

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет

Вісник
Криворізького національного
університету

Збірник наукових праць

Випуск 56

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.; **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.; **Кіяновський М.В.**, д-р техн. наук, проф.; **Купін А.І.**, д-р техн. наук, проф.; **Лапшин О.Є.**, д-р техн. наук, проф.; **Монастирський Ю.А.**, д-р техн. наук, проф.; **Моркун В.С.**, 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.; **Пікільняк А.В.**, канд. техн. наук, доц.; **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.М.**, д-р екон. наук, проф.; **Учитель О.Д.**, д-р техн. наук, проф.; **Шахно А.Ю.**, д-р екон. наук, доц.; **Шишкін О.О.**, д-р техн. наук, проф.; **Федоренко П.Й.**, д-р техн. наук, проф.; **Щокін В.П.**, д-р техн. наук, проф.

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

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

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

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

Випуск № 56 рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет Вченою радою Криворізького національного університету (протокол № 11 від 25.04.2023 року).

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

Кривий Ріг

Зміст

<i>Ступнік М.І., Федько М.Б., Грищенко М.А., Калініченко О.В., Калініченко В.О., Письменний С.В.</i> Вплив форми компенсаційних камер на їх стійкість, технологічні параметри та якість видобутої рудної маси	3
<i>Зеленський О.С., Лисенко В.С.</i> Розробка програмного забезпечення повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів на рудних родовищах з використанням об'ємної інтерполяції	8
<i>Yarova I.I. A., Tsyvinda N. I., Yarovy Yu. V., Bondar O. A.</i> The analysis of working environment in operation of 3D printers for fused deposition modelling	15
<i>Ковальчук В.А., Ковальчук Т.М.</i> Застосування методу динамічного програмування при виконанні магістерських кваліфікаційних робіт з економіки	21
<i>Пахомов В.І., Гірін І.В.</i> Оптимізація режиму роботи автотранспорту глибоких кар'єрів	27
<i>Shvets D.V., Karabut N.O.</i> Harnessing the power of arduino simulators for effective iot education	34
<i>Чубенко В.А., Світгарєєв Л.Н., Ярош Т.П., Хіноцька А.А.</i> Дослідження впливу режимів обтиснення на витрати енергії при холодному прокатуванні тонких листів	37
<i>Шмельцер К.О., Кормер М.В., Кассім Д.О., Ляхова І.А.</i> Керування якістю коксу для стабілізації його металургійних властивостей	42
<i>Олійник Т.А., Румницький Д.О., Скляр Л.В.</i> Сегрегація частинок при гравітаційній сепарації мінеральних агрегатів у водному середовищі	47
<i>Моркун В. С., Моркун Н. В., Гапоненко А. А., Бобров Є. Ю.</i> Методи формування ультразвукових хвиль у практиці безконтактних неруйнівних вимірювань	54
<i>Турило А.М., Короленко Р.В., Святенко С.В.</i> Фінансовий результат: сутність і оцінка його інноваційної складової для підприємств залізорудної промисловості Кривбасу з позиції змісту фінансової діяльності	62
<i>Швагер Н.Ю., Нестеренко О. В., Перчун Ю. С. Багацкова Н.В.</i> Оцінка ефективності виробничого контролю на гірничодобувних підприємствах	67
<i>Турило А.М., Турило А.А., Короленко Р.В., Короленко С.М.</i> Методологія комплексного оцінювання інноваційного розвитку і його фінансово-економічний аспект на прикладі підприємств гірничо-збагачувального профілю	73
<i>Моркун В. С., Моркун Н. В., Гапоненко А. А., Бобров Є. Ю.</i> Моделювання процесів гірничого виробництва із застосуванням характеристик акустичної емісії енергоємної контактної взаємодії	78
<i>Цопа В.А., Чеберячко С.І., Дерюгін О.В., Пищикова О.В.</i> Особливості оцінки ризику дорожньо-транспортної пригоди при автомобільних перевезеннях	86
<i>Пироженко А.В., Модло Е.О., Шерстньов Ю.В.</i> Мінімізація електричного потенціалу корпусу кар'єрного екскаватора при позаштатному торканні його ковшем контактної дроту	95
<i>Лапишин О. Є., Коваленко С.Л.</i> Підвищення безпеки праці при обслуговуванні майданчика вивантаження руди та ремонті конусних дробарок в кар'єрі	99
<i>Савін В.В., Кіріченко П.С.</i> Рекуператори як шлях підвищення ефективності систем механічної вентиляції в питанні енергозбереження будинків	104
<i>Михайленко О.Ю., Сінчук І.О., Будніков К.В., Коломіц Г.В.</i> До проблеми доцільності створення на базі головних водовідливних комплексів шахт пікових гідроакумуючих електростанцій	109
<i>Гацький А.К., Гацький І.А.</i> Математичне моделювання повітрообміну в підземних камерах аварійного повітропостачання	116
<i>Астахова Н. В., Астахов В. І.</i> Дослідження властивостей бетонів на шлакових матеріалах раціональних модифікацій для одношарових конструкцій даху з теплим горіщем та безрулонною покрівлею	122
<i>Біленко П.В., Єременко Г.І., Жуков С.О., Перегудов В.В.</i> Перспективи та чинники застосування безпілотного роботизованого автотранспорту в кар'єрах України	126
<i>Толмачов С. Т., Ільченко О. В.</i> Підвищення енергоефективності асинхронних двигунів в Україні: стан, можливості та перспективи	133
<i>Романенко А. О., Сидоренко В.Д.</i> Проведення досліджень з визначення фізико-механічних властивостей гірських порід по сейсмічних сигналах та виявлення мікроруйнувань масиву Глеюватського кар'єру	139
<i>Шахно А.Ю.</i> Стан та проблеми розвитку бізнесу в умовах інноваційної діяльності	143
<i>Кіяновський М.В., Бондар О.В., Рязанцев А.О., Чумак А.С.</i> Шляхи зменшення кількості простоїв верстатного обладнання	152
<i>Єфіменко Л.І., Тиханський М.П., Тиханська А.М.</i> Адаптивна система керування з еталонною моделлю котлоагрегату	158
<i>Гарбер В., Головань В.І., Скляр Л.В.</i> Зневоднення залізорудних концентратів та сучасні сушильні процеси	162
<i>Бойко С.М., Касаткіна І.В., Данілін О.В.</i> Аспекти реконфігурації систем електропостачання при впровадженні джерел розосередженої генерації в умовах розподільчих мереж підприємств	169
<i>Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Марінова Т.А., Ганженко В.А.</i> Взаємодія фундаментних конструкцій і нерівномірно-деформованої основи	174
<i>Долгих О. В., Кремер О. А.</i> Використання БПЛА та GPS в маркшейдерській справі	180
<i>Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Слинко Т.М., Глуханько С.А., Березка О.О., Борак Р.В.</i> Метод оцінки стану багатошарових огорожувальних конструкцій	184
АНОТАЦІЇ	191

