the process of destruction of the mountain mass under these conditions is played by the design of blasting well charges. By selecting the masses of charges with different ratios of their parts in wells of successive rows and varying the duration of the delay between explosions, it is possible to regulate the process of explosive loading depending on the specific mining and geological conditions of blasting operations. By changing the methods of formation and the order of detonation of charges in the destroyed massif, it is possible to influence the process of destruction, knowing the peculiarities of the formation of force fields. Given the temporal and geometric characteristics of the rock massif, it can be assumed that its stressed state will fully correspond to the physical parameters of the integral zone, under which the loss of blast wave energy is minimized. The obtained results can be used for the development of explosive technologies based on the destruction of a rock mass previously brought into a tense state by the explosion of explosive charges, the design of which is proposed by the authors of this study.

Key words: rock, blasting, explosive destruction, rock massif, borehole charges.

УДК 622.646:621.86.067.2

Горбачов Ю.Г., Хруцький А.О., Громадський Вік.А., Марюсик О.С. Удосконалення важкого віброживильника з метою зниження числа зависань руди у випускній виробці

Мета. Підвищення експлуатаційної продуктивності віброживильників важкого типу, зайнятих на випуску гірничої маси з очисних блоків залізорудних шахт. Внаслідок нерівномірності гранулометричного складу відбитої руди у блоці та наявності певного відсотку шматків негабаритних розмірів випуск гірничої маси, незважаючи на інтенсифікацію процесу за допомогою вібрації, все ж таки супроводжується зависаннями та утворенням склепін у випускних виробках. Ліквідація зависань як механічним, так і підривним способами пов'язана зі значними витратами робочого часу та вибухівки, а також високою небезпекою для обслуговуючого персоналу. Зниження числа зависань руди сприятиме суттєвому підвищенню ефективності використання віброживильників та зростанню експлуатаційної продуктивності очисного блоку.

Методи дослідження. Аналіз процесу випуску гірничої маси з очисних блоків підземних рудників показує, що заміна некерованого гравітаційного випуску руди вібраційним забезпечує можливість значного його прискорення. Але

повністю позбавитися зависань та склепувань матеріалу у випускних виробках при цьому не вдається. На підставі вивчення закономірностей вібраційного витікання сипких вантажів з ємностей зроблено висновок про необхідність підвищення інтенсивності впливу робочого органу вібромашини на матеріал.

Наукова новизна. Запропоновано підвищення ступеня заглиблення робочого органу віброживильника під навал стовпа гірничої маси у випускній виробці шляхом змінення його конфігурації та використання принципу секційності.

Практична значимість. Удосконалення конструкції віброживильника дасть можливість підвищити інтенсивність динамічного впливу робочого органу машини на гірничу масу у випускній виробці, забезпечити безупинний процес її витікання та сприятиме руйнуванню утворених зависань.

Результати. Запропоновано технічні рішення для зменшення числа зависань під час вібраційного випуску руди віброживильниками важкого типу за рахунок удосконалення конструкції робочого органу.

Ключові слова: випуск руди з очисних блоків, зависання руди, експлуатаційна продуктивність, віброживильник важкого типу, вібропривод, робочий орган віброживильника у «два кута».

Horbachov Yu.G., Khrutskyi A.O., Hromadskyi V. A., Maryusik O.S. A heavy feeder improvement to reduce numbers of ore suspensions in the discharge working

Purpose. To increase the operational productivity of heavy-type vibratory feeders used for the release of mining mass from the cleaning blocks of iron ore mines. Due to the unevenness of the granulometric composition of the reflected ore in the block and the presence of a certain percentage of oversized pieces, the release of mining mass, despite the intensification of the process with the help of vibration, is still accompanied by suspensions and the formation of vaults in the output workings. The elimination of suspensions by both mechanical and explosive methods is associated with significant costs of working time and explosives, as well as significant danger for service personnel. Reducing the number of ore suspensions will contribute to a significant increase in the efficiency of the use of vibratory feeders and an increase in the operational productivity of the treatment unit.

Research methods. The analysis of release of mining mass from the cleaning blocks of underground mines shows that the replacement of the uncontrolled gravitational release of ore by vibration provides the possibility of its significant acceleration. However, it is not possible to completely get rid of suspensions and crypt formations of material in final products. Based on the study of the patterns of vibrational outflow of bulk cargo from containers, a conclusion was made about the need to increase the intensity of the impact of the working body of the vibrating machine on the material.

Scientific novelty. It is proposed to increase the degree of deepening of the working body of the vibratory feeder under the mass of the column of mining mass in the final product by changing its configuration and using the principle of sectional parts.

Practical significance. Improving the design of the vibratory feeder increases the intensity of the dynamic impact of the working body of the machine on the mining mass in the final product, ensures a continuous process of its outflow and contribute to the destruction of the formed suspensions.

Results. Technical solutions for reducing the number of suspensions during the vibration release of ore by heavy-type vibratory feeders due to the improvement of the design of the working body are proposed.

Key words: release of ore from the treatment blocks, ore hang-ups, operational performance, heavy-type vibrating feeder, vibrating drive, working body of the vibrating feeder in the "two corners".

УДК 692.21:699.844

Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Павлишак Д.З. Конструктивні рішення багатопарових легких огорожень підвищеної звукоізоляції

Мета. Розробка ефективних конструктивних рішень багатопарових легких огорожень підвищеної звукоізоляції.