М.І. СТУПНІК, д-р техн. наук, проф., М.Б. ФЕДЬКО, канд. техн. наук, доц.,
М.А. ГРИЩЕНКО, ст. викладач, О.В. КАЛІНІЧЕНКО, д-р техн. наук, гол. наук. співроб.,
В.О. КАЛІНІЧЕНКО, д-р техн. наук, проф., С.В. ПИСЬМЕННИЙ, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ВПЛИВ ФОРМИ КОМПЕНСАЦІЙНИХ КАМЕР НА ЇХ СТІЙКІСТЬ, ТЕХНОЛОГІЧНІ ПАРАМЕТРИ ТА ЯКІСТЬ ВИДОБУТОЇ РУДНОЇ МАСИ

Метою статті є теоретичне обґрунтування оптимальних форм і розмірів компенсаційних камер, визначення їх стійкості та впливу на якість видобутої рудної маси. Україна посідає провідне місце у світі з видобутку залізорудної сировини. Переважна частина багатих залізних руд видобувається підземним способом. Встановлено, що зі збільшенням глибини розробки продуктивність шахт падає, погіршується якість видобутої рудної маси. Причиною цього є погіршення гірничо-геологічних умов відпрацювання родовищ. Видобуток багатих залізних руд характеризується значними втратами та засміченням руди досягаючи, в окремих випадках, відповідно 14-20% і 12-18%. Дані показники втрат є наслідком того, що видобуток ведеться застарілою технікою і технологіями. В роботі досліджені та запропоновані удосконалені форми компенсаційних камер, які дозволяють збільшити об'єм компенсаційного простору, видобути більшу кількість чистої руди та підвищити якість видобутої сировини

Методи дослідження. Функціональний аналіз вимог світової металургійної промисловості до якості залізних руд підземного видобутку на шахтах України. Моделювання гірського масиву методом кінцевих елементів (МКЕ) з використанням спеціалізованої комп'ютерної програми Ansis 2021-P2.

Наукова новизна. Встановлені нові залежності впливу форми компенсаційних камер на їх стійкість, технологічні параметри та якість видобутої рудної маси.

Практична значимість. Застосування компенсаційних камер високої стійкості дасть можливість збільшити їх об'єм, що дозволить підвищити кількість вилученої чистої руди, зменшити її засмічення та досягти зростання якості видобутої рудної маси, що матиме позитивний вплив на підвищення її ціни та конкурентоспроможність товарної продукції.

Результати. Доведено, що найвищу стійкість має вертикальна компенсаційна камера трапецієвидної форми, яка буде стійкою у діапазоні усіх розглянутих глибин (1400-2000 м) навіть у рудах невисокої міцності та стійкості. Дещо меншу стійкість мають вертикальні компенсаційні камери та камери склепистої форми, де вивали різної інтенсивності будуть мати місце в нижній частині оголень у рудах низької міцності на глибинах понад 1750 м

Ключові слова: залізна руда, підземна розробка, компенсаційні камери, напружено-деформований стан, стійкість, якість.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-3-8

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями На сьогоднішній день Україна володіє одними з найбільших у світі запасів залізних руд [1, 2]. Багаті залізні руди відпрацьовують підземним способом. Основною проблемою підземної розробки родовищ є зниження якості видобутої сировини зі зниженням глибини розробки [6, 7, 12].

Встановлено, що повнота вилучення відбитої руди та зниження її якості є факторами, які суттєво впливають на економічні результати підземної розробки. Відомо, що на сьогодні відпрацювання залізорудних родовищ підземним способом в Кривбасі здійснюється з втратами і засміченням руди на рівні, відповідно, 14-20% і 12-18%. Внаслідок цього втрачається до 20% залізорудної сировини, зосередженої в надрах [7, 12].

Такі високі показники втрат і засмічення руди зумовлені в значній мірі застарілою технікою та технологією гірничих робіт. Технології розробки, які дозволяють максимально знизити рівень втрат та засмічення відбитої руди характеризуються підвищеною собівартістю і застосовуються лише в особливо складних гірничотехнічних умовах та при видобутку руд більшої цінності.

Отже, досягнення максимальної ефективності підземної розробки може бути забезпечене за рахунок встановлення оптимального співвідношення між показниками вилучення руди і величиною допустимих витрат при її видобутку.

Встановлено, що підвищення якості видобутої руди можна досягти за рахунок збільшення об'єму компенсаційних камер, що можливе лише за умови забезпечення їх стійкості. Це дозволить збільшити кількість вилученої чистої руди з них, зменшити засмічення руди та досягти зростання якості видобутої рудної маси. Всі ці заходи матимуть позитивний вплив на підвищення ціни та конкурентоспроможність товарної продукції.

Аналіз досліджень і публікацій. Як відомо, компенсаційні камери застосовують при виконанні систем розробки з обваленням руди і вміщуючих порід для забезпечення компенсації збільшення об'єму руди при її масовому обваленні [3,4].

Такі системи, як відомо, застосовують на шахтах в умовах недостатньої міцності та стійкості руди та вміщуючих порід. Відпрацювання залізородних покладів в Кривбасі здійснюють в основному в інтервалі глибин 1200-1400 м з подальшим поглибленням до 1800 – 2000 м. Таким чином, в умовах негативного прояву гірського тиску на глибоких горизонтах постає питання вибору найбільш раціональної форми компенсаційних камер [12–14].

Встановлено, що форма компенсаційних камер суттєво впливає на напружено-деформований стан (НДС) гірського масиву, а відповідно й на стійкість оголень та компенсаційних камер у цілому [4,12–14]. Тому дослідження напружено деформованого стану масиву вкрай важливі як на стадії проектування, так і в процесі розробки родовищ.

На практиці застосовують оперативну оцінку величини діючих напружень в масиві та прогнозують характер їх зміни при утворенні компенсаційних камер [5,8]. Дана інформація дозволяє оцінити вихідні дані для вдосконалення і розробки нових форм компенсаційних просторів, здійснити вибір оптимальних параметрів компенсаційних камер і визначити раціональну технологію їх утворення [9–11].

Постановка задачі. Отже, метою представленої роботи є теоретичне і експериментальне обґрунтування оптимальних форм і розмірів компенсаційних камер, визначення їх стійкості та впливу на якість видобутої рудної маси.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені наступні задачі:

виконано аналіз досліджень і публікацій згідно теми досліджень;

обґрунтовано методи досліджень;

представлені результати досліджень та зроблені відповідні висновки.

Основна ідея представленої роботи полягає у пошуку такої оптимальної форми компенсаційних просторів, яка б давала можливість уникнути утворення зон критичних стискуючих напружень та знизити можливість руйнування оголень компенсаційних камер. Необхідно також уникати виникнення зон розтягуючих напружень, які є небезпечними з огляду на те, що межа міцності гірських порід на розтягування є на порядок меншою від межі їх міцності на стискання.

В представленій роботі для моделювання гірського масиву був використаний метод кінцевих елементів (МКЕ) з використанням спеціалізованої комп'ютерної програми Ansis 2021-P2.