Методи дослідження. Використовувався теоретичний метод дослідження. Інженерний розрахунок виконували графоаналітичним методом, у якому використовують безпосередні залежності характеристик звукоізоляції від параметрів конструкцій, що змінюються під час проектування.

Наукова новизна. Отримано показники частотних характеристик ізоляції повітряного шуму звукоізолювальних асиметричних каркасних перегородок з обшивками з гіпсокартонних листів, що забезпечують порівняно з базовими більш високу акустичну та економічну ефективність. Запропоновано рекомендації з проектування типових технічних рішень асиметричних каркасних перегородок, що забезпечують нормативний шумовий режим у приміщеннях житлових і громадських будівель, а також допоміжних будівель виробничих підприємств.

Практична значимість. Доведено можливість підвищення звукоізоляції асиметричними каркасними перегородками порівняно зі звукоізоляцією симетричними (базовими) каркасно-обшивними перегородками. Розглянуто конструктивні рішення звукоізолюючих асиметричних каркасних перегородок з обшивками з гіпсокартонних листів, що дають змогу розширити можливість застосування цих конструкцій у будівлях різного типу за рахунок підвищення їхньої звукоізоляції в нормованому діапазоні частот, при цьому зменшуючи матеріальні витрати на їхнє зведення. Запропоновано рекомендації з проектування конструкцій звукоізолюючих асиметричних каркасних перегородок з обшивками з гіпсокартонних листів.

Результати. Знайдено кількісні залежності звукоізоляції асиметричними каркасними перегородками від маси і кількості шарів обшивок у всьому нормованому діапазоні частот від 100 до 3150 Гц. Техніко-економічний аналіз вартості монтажу симетричних (базових) і асиметричних каркасних перегородок доводить ефективність застосування асиметричних каркасних перегородок як міжквартирних перегородок, перегородок між приміщеннями офісів, стін і перегородок між робочими приміщеннями допоміжних будівель виробничих підприємств. Застосування цих перегородок дасть змогу знизити витрати на монтаж. Принцип проектування таких конструкцій можна використовувати під час влаштування кабін спостереження на виробництві, шумозахисних екранів систем вентиляції та кондиціонування. На практиці можна домогтися додаткової звукоізоляції близько 3...10 дБ.

Ключові слова: багатопарові легкі огороження, звукоізоляція, каркасні перегородки, гіпсокартонні листи.

Timchenko R.O., Krishko D.A., Pavlishak D.Z. Design solutions of multilayer lightweight enclosures with increased

sound insulation

Purpose. To develop effective constructive solutions for multilayer lightweight enclosures with increased sound insulation.

Research methods. The theoretical method of research was used. The engineering calculation was performed by the grapho-analytical method, which uses the direct dependence of sound insulation characteristics on structural parameters that change during design.

Scientific novelty. Indicators of the frequency characteristics of airborne noise insulation of soundproof asymmetric frame partitions with gypsum board sheathing have been obtained, which provide higher acoustic and economic efficiency compared to the basic ones. Recommendations for the design of standard technical solutions for asymmetric frame partitions that provide a standardized noise regime in residential and public buildings, as well as auxiliary buildings of industrial enterprises are proposed.

Practical significance. The possibility of increasing the sound insulation by asymmetric frame partitions in comparison with the sound insulation by symmetric (basic) frame and cladding partitions has been proved. Constructive solutions for soundproofing asymmetric frame partitions with gypsum plasterboard sheathing are considered, which make it possible to expand the possibility of using these structures in buildings of various types by increasing their sound insulation in the normalized frequency range, while reducing the material costs of their construction. Recommendations for the design of soundproofing asymmetric frame partitions with gypsum plasterboard sheathing are proposed.

Results. Quantitative dependences of sound insulation by asymmetric frame partitions on the mass and number of layers of cladding in the entire normalized frequency range from 100 to 3150 Hz were found. The technical and economic analysis of the cost of installing symmetrical (basic) and asymmetrical frame partitions proves the effectiveness of using asymmetrical frame partitions as inter-apartment partitions, partitions between office premises, walls and partitions between working rooms of auxiliary buildings of industrial enterprises. The use of these partitions will reduce installation costs. The principle of designing such structures can be used in the construction of observation booths in production, noise protection screens for ventilation and air conditioning systems. In practice, it is possible to achieve additional sound insulation of about 3...10 dB.

Key words: multilayer lightweight enclosures, sound insulation, frame partitions, gypsum plasterboard sheets.

УДК 338.3

Андрущенко Г. І., Чупринов Є. В., Кассім Д. О., Григор'єва В. Г., Ляхова І. А. Синергія економіки та металургії як основа механізму ефективного функціонування сучасного підприємства повного циклу

Мета. Вивчення та аналіз сучасних світових тенденцій на ринку чорної металургії, а також розробка нових комплексних методів та економічних заходів для взаємодії різних підрозділів одного металургійного підприємства.

Методи дослідження. У дослідженні використано наступні методи: організаційно-економічні – при управлінні економічною ефективністю процесу виробництва на сучасному металургійному підприємстві; аналітичні – при пошуку та винайденні нових засобів управління технологічним процесом виробництва сталі, нового параметру киснево-конвертерного процесу.

Наукова новизна. Запропоновано інноваційний підхід до організації роботи сучасного металургійного підприємства, оснований на тісній взаємодії важливих процесів, таких як економіка, виробництво та збут готової продукції. Даний науковий підхід базується на винайденні нових шляхів впровадження новітніх металургійних технологій з мінімально можливими виробничими і невиробничими витратами, які дозволять отримати підвищення рівня економічної ефективності процесу виробництва сталі на металургійному підприємстві.

Практична значимість. Авторами розроблений новий виробничо-економічний механізм ефективної роботи металургійного підприємства, який дозволив побудувати логічний зв'язок між усіма визначальними ланками сучасного металургійного комбінату – від початкової стадії налагодження виробництва до економічної ефективності діяльності підприємства в цілому.

Результати. У даній роботі авторами проаналізовано світовий ринок металопрокату і визначено рівень конкурентоспроможності ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» в умовах ринкової кон'юнктури; віднайдено нові шляхи впровадження новітніх металургійних технологій з мінімально можливими виробничими і невиробничими витратами; розраховано економічну ефективність процесу виробництва сталі на металургійному підприємстві; розкрито нові механізми функціонування металургійного підприємства у сучасних ринкових умовах, у тому числі за рахунок синергії металургійних технологій та економіки, що в свою чергу, у сучасному висококонкурентному середовищі може стати важливим елементом ефективної взаємодії виробника та кінцевого споживача.

Ключові слова: металургія, виробництво сталі, металопрокат, технології, конкурентоспроможність, підприємство, повний цикл, економічна ефективність.

Andrushchenko H.I., Chuprynov Ye.V., Kassim D.O., Hryhorieva V.G., Liakhova I.A. Synergy of economy and metallurgy as the basis for the mechanism of efficient functioning of a modern full-cycle enterprise

Purpose. Study and analysis of modern global trends in the ferrous metallurgy market, as well as the development of new complex methods and economic measures for the interaction of different divisions of one metallurgical enterprise.

Research methods. The research used the following methods: organizational and economic - when managing the economic efficiency of the production process at a modern metallurgical enterprise; analytical - when searching for and inventing new means of management of the technological process of steel production, a new parameter of the oxygen-converter process.

Scientific novelty. An innovative approach to the organization of the work of a modern metallurgical enterprise is proposed, based on the close interaction of important processes, such as economy, production and sale of finished products. This approach is based on the invention of new ways of introducing the latest metallurgical technologies with minimal possible of production and non-production costs, which allowed to increase the level of economic efficiency of the steel production process at the metallurgical enterprise.

Practical significance. Developed a new production and economic mechanism for the efficient operation of a metallurgical enterprise, which allowed to build a logical connection between all the defining links of a modern metallurgical plant - from the initial stage of setting up production to the economic efficiency of the enterprise.

Results. Analyzed the world rolled metal market and determined the level of competitiveness of ArcelorMittal Kryvyi Rih PJSC in market conditions; new ways of introducing the latest metallurgical technologies with minimal possible of production and non-production costs were found; the economic efficiency of the steel production process at the metallurgical enterprise was calculated; new mechanisms of the operation of the metallurgical enterprise in modern market conditions were revealed, including at the expense of the synergy of metallurgical technologies and the economy, which in turn, in today's highly competitive environment, can become an important element of effective interaction between the producer and the end consumer.

Key words: metallurgy, steel production, metal rolling, technologies, competitiveness, enterprise, full cycle, economic efficiency.

УДК 624.011.1

Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Пензєв О.Ю. Кручені хрестоподібні стрижні у з'єднаннях дерев'яних конструкцій

Мета. Розроблення та дослідження нових вузлових з'єднань дерев'яних елементів на сталевих кручених хрестоподібних стрижнях, що працюють на висмикування.

Методи дослідження. У дослідженнях використано загальні методи будівельної механіки та теорії дерев'яних конструкцій.

Наукова новизна. Розглянуто кручений хрестоподібний стрижень для з'єднань дерев'яних конструкцій. Визначено оптимальні параметри запропонованого типу стрижнів, що забезпечують високу несучу здатність і легкість впровадження в масив деревини. Розроблено модель з'єднань на кручених хрестоподібних стрижнях з підтвердженням її адекватності, що дає змогу оцінювати напружено-деформований стан як запропонованих з'єднань, так і більш складних систем із застосуванням кручених зв'язків. Розглянуто методіку розрахунку вузлових з'єднань дерев'яних елементів на кручених хрестоподібних стрижнях, що працюють на висмикування.

Практична значимість. Розглянуто типи з'єднань дерев'яних конструкцій на кручених хрестоподібних стрижнях, що відрізняються ефективністю, як за витратою матеріалів, так і за трудомісткістю виготовлення. Розглянуто методіку розрахунку і рекомендацій з конструювання та виготовлення вузлових з'єднань дерев'яних елементів на кручених хрестоподібних стрижнях, що працюють на висмикування. Є можливість поліпшити техніко-економічну оцінку запропонованих з'єднань дерев'яних конструкцій.

Результати. До найбільш важливих результатів належать: виконання розробок з'єднань дерев'яних елементів на кручених хрестоподібних стрижнях, які працюють на висмикування; визначення оптимальної конструктивної форми кручених хрестоподібних стрижнів і правил їхнього розставлення в з'єднаннях; формулювання основних положень методіки розрахунку та рекомендацій щодо конструювання та виготовлення запропонованих вузлових з'єднань. Виконаний порівняльний аналіз і результати впровадження розроблених типів стрижнів у практику проектування свідчать про техніко-економічну доцільність їх застосування в дерев'яному будівництві, при цьому запропоновані вузли перевершують за основними техніко-економічними показниками відомі рішення на 12...23% залежно від типу проектуваного з'єднання.