Згідно з умовами досліджень, представлених в статті, були опрацьовані моделі з наступними формами компенсаційних камер: вертикальною, трапецієвидною та склепистою. Для коректного порівняння розміри компенсаційних камер різної форми були однаковими.

Для кожної форми компенсаційної камери були розроблені кінцево-елементні моделі, які відповідають реальним формам компенсаційних просторів. Розмір кінцевих елементів становить 2 м.

Для дослідження впливу міцності руди на напружено-деформований стан масиву і стійкість камер в моделі закладали 3 типи руд: міцністю 3 - 5 (середня 4), 4 - 6 (середня 5) та 5 - 7 (середня 6) балів за шкалою проф. М.М. Протод'яконова.

Основні фізико-механічні властивості руди та обвалених порід приведені у табл. 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості руди і обвалених порід

Параметри	Один. виміру	Руда			Обвалені породи
		1Р (f=3-5)	2Р (f=4-6)	3Р (f=5-7)	
Модуль Юнга	МПа	22000	25000	28000	5000
Питома вага	кг/м ³	3700	3650	3600	2300
Межа міцності на стискання	МПа	30	40	50	4
Межа міцності на розтягнення	МПа	3	4	5	0.2
Коефіцієнт Пуассона		0.30	0.28	0.26	0.24

Величини тиску обвалених порід на рудний масив P_1 , P_2 і P_3 відповідають гірничотехнічним умовам відпрацювання родовищ Кривбасу на глибині, відповідно, 1400, 1750 і 2000 м і приведені у табл. 2.

Тиск обвалених порід на гірський масив при комп'ютерному моделюванні

Параметр	Один. виміру	P1	P2	P3
Тиск обвалених порід на масив вертикальний/бічний	МПа	8,2/29	9,7/3,4	11,5/4

Моделювання було реалізовано на комп'ютері HP 250 з процесором Intel I5-1135G7, ОЗП 16 ГБ з операційною системою Windows 10 pro x64.

Викладення матеріалу та результати. При визначенні об'єму компенсаційної камери необхідно враховувати кількість та коефіцієнт розпушення руди при її масовому обваленні. Враховуючи те, що компенсаційна камера знаходиться в рудному масиві і не контактує з пустими породами, доцільно збільшити об'єм компенсації для збільшення кількості вилученої чистої руди. Збільшуючи питому вагу високоякісної чистої руди, яка буде вилучена з компенсаційної камери при її утворенні, ми підвищуємо якість видобутої рудної маси у цілому по блоку (панелі).

На сьогоднішній день шахти Кривбасу застосовують класичні форми компенсаційних камер: горизонтальну, вертикальну та похилу. Багато науково-технічних розробок було присвячено пошуку інших, більш досконалих форм. Серед останніх можна відзначити трапецієвидну, шатрову, траншейну, склеписту та інші форми. Основна ідея таких пошуків полягає у визначенні такої форми, яка б давала можливість уникнути утворення зон надвисоких стискуючих напружень, які, як правило, концентруються навколо кутових зон камер. Крім того, форма камер повинна знижувати вірогідність утворення зон розтягуючих напружень, які є небезпечними з огляду на те, що межа міцності більшості залізних руд практично на порядок менша від межі їх міцності на стискання.

Відповідно до цього авторами запропоновано декілька оригінальних варіантів форм компенсаційних камер, для яких були проведені дослідження їх стійкості за допомогою комп'ютерного моделювання. До порівняння обрано стандартний варіант вертикальної компенсаційної камери, який є найбільш стійким серед класичних варіантів.

Серед запропонованих авторами варіантів досліджено варіанти з трапецієвидною та склепистою формою компенсаційних камер.

На рис. 1 представлені результати моделювання та ізолінії головних напружень σ_1 гірського масиву при формуванні в панелі вертикальної прямокутної компенсаційної камери у рудах різної міцності (P1, P2 і P3).

Розподіл поля напружень є характерним для камер такої форми: зони концентрації високих стискуючих напружень зосереджені у кутах камери, а зони понижених стискуючих напружень розташовані у центральній частині покрівлі та вертикальних оголень камери.

З рисунків видно, що на однаковій глибині величини напружень при різній міцності руди практично не відрізняються поміж собою. Водночас спостерігається суттєвий вплив глибини робіт на НДС масиву. Але рівень максимальних стискуючих напружень є на 15-20% меншим, ніж для аналогічних умов (однакової міцності руди та глибини робіт) горизонтальної компенсаційної камери, що свідчить про вищу стійкість вертикальної компенсаційної камери. Лише на глибині 1750 м при міцності руди 3-5 балів у верхніх кутах камери можуть бути невеликі вивали, а на глибині 2000 м обсяги вивалів призведуть до руйнування стелі над камерою та її заповнення налягаючими обваленими породами. У рудах більшої міцності камери будуть стійкими у всьому діапазоні розглянутих глибин.

Величина максимальних головних напружень в гірському масиві при формуванні вертикальної компенсаційної камери визначається за формулою

$$\sigma_1 = 21,399e^{0,1537H_p};$$

$$R^2 = 0,9997.$$

де σ_1 – величина максимальних головних напружень; H_p – глибина розробки родовища, м; R^2 – величина достовірності апроксимації.

На рис. 2 представлені результати моделювання та ізолінії головних напружень σ_1 гірського масиву при утворенні в панелі вертикальної прямокутної компенсаційної камери у рудах різної міцності.

На рис. 2 ми бачимо практично аналогічний характер розподілу ізоліній, але значно менший (на 25-30% у порівнянні з попереднім варіантом) рівень максимальних стискуючих напружень. Ці напруження мають місце у найбільш проблематичних верхніх кутах вертикальної

трапецієвидної компенсаційної камери, що можливо пояснити значно меншим прогоном покрівлі камери. Внаслідок цього компенсаційні камери такої форми будуть стійкими на всіх розглянутих глибинах навіть у рудах мінімальної (3-5 балів) міцності.

Величина максимальних головних напружень в гірському масиві при формуванні трапецієвидної компенсаційної камери визначається за формулою

$$\sigma_1 = 18,739e^{0,013H_p};$$

$$R^2 = 0,9877.$$

Дещо меншу стійкість у порівнянні з цим варіантом, але кращу у порівнянні з вертикальною прямокутною, має вертикальна склеписта камера (рис. 3), де рівень максимальних стискуючих напружень займає проміжне значення.