Ключові слова: кручений хрестоподібний стрижень, вузлові з'єднання, дерев'яні елементи, напружено-деформований стан.

Timchenko R.O., Krishko D.A., Penzev O.Yu. Cruciform rods in the joints of wooden structures

Purpose. To develop and study new nodal connections of wooden elements on steel twisted cross-shaped rods working in pull-out.

Research methods. General methods of structural mechanics and the theory of wooden constructions were used in the research.

Scientific novelty. A twisted cross-shaped rod for the connections of wooden structures is considered. The optimal parameters of the proposed type of rods are determined, which provide high bearing capacity and ease of implementation in the wood massif. A model of joints on twisted cross-shaped rods was developed with confirmation of its adequacy, which makes it possible to evaluate the stress-strain state of both the proposed joints and more complex systems using twisted connections. The methodology for calculating the nodal connections of wooden elements on twisted cross-shaped rods working in pulling is considered.

Practical significance. The types of joints of wooden structures on twisted cross-shaped rods are considered, which differ in efficiency, both in terms of material consumption and labor intensity of manufacture. A method of calculation and recommendations for the design and manufacture of nodal joints of wooden elements on twisted cross-shaped rods working to pull out are considered. It is possible to improve the technical and economic assessment of the proposed connections of wooden structures.

Results. The most important results include: the development of connections of wooden elements on twisted cross-shaped rods working in pull-out; determination of the optimal structural shape of twisted cross-shaped rods and the rules for their placement in connections; formulation of the main provisions of the calculation methodology and recommendations for the design and manufacture of the proposed nodal connections. The comparative analysis and the results of the implementation of the developed types of rods into design practice indicate the technical and economic feasibility of their use in wooden construction, while the proposed nodes exceed the main technical and economic indicators of the known solutions by 12...23%, depending on the type of the designed connection.

Key words: twisted cross-shaped rod, nodal connections, wooden elements, stress-strain state.

УДК 622.788.36

Савельєв С.Г., Бабасвська О.В., Ярош Т.П., Кондратенко М.М. Оцінка методів визначення придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудування

Мета. Порівняльна оцінка достовірності результатів визначення за різними методиками придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудування.

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

Наукова новизна. На основі проведеного аналізу встановлено, що більш надійними і достовірними методами визначення придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування є такі, що базуються на застосуванні мінерально-гідрологічних констант грудкуємого матеріалу.

Практична значущість роботи полягає у отриманні висновків, які дають інформацію для практичного застосування методах оцінки придатності тонкодисперсних матеріалів до огрудкування, що мають високу представницькість результатів і не вимагають багато часу на їх визначення.

Результати роботи свідчать про те, що розробка і застосування методів визначення придатності тонко дисперсних матеріалів до огрудкування є одним з важливих напрямком розвитку теорії і технології виробництва окатишів, подальший розвиток якого пов'язаний з встановленням стандартних методів визначення мінерально-гідрологічних констант шихти, які піддаються огрудкуванню.

Ключові слова: вологемісткість, коефіцієнт, матеріал, метод, склад, окатиш, міцність

Saveliev S.G., Babaievskia O.V., Yarosh T.P., Kondratenko M.M. Evaluation of methods for determining the suitability of finely dispersed materials for pelletizing

Purpose. To compare the reliability of the results of determining the suitability of the finely dispersed materials for pelletizing by different methods.

Research methods. Logical methods of scientific research - analysis and synthesis, analogy, generalization.

Scientific novelty. Based on the analysis, it was found that more reliable and reliable methods for determining the suitability of fine materials for pelletizing are those based on the use of mineral-hydrological constants of the finely dispersed material.

Practical significance. Obtaining conclusions that provide information for the practical application of methods for assessing the suitability of fine materials for pelletizing, which have high representativeness of the results and do not require much time to determine them.

Results. The development and application of methods for determining the suitability of finely dispersed materials for pelletizing is one of the important areas of development of the theory and technology of pellet production, the further development of which is associated with the establishment of standard methods for determining the mineral-hydrological constants of pelletizing charges.

Key words: moisture capacity, coefficient, material, method, composition, pellet, strength

УДК 550.83+550.837: 550.82: 551.244: 551.495 (477.63)

Пігулевський П.Г., Свистун В.К., Єременко Г.І., Яремій С.О. Застосування дистанційних методів при дослідженні впливу техногенних споруд на поверхневі та підземні води на прикладі південного Кривбасу

Мета. Аналіз результатів застосування дистанційних (геофізичних і космічних) методів при дослідженні впливу техногенних споруд на поверхневі та підземні води на території південно-західної промислової зони Криворізького залізничного басейну та встановлення особливостей протікання гідрогеологічних процесів.

Методи дослідження. Дані гідрогеологічних, гідрологічних, інженерно-геологічних і геофізичних досліджень кінця ХХ початку ХХІ сторіччя території та інтерпретація даних космічної спектральної і радарної зйомки в комплексі з геофізичними дослідженнями, дозволила оцінити зміни фізичних процесів від денної поверхні до глибин у десятки метрів під нею.