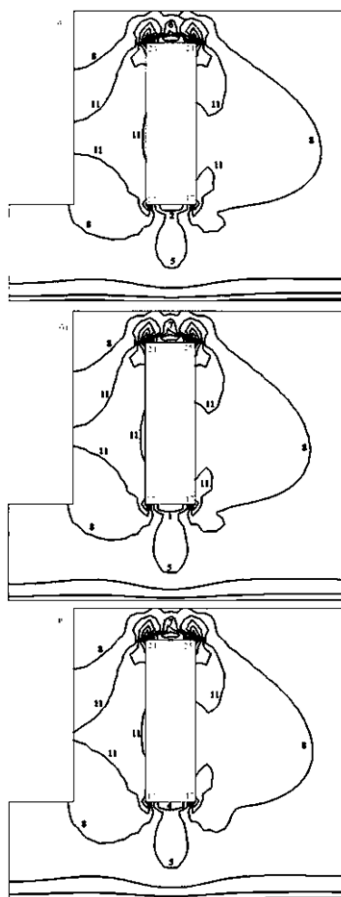


Рис. 1. Ізолії головних напружень σ_1 гірського масиву при утворенні в панелі вертикальної прямокутної компенсаційної камери: тиск обвалених порід Р1, відповідно руди міцністю: а – 3-5; б – 4-6; в – 5-7 балів

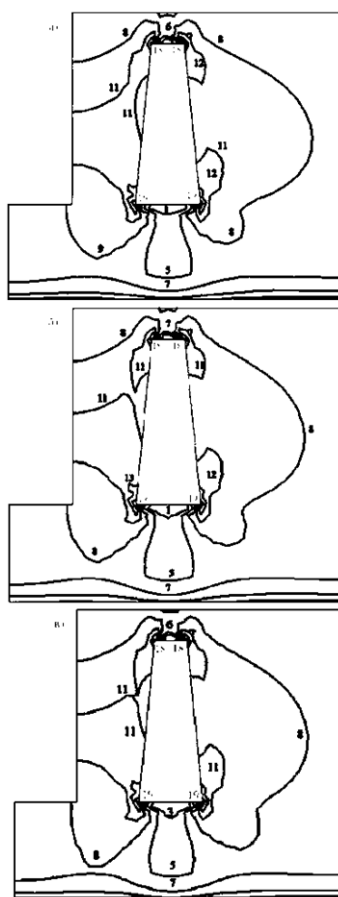


Рис. 2. Ізолії головних напружень σ_1 гірського масиву при утворенні в панелі вертикальної трапецієвидної компенсаційної камери: тиск обвалених порід Р1, відповідно руди міцністю: а – 3-5; б – 4-6; в – 5-7 балів

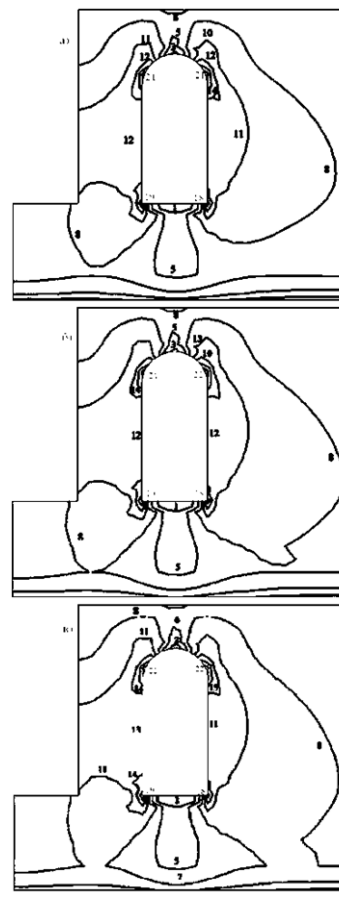


Рис. 3. Ізолії головних напружень σ_1 гірського масиву при утворенні в панелі вертикальної склепистої компенсаційної камери: тиск обвалених порід Р1, відповідно руди міцністю: а – 3-5; б – 4-6; в – 5-7 балів

Величина максимальних головних напружень в гірському масиві при формуванні склепистої компенсаційної камери визначається за формулою

$$\sigma_1 = 18,667e^{0,165H_p};$$

$$R^2 = 0,9998.$$

Це можна пояснити, з одного боку, відсутністю у верхній частині камери кутових зон, з іншого – більшим, у порівнянні з трапецієвидною камерою, прогоном її покрівлі. Внаслідок цього лише при мінімальній розглянутій міцності руди на глибині 2000 м у п'ятах склепіння можливі відносно невеликі вивали, які не несуть загрози її руйнування.

При більшій міцності руди камери такої форми також будуть стійкими на глибині до 2000 м включно.

Висновки та напрямок подальших досліджень. На підставі виконаного моделювання напружено-деформованого стану гірського масиву навколо компенсаційних камер різної форми та його впливу на їх стійкість можна зробити наступні висновки:

рівень напружено-деформованого стану рудного масиву навколо компенсаційних камер при невеликій різниці у міцності руди головним чином залежить від глибини робіт, а на їх стійкість впливатиме величина напружень у конкретних умовах та фізико-механічні властивості руди, що напряму залежать від її міцності;

найвищу стійкість у порівнянні з усіма іншими має вертикальна компенсаційна камера трапецієвидної форми, яка буде стійкою у діапазоні усіх розглянутих глибин навіть у рудах міцністю 3-5 балів;

меншу стійкість мають вертикальна компенсаційна камера склепистої форми, де незначні вивали будуть у п'ятах склепіння камери в рудах міцністю 3-5 балів на глибині 2000 м;

дещо поступається вищезазначеним стандартна вертикальна компенсаційна камера прямокутної форми, де проблеми зі стійкістю будуть у рудах міцністю 3-5 балів на глибині 2000 м;

з огляду на виконані дослідження та практичний досвід роботи шахт Кривбасу, які здійснюють видобування багатих залізних руд, доцільно, на наш погляд, більш широке застосування запропонованих форм компенсаційних камер, зокрема вертикальної трапецієвидної та склепистої форми;

застосування компенсаційних камер високої стійкості дає можливість збільшити їх об'єм навіть в рудах нижче середньої стійкості, що дозволить збільшити кількість вилученої чистої руди, зменшити її засмічення та відповідно досягти зростання якості видобутої рудної маси, що матиме позитивний вплив на підвищення її ціни та конкурентоспроможності товарної продукції на світовому ринку залізорудної сировини.

Список літератури

1. Геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин України та проблеми надрокористування (20 років ДКЗ): зб. наук. праць / За ред. Г.І. Рудько. Київ–Чернівці: Букрек, 2013. 308 с.
2. U.S. Geological Survey, Mineral Commodity Summaries, January 2022. <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022.pdf>.
3. **Ступнік М.І., Калініченко В.О., Музика І.О., Калініченко О.В.** [та ін.]. Інформаційні технології – складова процесів моніторингу та керування напружено-деформованим станом масиву / Розробка родовищ: щорічний наук.-техн. зб. Дніпропетровськ: Літограф, 2015. С. 175–181.
4. **Stupnik, M., Kalinichenko, V., Kalinichenko, O., Muzyka, I., Fedko, M., Pysmennyi, S.** Information technologies as a component of monitoring and control of stress-deformed state of rock mass / Mining of Mineral Deposits, 2015. 9(2). P.175-181. <https://doi.org/10.15407/mining09.02.175>.
5. **Сашурин А.Д., Беликов В.Е.** Проблемы устойчивости подземных и наземных сооружений в зоне тектонических нарушений / Вопросы осушения, горнопромышленной геологии и охраны недр: Материалы международного симпозиума. Белгород: ВИОГЕМ, 2003. С. 206–216.
6. **Балута А.М., Борисенко В.Г.** Прогнозная оценка физико-механических свойств горных пород Кривбасса. К.: Наукова думка, 1972. 88 с.
7. **Скляр Л.В.** Повышение качества бедных кусковых руд шахтной добычи Кривбасса методом отсадки/ **Скляр Л.В., Николаенко К.В., Олейник Т.А.** // Качество минерального сырья.- Кривой Рог:Минерал.-2005.-С.87-89.6. **Насонов И.Д.** Моделирование горных процессов. М. : Недра, 1978. 256 с.
8. **Кузнецов Г.Н., Будько М.Н., Филиппова А.А.** Изучение проявлений горного давления на моделях. М. : Углетехиздат, 1959. 283 с.
9. **Кирпичев М.В.** Теория подобия. М. : Академия Наук СССР, 1953. 95 с.
10. Методические указания по исследованию проявлений горного давления на моделях из эквивалентных материалов. Л. : Изд. ВНИМИ, 1976. 83 с.
11. **Глушихин Ф.П.** Моделирование в геомеханике. М. : Недра, 1991. 240 с.
12. **Калініченко О.В.** Розвиток наукових основ управління напружено-деформованим станом масиву при формуванні підземних виробок: дис... докт. техн. наук: 05.15.02 / Калініченко О.В. – Дніпро, 2020. 405 с.
13. **Stupnik M.I., Kalinichenko V.O., Fedko M.B., Kalinichenko O.V.** Investigation into crown stability at underground leaching of uranium ore / Науковий вісник НГУ. Дніпропетровськ, 2018. № 6. С.20-25. <https://doi.org/10.29202/nvngu/2018-6/5>.
14. **Stupnik N., Kalinichenko V., Kalinichenko E., Muzika I., Fed'ko M., Pis'menniy S.** The research of strain-stress state of magnetite quartzite deposit massif in the condition of mine "Gigant-Gliboka" of central iron ore enrichment works (CGOK) / Metallurgical and mining industry, 2015. No.7. P.377-383. http://www.metaljournal.com.ua/assets/Journal/english-edition/MMI_2015_7/060Stupn/.

О.С. ЗЕЛЕНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., В.С. ЛИСЕНКО, канд. екон. наук, доц.
Державний університет економіки і технологій

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОВНОГО ПІДРАХУНКУ ЗАПАСІВ МЕТОДОМ ВЕРТИКАЛЬНИХ ПЕРЕРІЗІВ НА РУДНИХ РОДОВИЩАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБ'ЄМНОЇ ІНТЕРПОЛЯЦІЇ

Мета. Розробка методики та програмного забезпечення повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів з використанням моделювання денної поверхні кар'єру та вперше запропонованої об'ємної інтерполяції для рудних родовищ.

Методи дослідження. Методика реалізації повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів складається з наступних етапів: обробка свердловин детальної розвідки; побудова поверхонь кар'єру на початок і кінець відпрацювання; отримання контурів вертикальних перерізів; оконтурювання (визначення площ і якісних показників типів руд) в вертикальних перерізах; повний підрахунок запасів.

Наукова новизна. Вперше запропоновано використання об'ємної інтерполяції у 3D-просторі. По кожному вертикальному перерізу формується контур відпрацювання, який покривається інтерполяційною сіткою. Кожен вузол сітки визначається у 3D просторі відносно найближчих кернів свердловин сфери заданого радіусу пошуку. Це дозволяє підвищити оперативність та точність розрахунків. Такий підхід дозволяє враховувати рельєф поверхонь на відміну від кубічних моделей, які застосовуються у стандартних закордонних пакетах.

Практична значимість. Запропонована методика реалізації методів вертикальних перерізів для повного підрахунку запасів, яка може бути використана на кар'єрах Криворізького басейну. Вона представлена на прикладі кар'єру Південного ГЗКа. Відповідне програмне забезпечення може бути використано на родовищах зі складною структурою.

Результати. У якості інструментарію з розробки програмного забезпечення вибрано мову C++ на базі бібліотеки MFC інтегрованого середовища Microsoft Visual Studio 2019. Для обробки баз даних використано технологію ADO, для роботи з 3D-графікою – відкриту графічну бібліотеку OpenGL. Крім того, розроблено 3D-модуль аналізу кожного вузла сітки відносно найближчих кернів свердловин та організоване поповнення результуючої інформації по довільним профілям кар'єру, які задаються двома параметрами: відстань між профілями та кут нахилу. Це дає можливість порівняти результати при різних параметрах кутів та відстані між профілями та оцінити отримані результати.

Ключові слова: В-сплайн, NURBS-поверхня, повний підрахунок запасів, інтерполяція, OpenGL.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-8-15

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Ефективність розвитку відпрацювання та перспективного планування гірничих робіт на рудних кар'єрах залежить від точності повного (генерального) підрахунку запасів, що вимагає значних трудовитрат.

Аналіз досліджень та публікацій. Повний підрахунок запасів достатньо трудомісткий процес. Використання зарубіжних програмних пакетів не завжди ефективно для складноструктурних родовищ. У цих пакетах використовуються геостатистичні методи або методи зворотних відстаней на інформаційній основі блокових моделей. Геостатистичний метод може мати нестійкі варіограми, що призводить до значної похибки. Метод зворотних відстаней, який використовується для оцінки якості в центрі блоків, також не прийнятний при складній структурі родовища, оскільки для оконтурювання рудних тіл в ряді випадків недостатньо тільки якісних показників по кернах. Для таких умов доцільно використання традиційних методів горизонтальних і вертикальних перерізів з урахуванням їх модифікацій, моделювання денної поверхні кар'єру при повній автоматизації розрахунків.

Постановка задачі. Для рудних родовищ розробити методику та програмне забезпечення повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів з використанням моделювання денної поверхні кар'єру та вперше запропонованої об'ємної інтерполяції.

Викладення матеріалу та результати. Інформаційною основою для повного підрахунку запасів є цифрові моделі кар'єру (ЦМК) на початок і кінець відпрацювання, база даних (БД) по розвідувальних свердловинах, а також дані за профілями. ЦМК містять координати верхньої і нижньої брівки уступів кар'єру. База даних по розвідувальних свердловинах включає: дані координат усть свердловин, дані кернового опробування, дані по інклінометрії (азимутальні кути і кути нахилу свердловини). Дані кернового опробування по кожній свердловині містять інформацію: номер, інтервал опробування, результати опробування за якісними показниками. Крім того,

в таблиці БД виділено поле для кодування типу руди в інтервалі опробування. Це поле буде заповнюватися в процесі автоматизації розрахунків.

Запропонована методика реалізації методів вертикальних перерізів для повного підрахунку запасів, яка може бути використана на кар'єрах Криворізького басейну. Вона представлена на прикладі кар'єру Південного ГЗКа. Реалізація програмного забезпечення повного підрахунку запасів за даною методикою виконана на Visual C++ для ОС Windows. Для побудови тривимірної графіки використовуються інструментальні засоби відкритої графічної бібліотеки OpenGL. Це програмне забезпечення може бути використано на родовищах зі складною структурою.