Наукова новизна. Дослідженнями доведено, що процеси обводнювання (зневоднювання) геологічного розрізу залежать від сучасних деформацій рельєфу, які відбуваються в зонах тектонічних розломів в межах території Кривбасу, що свідчить про зміну пружно-деформаційного стану земної кори в центральній частині Українського щита. Трансрешіональний Криворізький глибинний розлом формує в кристалічному фундаменті різноманітну систему розломів і пов'язані з нею зони підвищеної проникливості.

Практична значимість. Дослідження дозволяють вирішити ряд важливі проблеми гірничої геології: визначення зв'язку поверхневих та приповерхневих вод, вплив геолого-тектонічної будови на розвиток процесів підтоплення навколо великих техногенних споруд, визначити шляхи їх ймовірної міграції.

Результати. Гідрогеологічні, інженерно-геологічні та геофізичні дослідження минулих років на території південного Кривбасу в комплексі з сучасними спостереженнями свідчать про значні зміни в гідрогеологічному середовищі за останні десятиліття. Ступінь їх мінералізації залежить від підтоку техногенних вод з Лівобережних відвалів та сезонних опадів. Комплексні дослідження показали, що моніторингові спостереження та контроль, супутниково-наземною системою дистанційних зондувань дозволяє оперативно в режимі реального часу та без порушення суцільності геологічного середовища прогнозувати зміни природно-техногенної ситуації поблизу небезпечних промислових об'єктів та споруд гірничо-металургійного комплексу і оперативно реагувати на ймовірні катаклізми.

Ключові слова: гідрогеологічна структура, техногенне підтоплення, мінералізовані води, космічні знімки, геоелектричні дослідження.

Pigulevskiy P.G., Svystun V.K., Yeremenko G.I., Yaremii S.O. Remote methods in research influence of man-made structures on surface and groundwater of the southern Kryvbas

Purpose. Analysis of the results of the application of remote (geophysical and space) methods in the study of the impact of man-made structures on surface and underground waters in the territory of the southwestern industrial zone of the Kryvyi Rih iron ore basin and establishing the peculiarities of the flow of hydrogeological processes.

Research methods. The data of hydrogeological, hydrological, engineering-geological and geophysical studies of the territory at the end of the 20th and the beginning of the 21st century and the interpretation of the data of space spectral and radar surveys in a complex with geophysical studies made it possible to assess changes in physical processes from the daytime surface to depths of tens of meters below it.

Scientific novelty. The processes of watering (dewatering) of the geological section depend on modern deformations of the relief that occur in the zones of tectonic faults within the territory of Kryvbas, which indicates a change in the elastic-

deformation state of the earth's crust in the central part of the Ukrainian shield. The transregional Kryvyorizh deep fault forms a multi-level system of faults and associated zones of increased permeability in the crystalline basement.

Practical significance. Research allows solving a number of important problems of mining geology: determining the connection of surface and near-surface waters, the influence of the geological and tectonic structure on the development of flooding processes around large man-made structures, and determining the paths of their likely migration.

Results. Hydrogeological, engineering-geological and geophysical studies of past years on the territory of southern Kryvbas, combined with modern observations, indicate significant changes in the hydrogeological environment over the past decades. The degree of their mineralization depends on the inflow of man-made waters from the Left Bank dumps and seasonal precipitation. Comprehensive studies have shown that monitoring, observation and control by a satellite-ground system of remote sensing makes it possible to predict changes in the natural and man-made situation in the vicinity of dangerous industrial facilities and structures of the mining and metallurgical complex in real time and without disrupting the integrity of the geological environment, and to respond promptly to probable cataclysms.

Key words: hydrogeological structure, man-made flooding, mineralized waters, space images, geoelectrical research.

УДК 622.7: 534

Моркун В.С., Моркун Н.В., Гапоненко А.А., Бобров Є.Ю. Застосування нелінійних ультразвукових методів для визначення характеристик залізорудної сировини

Метою дослідження є дослідження та обґрунтування і застосування ультразвукових вимірювань для визначення нелінійних характеристик гірської породи.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного та імітаційного моделювання, а також методи швидкого перетворення Фур'є для аналізу результатів ультразвукових вимірювань.

Наукова новизна полягає у теоретичному обґрунтуванні та моделюванні методів нелінійних ультразвукових вимірювань для оцінки характеристик гетерогенних середовищ.

Практичне значимість полягає в обґрунтуванні застосування нелінійних ультразвукових вимірювань для визначення структурно-текстурних особливостей гірської породи.

Результати. Взаємодія акустичного сигналу з речовиною називається «лінійною», якщо відгук матеріалу та сила вихідного сигналу змінюються лінійно залежно від сили вхідного сигналу, як у законі Гука. Більшість відомих акустичних явищ пов'язані з лінійно-пружними характеристиками матеріалу. Однак у матеріалах з деякими специфічними властивостями з'являється ряд нових «нелінійних ефектів», таких як спотворення форми акустичних хвиль через амплітудно-залежну швидкість поширення хвилі, генерація вищих гармонік, формування сумарної та різницевої частоти для кількох вхідних сигналів, акустичне перетікання, самофокусування тощо. Гірська порода, зокрема залізорудна сировина, є гетерогенним середовищем, яка має специфічні структурно-текстурні особливості та включає фазові неоднорідності типу тріщин і пір. Запропоновано метод оцінки фазової неоднорідності гірської породи, заснований на визначенні функції відображення нелінійної залежності поширення в ній акустичного сигналу, що включає формування ультразвукових синусоїдальних імпульсів фіксованої частоти, але різної амплітуди, випромінювання їх в досліджуване середовище, спектральний аналіз та обчислення функції відображення нелінійної залежності, що враховує різницю огинають прийнятих імпульсів різної амплітуди, їх гармонійне та повне спотворення, що дозволяє визначити рівень додаткового нелінійного ослаблення основної частотної складової прийнятого сигналу, який не залежить від коефіцієнта посилення підсилювача, акустичного опору середовища, характеристик розсіювання, дифракційних ефектів і визначається лише розподілом фазових неоднорідностей у гірській породі.