Методика реалізації повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів складається з наступних етапів [1, 4]:

1. Обробка свердловин детальної розвідки.
2. Побудова поверхонь кар'єру на початок і кінець відпрацювання.
3. Отримання контурів вертикальних перерізів.
4. Оконтурювання (визначення площ і якісних показників типів руд) в вертикальних перерізах.
5. Повний підрахунок запасів.

На першому етапі обробляються всі глибокі свердловини. За вихідними даними глибоких колонкових свердловин детальної розвідки здійснюється розрахунок потужностей і змісту різних типів руд і порід, що вміщують по уступах кар'єру з урахуванням встановлених кондицій.

У модулі обробки глибоких свердловин передбачений контроль і аналіз вихідної інформації по опробуванню і інклінометрії. Здійснюється розрахунок по кожній свердловині детальної розвідки, при якому заданий інтервал опробування відноситься до руди або порожньої породи з урахуванням встановлених кондицій. При цьому для похилих свердловин довжини проб перераховуються з урахуванням кута нахилу свердловини. Можна отримати проекцію свердловини на довільний профіль (вертикальну площину). На рис. 1. показана проекція свердловини на профіль з азимутним кутом 80^0 . Темним кольором виділена руда, світлим – порожня порода. Крім того, передбачений аналіз опробування за кількісними показниками. На рис. 2. показана зміна якісних показників по глибині свердловини.

Після детальної обробки кожної глибокої свердловини відбувається їх запис в таблицю БД по свердловинах детальної та експлуатаційної розвідок по кожному горизонту. При цьому формується стільки записів, скільки уступів проходить глибока свердловина. Координати для кожного запису (координати точки перетину глибокої свердловини з площиною горизонту) обчислюються за формулами

$$X = X_0 + \sum_{i=1}^N \ell_i \sin \theta_i \cos \alpha_i ; \quad Y = Y_0 + \sum_{i=1}^N \ell_i \sin \theta_i \sin \alpha_i ,$$

де X_0, Y_0 – координати устя глибокої свердловини; ℓ_i – довжина i -го інтервалу виміру; θ_i і α_i – відповідно кут нахилу і азимутальний кут в i -му інтервалі вимірювання. Якісні показники обчислюються як середньозважені величини по переліченим довжинах проб, які знаходяться на висоті уступу вище проектного горизонту. Результати записів свердловин по горизонтах кар'єру використовуються для повного підрахунку запасів методом горизонтальних перерізів.

На другому етапі, використовуючи математичний апарат В-сплайнів, по вихідним даним брівок уступів цифрових моделей кар'єру будуються поверхні кар'єру відповідно на початок і кінець відпрацювання.

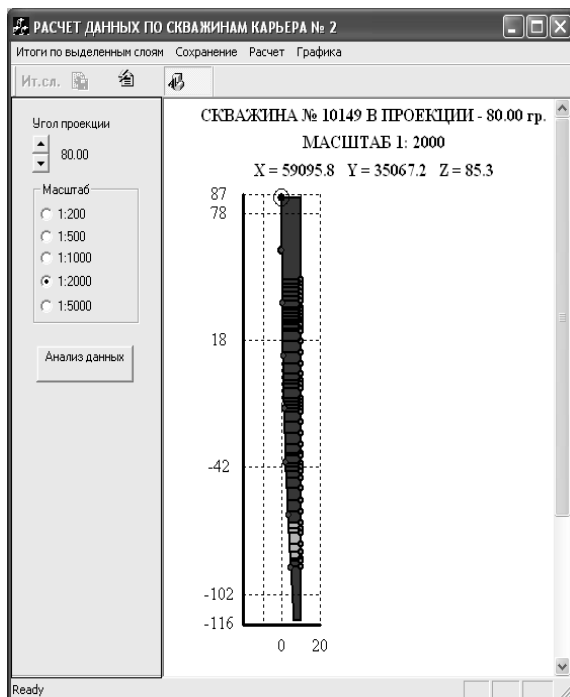


Рис. 1. Результат розрахунків по свердловині з врахуванням кондицій

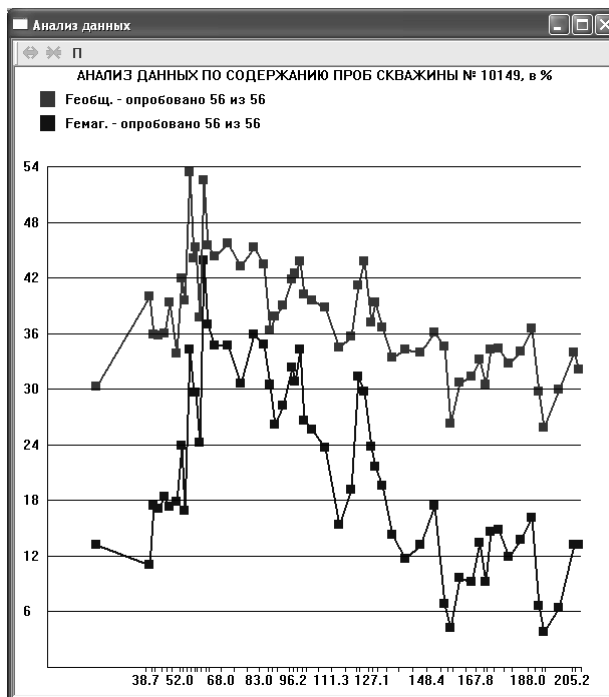


Рис. 2. Аналіз даних свердловини по вмісту проб

Перевагою побудови поверхні кар'єру є наявність в якості вихідних даних тільки координати X , Y , Z верхньої та нижньої брівок уступу, які містяться в ЦМК.

Результат отримання поверхні кар'єру на початок відпрацювання наведено на рис. 3.

Таким же чином будувється поверхня на кінець відпрацювання. Це може бути план кар'єру на будь-яку іншу дату або проектні межі кар'єру. У нашому випадку це проектні межі кар'єру, тобто до яких пір планується вести видобуток руд в даному кар'єрі [2, 3].

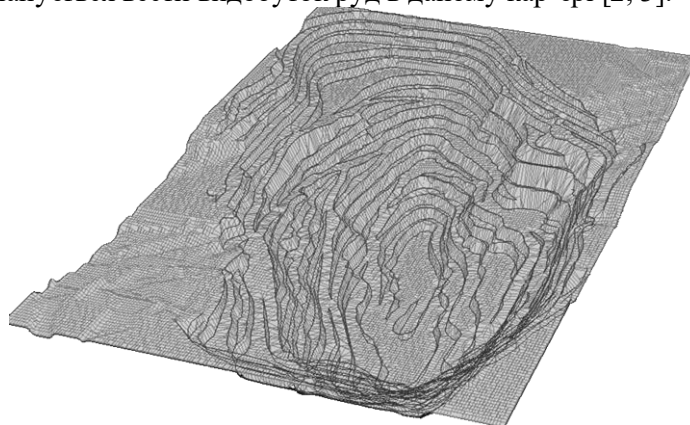


Рис. 3. Поверхня кар'єру на початок відпрацювання, побудована з використанням В-сплайнів

На наступному етапі визначаються контури вертикальних перерізів. Кожен вертикальний переріз зверху обмежений лінією перетину профілю з поверхнею кар'єру на початок періоду, бічними і нижньою лінією перетину профілю з поверхнею кар'єру на кінець періоду (проектні межі кар'єру).