Ключові слова: ультразвук, вимірювання, нелінійність, моделювання, огинаюча імпульсу, спотворення.

Morkun V.S., Morkun N.V., Gaponenko A.A., Bobrov Ye.Yu. Application of nonlinear ultrasonic methods for determining the characteristics of iron ore raw materials

Purpose. To substantiate the application and modelling of ultrasonic measurements to determine the nonlinear characteristics of rock.

Research methods. Methods of analysis of national and foreign experience, methods of mathematical and simulation modelling, as well as methods of fast Fourier transform to analyse the results of ultrasonic measurements were used in the work.

Scientific novelty. The theoretical justification and modelling of methods of nonlinear ultrasonic measurements for assessing the characteristics of heterogeneous media.

Practical meaning. The exploration of nonlinear ultrasonic measurement methods for determining the structural and textural characteristics of rock.

Results. The interaction of an acoustic signal with a substance is called "linear" if the response of the material and the strength of the output signal vary linearly with the strength of the input signal, as in Hooke's law. Most of the known acoustic phenomena are associated with linear-elastic material characteristics. However, a number of new "nonlinear effects" appear in materials with some specific properties, such as distortion of the acoustic waveform due to amplitude-dependent wave propagation velocity, generation of higher harmonics, formation of total and difference frequencies for several input signals, acoustic overflow, self-focusing, etc. Rock, in particular iron ore, is a heterogeneous medium, which has specific structural and textural features and includes phase inhomogeneities such as cracks and pores. The method of estimation of phase inhomogeneity of rock based on determination of reflection function of nonlinear dependence of acoustic signal propagation in it is proposed. It includes formation of ultrasonic sinusoidal pulses of fixed frequency but different amplitude, their emission into the investigated medium, spectral analysis and calculation of reflection function of nonlinear dependence taking into account the difference of envelopes of received pulses of different amplitude, their harmonic and total distortion, which allows to determine the level of additional distortion.

Key words: ultrasound, measurements, nonlinearity, modelling, pulse envelope, distortion.

УДК 004.78

Хруцький А.О., Горбачов Ю.Г., Громадський А.С., Громадський В.А., Громадський Вік.А. Віртуальний лабораторний практикум з планування наукових досліджень

Мета. Розробка віртуальних лабораторних стендів для реалізації практичної підготовки здобувачів вищої освіти при плануванні та проведенні наукових досліджень.

Методи дослідження. У роботі використано аналіз та узагальнення досвіду відомих досліджень та розробок з впровадження віртуальних лабораторних практикумів у навчальний процес, математичне моделювання роботи вимірювальних приладів.

Наукова новизна. Розроблено математичні моделі, покладені в основу віртуальних стендів. У якості моделей використовуються відрізки ступеневих рядів Тейлора у вигляді алгебраїчних поліномів, складні нелінійні залежності з декількома локальними екстремумами, а також ступеневі залежності. Особливістю розроблених математичних моделей є забезпечення ними унікальності результатів для кожного дослідження завдяки додаванню генератор випадкових чисел для імітації похибки приладів та вимірювання.

Практична значимість. Розроблено віртуальний лабораторний практикум з дисципліни «Методи планування та проведення наукових досліджень гірничого устаткування» для здобувачів третього освітньо-наукового рівня вищої освіти. Наведено загальну схему дисципліни із застосуванням віртуального лабораторного практикуму. Розроблені віртуальні стенди що мають інтерфейс, який тотожний до цифрових панелей контрольно-вимірювальної апаратури.

Результати. Використовуючи методiku створення віртуальних лабораторних стендів при підготовці фахівців з галузевого машинобудування, розроблено віртуальний лабораторний практикум, що налічує 6 стендів, які розміщено Освітньому порталі КНУ, який базується на системі модульного об'єктно-орієнтованого динамічного навчального середовища Moodle. Віртуальний лабораторний практикум отримав схвальні відгуки від здобувачів, які проходили курс, що дає привід подальшого розвитку цього напрямку.

Ключові слова: лабораторні роботи, віртуальний лабораторний стенд, структурна схема дисципліни, віртуальна симуляція, модульне об'єктно-орієнтоване динамічне навчальне середовище.

Horbachov Yu.G., Khrutskiy A.O., Hromadskiy V. A., Hromadskiy V. A., Hromadskiy A.S. Virtual laboratory workshop on research planning

Purpose. Development of virtual laboratory stands for the implementation of practical training of higher education students in planning and conducting research.

Research methods. The paper uses the analysis and generalisation of the experience of well-known research and development on the implementation of virtual laboratory workshops in the educational process, mathematical modelling of the operation of measuring instruments.

Scientific novelty. The mathematical models underlying the virtual stands have been developed. The models used are segments of Taylor power series in the form of algebraic polynomials, complex nonlinear dependencies with several local extrema, and power law dependencies. The peculiarity of the developed mathematical models is that they ensure the uniqueness of the results for each study by adding a random number generator to simulate the error of instruments and measurements.

Practical significance. A virtual laboratory practice in the discipline "Methods of planning and conducting scientific research of mining equipment" for students of the third educational and scientific level of higher education has been developed. The general scheme of the discipline with the use of a virtual laboratory practice is presented. Virtual stands with an interface identical to the front panels of control and measuring equipment have been developed.

Results. Using the methodology of creating virtual laboratory stands in the training of specialists in industrial engineering, a virtual laboratory workshop was developed, which includes 6 stands, which are placed on the KNU Educational Portal, based on the system of modular object-oriented dynamic learning environment Moodle. The virtual laboratory workshop received favourable feedback from the students who took the course, which gives rise to further development of this area.

Key words: laboratory work, virtual laboratory bench, structural scheme of the discipline, virtual simulation, modular object-oriented dynamic learning environment.

УДК 622.1:528.7

Долгіх О. В., Долгіх Л. В. Підвищення якості цифрових зйомок при дослідженні зони зрушень від шахти ім. Колачевського

Мета. Розробка ефективного способу спостереження за деформаціями денної поверхні та спорудами, розташованими в зоні впливу підземних гірничих робіт та на прилеглих територіях, використовуючи для цього методи цифрової фотограмметрії, яка ґрунтується на отриманні даних про об'єкт на деякій відстані від нього.

Методи досліджень. Аналіз результатів експериментальних робіт на об'єктах відкритої та підземної розробки корисних копалин. В результаті досліджень деформацій на територіях шахти та кар'єру була використана методика, яка включає такі методи, як спостереження, вимірювання, обчислення, експеримент, порівняння тощо. При цьому було використано різні цифрові камери з відповідними їм характеристиками.

Наукова новизна результатів дослідження полягає в отриманні з необхідною точністю величин деформацій денної поверхні та об'єктів, розташованих на ній, завдяки запропонованій методиці виконання знімальних робіт та суворому фотограмметричному опрацюванню знімків, отриманих за результатами як аеро- та наземного знімання. Аналіз цифрових знімальних камер дозволяє зробити вибір камери, яка, завдяки своїм характеристикам, дозволяє підвищити точність шуканих величин.

Практична значимість виконаних досліджень полягає в отриманні горизонтальних та вертикальних деформацій за результатами опрацювання растрових зображень, отриманих цифровими камерами, встановленими на БПЛА чи при зніманні з «руки» з земної поверхні. За опрацьованими цифровими знімками, можна виявляти зміни, які відбулися за проміжок часу між спостереженнями, та планувати чи уточнювати розміщення на земній поверхні профільних ліній та додаткових реперів, а також визначати величини деформацій. Запропоноване фарбування у відповідні кольори шуканих величин деформацій, дозволяє наочно представляти розподіл їх по досліджуваній ділянці.

Результати. Удосконалення методики виконання знімальних робіт на об'єктах гірничодобувних підприємств, з метою дослідження горизонтальних та вертикальних деформацій, використовуючи для цього результати опрацювання аеро- та наземних цифрових знімків, отриманих відповідно з БПЛА та з земної поверхні. Встановлено, що для виконання цифрової зйомки необхідно попередньо дослідити відповідність характеристик цифрової камери вимогам, що ставляться до геометричних властивостей отриманих нею знімків, що впливає на точність визначення деформацій.

Ключові слова: цифрова зйомка, камери, деформації, зображення, гірничі об'єкти.

Dolgiuk O. V., Dolgiuk L. V. Improving the quality of digital imaging during the study of the caving zone from the mine named after Kolachevskiy

Purpose. To develop an effective method of observing the deformations of the surface and structures located in the zone of influence of underground mining operations and in the adjacent territories, using digital photogrammetry methods for this purpose, which is based on obtaining data about the object at some distance from it.

Research methods. Based on the data of the analysis results of experimental work at the objects of open and underground mineral development. As a result of studies deformations in mine and quarry areas, a methodology was used, which includes such methods as observation, measurement, calculation, experiment, comparison, etc. At the same time, various digital cameras with corresponding characteristics were used.

Scientific novelty. Obtaining with the required accuracy the magnitudes of the deformations surface and the objects located on it, thanks to the proposed method of performing shooting works and strict photogrammetric processing of the images obtained from the results of both aerial and ground shooting. Analysis of digital cameras allows you to choose a camera that, thanks to its characteristics, allows you to increase the accuracy of the required values.

Practical significance. Obtaining horizontal and vertical deformations based on the results of processing raster images obtained by digital cameras installed on UAVs or when taken "hand-held" from the earth's surface. Based on the processed digital images, it is possible to detect changes that have occurred during the time interval between observations, and to plan or specify the placement of profile lines and additional benchmarks on the earth's surface, as well as to determine the magnitude of deformations. The proposed coloring in the corresponding colors of the desired deformation values allows you to visually represent their distribution over the studied area.