Спочатку використовуються профілі, які надаються проектними організаціями. На профілях виділені контури рудних тіл, проектні межі кар'єру і свердловини. В результаті перетину профілю з поверхнями кар'єру на початок і кінець відпрацювання отримуємо контур для пошуку запасів.

Розглянемо перетин поверхні кар'єру заданим профілем більш детально. Слід зауважити, що при побудові поверхні кар'єру з використанням В-сплайнів, чотирикутник не завжди буде лежати в одній площині. Отже, доцільно розбити просторовий чотирикутник на два трикутника.

На рис. 4. в збільшеному вигляді покажемо в плані ті трикутники, які перетинає профіль. Кожен з трикутників має відповідне рівняння площини $Ax + By + Cz + D = 0$.

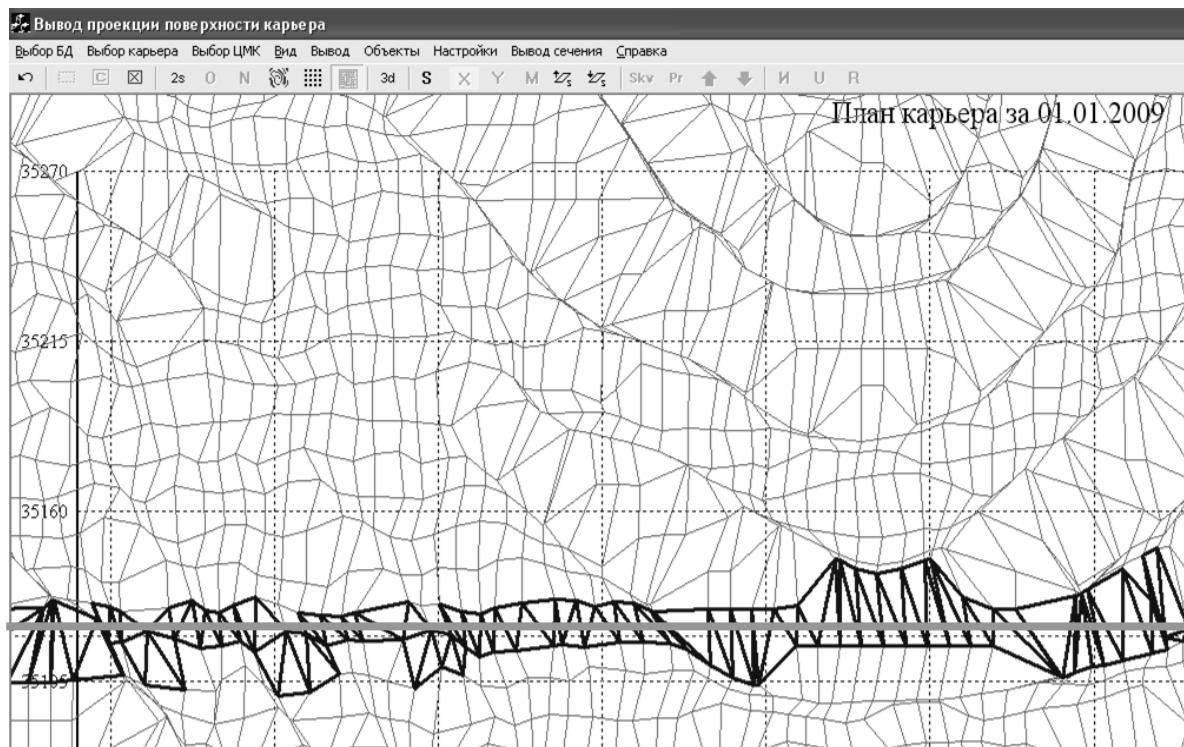


Рис. 4. Виведення трикутників, які перетинають профіль

Коефіцієнти рівняння розраховуються по наступним формулам

$$\begin{aligned} A &= (y_1 - y_3)(z_2 - z_3) - (y_2 - y_3)(z_1 - z_3); \\ B &= (x_2 - x_3)(z_1 - z_3) - (x_1 - x_3)(z_2 - z_3); \\ C &= (x_1 - x_3)(y_2 - y_3) - (x_2 - x_3)(y_1 - y_3); \\ D &= -(x_3A + y_3B + z_3C). \end{aligned}$$

Спочатку знаходимо в плані координати перетину профілю і сторони трикутника – x , y , використовуючи формулу перетину прямих. Потім не представляє складності отримати координату z наступним чином

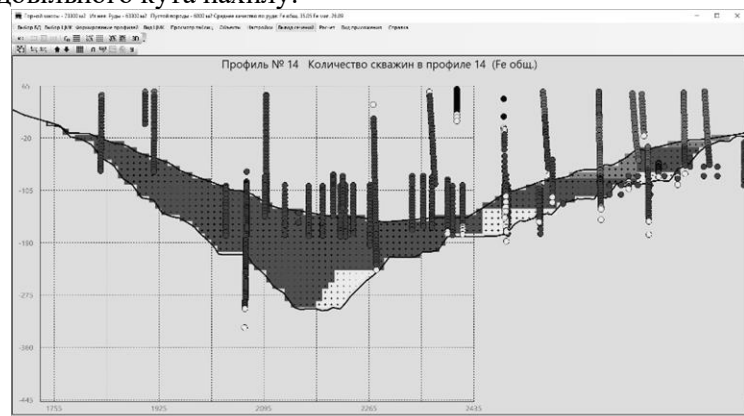
$$z = -(Ax + By + D)/C.$$

Вертикальні перерізи покриваються інтерполяційної сіткою. У кожному вузлі сітки оцінюється тип руди і якісні показники по найближчому керну глибокої свердловини. Інформація за типами руд є базисом для автоматизованого підрахунку запасів методом вертикальних перерізів в довільних профілях і дає можливість зробити порівняльний аналіз методики повного підрахунку запасів у профілях при завданні довільного кута нахилу.

Результат інтерполяції наведено на рис. 5.

Рис. 5. Результат інтерполяції з використанням контурів рудних тіл по перерізу № 14

Світлим кольором на рисунку виділена порожня порода, темним кольором – руда. Інтерполяція для кожного типу руди робиться щодо тільки тих кернів глибоких свердловин, які відносяться до певного типу руди (залізистий горизонт). Сам тип руди визначається по найближчому керну свердловини.