Results. The improvement methodology of filming works on the objects of mining enterprises, with the aim of researching horizontal and vertical deformations, using for this purpose the results of processing aerial and terrestrial digital images obtained from UAVs and from the earth's surface, respectively. It has been established that in order to carry out digital photography, it is necessary to first examine the compliance of the characteristics of the digital camera with the requirements related to the geometric properties of the images obtained by it, which affects the accuracy of the determination of deformations.

Key words: digital survey, cameras, deformations, images, mining objects.

УДК 622.8

Гацький А.К., Гацький І.А. Синтез управління мікрокліматом в камері аварійного повітропостачання

Стаття присвячена обґрунтуванню експериментальних досліджень параметрів стану мікроклімату, та як результат проведення синтезу управління мікрокліматом в камері аварійного повітропостачання.

Мета. Створення системи управління мікрокліматом в мобільній камері аварійного повітропостачання за для утворення нормальних санітарно-гігієнічних умов в негерметичній камері аварійного повітропостачання, шляхом реалізації стабілізації концентрації кисню та температури в повітрі.

Методи дослідження. При створенні системи управління мікрокліматом в КАПП використано статистичний метод завдяки якому доведена адекватність математичної моделі повітрообміну в робочій камері КАПП, також використано метод ступінчатого обурення та метод дії релейних керуючих впливів по концентрації кисню в повітрі та величині температури повітря на вході в камеру аварійного повітропостачання.

Наукова новизна. На основі градієнтного (ступінчатого) методу синтезовано алгоритм управління повітрообміном та теплообміном в камері аварійного повітропостачання з метою створення оптимальних кліматичних умов для робітників. Шляхом експериментальних досліджень за допомогою статистичних методів доведена адекватність синтезу управління мікрокліматом в робочій камері КАПП, яка підтвердила гідродинамічну структуру близьку до ідеального перемішування повітря.

Практична значимість. Створення синтезу управління мікрокліматом в камері аварійного повітропостачання надасть можливість підтримки заданої концентрації кисню в повітрі камери аварійного повітропостачання із забезпеченням надлишкового тиску в КАПП та підтримки заданої температури повітря в камері, що надає належні умови перебування робітників в мобільній камері.

Результат. Доведена за допомогою експериментальних досліджень доцільність застосування підтримки мікроклімату в камері аварійного повітропостачання шляхом стабілізації, згідно вимог техніки безпеки концентрацій кисню у повітрі і температури повітря в камері аварійного повітропостачання, за рахунок дії релейних керуючих впливів по концентрації кисню та величині температури повітря в КАПП, що дозволить підвищити рівень безпеки та нормалізації умов життєдіяльності робітників, які знаходяться в камері.

Ключові слова: камера аварійного повітропостачання, математичне моделювання, повітрообмін, теплообмін, структурний синтез, ідентифікація параметрів, мікроклімат, кисень, повітря, надлишковий тиск, залежність концентрації.

Gatskyi A.K., Gatskyi I.A. Synthesis of microclimate control in the emergency air supply chamber

The article is devoted to the substantiation of experimental studies of microclimate parameters and, as a result, to the synthesis of microclimate control in an emergency air supply chamber.

Purpose. To create a microclimate control system in a mobile emergency air supply chamber, to create normal sanitary and hygienic conditions in a leaky emergency air supply chamber by stabilizing the oxygen concentration and temperature in the air.

Research methods. When creating a microclimate control system in the air handling unit, a statistical method was used to prove the adequacy of the mathematical model of air exchange in the air handling unit working chamber, as well as the method of step perturbation and the method of relay control actions on the concentration of oxygen in the air and the temperature of the air at the entrance to the emergency air supply chamber.

Scientific novelty. On the basis of the gradient (step) method, an algorithm for controlling air exchange and heat exchange in the emergency air supply chamber was synthesized in order to create optimal climatic conditions for workers. Through experimental studies using statistical methods, the adequacy of the synthesis of microclimate control in the working chamber of the emergency air supply chamber was proved, which confirmed the hydrodynamic structure close to ideal air mixing.

Practical significance. The creation of a synthesis of microclimate control in the emergency air supply chamber will make it possible to maintain a given oxygen concentration in the air of the emergency air supply chamber with the provision of overpressure in the air handling unit and maintain a given air temperature in the chamber, which provides proper conditions for workers in the mobile chamber.

Results. The expediency of using microclimate support in the emergency air supply chamber by stabilizing, in accordance with safety requirements, the concentration of oxygen in the air and the air temperature in the emergency air supply chamber, due to the action of relay control influences on the concentration of oxygen and the air temperature in the air supply system, which will increase the level of safety and normalize the living conditions of workers in the chamber, has been proved by experimental studies.

Key words: emergency air supply chamber, mathematical modeling, air exchange, heat exchange, structural synthesis, parameter identification, microclimate, oxygen, air, overpressure, concentration dependence.

Гірничий вісник

Науково-технічний збірник

Випуск 111

Редактор, коректор

Комп'ютерний набір, верстка

.....

Підпригора Н.П.

Підписано до друку 25.04.23 за рекомендацією Вченої Ради
Криворізького національного університету, протокол № 11 від 25.04.2023 року.
Формат 60×84/8. Ум. друк. арк. 22,32 Тираж 100 прим.
Замовл. № 11. Укр., англ.

Адреса видавництва та виготівника: 50002, Кривий Ріг, вул. Пушкіна, 44
Криворізький національний університет, науково-дослідна частина