По заданим перерізам вперше запропоновано застосування методу об'ємної інтерполяції, який дозволяє в 3D-просторі визначити значення якісного показника та з максимальною ефективністю вдосконалює типовий метод вертикальних перерізів.

По кожному вузлу у 3D-просторі розраховується показник Feob або Femag наступним чином, як показано на рис. 6.

Це відбувається за наступною формулою

$$Z_{ij} = \sum_{k=1}^N Z_k d_k^{-\alpha} / \sum_{k=1}^N d_k^{-\alpha},$$

де N – кількість найближчих точок до вузла ij ; Z_k – значення відмітки у k -й точці; d_k – відстань до найближчої k -ї свердловини до вузла сітки ij ; α – показник ступеню інтерполяції.

Слід зазначити, що пошук відбувається відносно сфери, яка ділиться на n секторів, щоб врахувати просторове розміщення кернів свердловин. Рекомендується при розрахунках обирати вісім секторів.

При застосуванні інтерполяції користувачу надається можливість обрати параметри, представлені в діалозі для кожного перерізу (рис. 7).



Рис. 6. Розрахунок інтерполюваного вузла у 3D-просторі

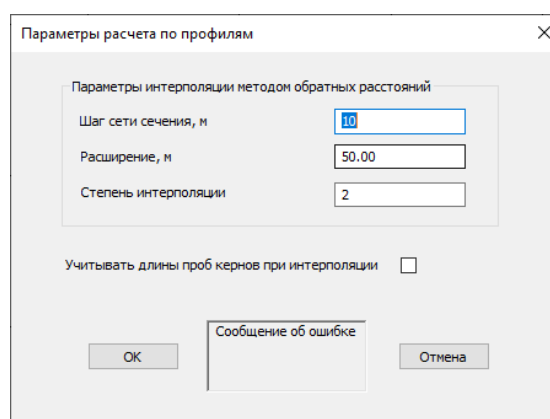


Рис. 7. Діалог параметрів розрахунку по профілям

У даному діалозі крім кроку сітки, розширення та ступені інтерполяції надається можливість врахування довжини проб кернів свердловин.

При такому врахуванні формула зміниться наступним чином.

$$Z_{ij} = \sum_{k=1}^N Z_k d_k^{-\alpha} dl_k / \sum_{k=1}^N d_k^{-\alpha} dl_k,$$

де dl_k – значення довжини проби у k -й точці.

Так як інтерполяція відбувається у 3D-просторі, по кожному вузлу сітки надається можливість переглянути результати пошуку та наочно побачити лише ті найближчі керни свердловин, відносно яких і відбувався розрахунок, використовуючи метод зворотних відстаней.

На рис. 8. виведені керни свердловин, які є найближчими до виділеного вузла.

Передбачено наступні опції контекстного меню: відобразити площини, в кожній з яких відбувається пошук керну свердловини; відобразити лінію до найближчого керну; відобразити вузол сітки, відносно якого відбувається пошук; відобразити осі координат; повернення до першочергового стану.

За умовчанням виведені усі режими, окрім відображення площин. На рис. 9 продемонструємо виведення восьми площин, на які ділиться сфера для застосування об'ємної інтерполяції. Для того щоб наочно побачити найближчі керни свердловин, до площин застосовано режим прозорості.

Так, користувач може зробити повний візуальний аналіз розрахунку по вибраному вузлу сітки. 3D-режим дозволяє робити наступне: повертати сцену по осям координат, використовуючи клавіші курсору; наближати та віддаляти сцену за допомогою колеса мишки; користуватися контекстним меню.

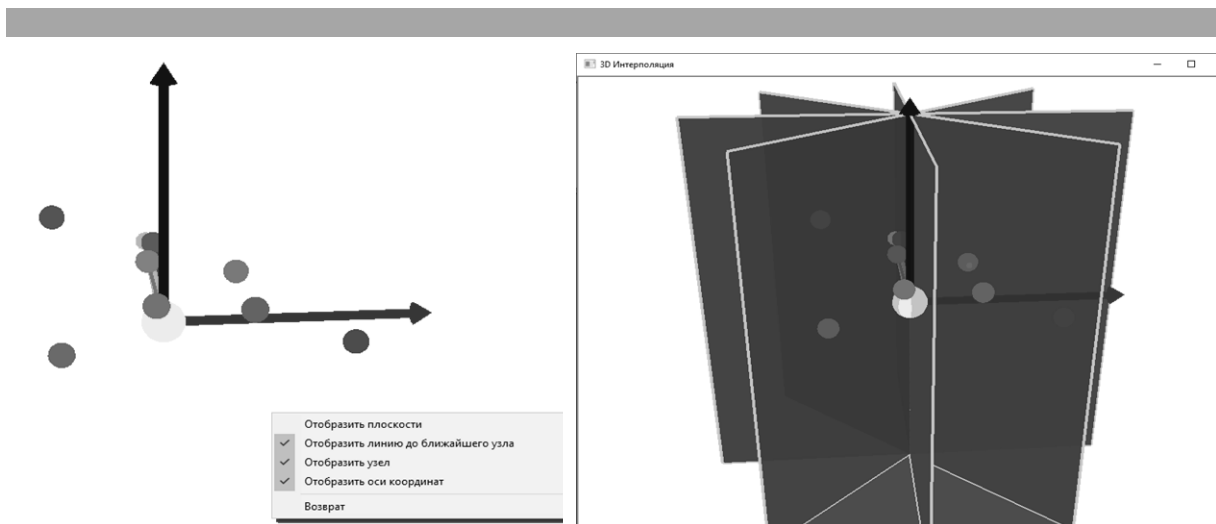


Рис. 8. Виведення найближчих кернів свердловин до вузла сітки у 3D-просторі

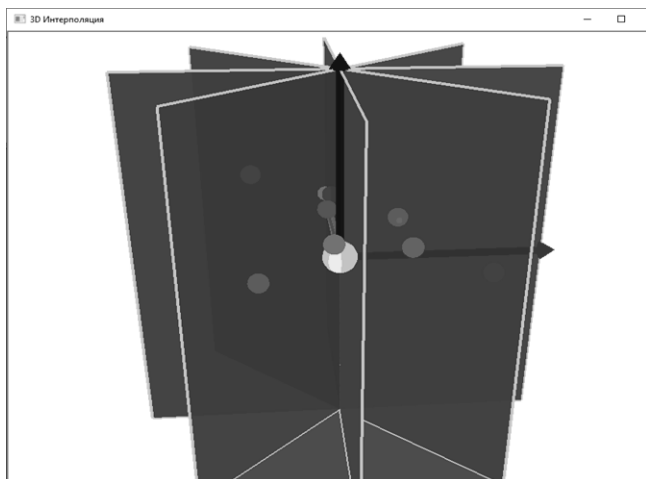


Рис. 9. Виведення найближчих кернів свердловин до вузла сітки у 3D-просторі з відображенням площин

Слід зауважити, що пошук вузла сітки відбувається оптимальним чином за допомогою функції PoiskUzel. Наведемо код даної функції.

```
//Функція пошуку індексу вузла сітки у векторі Pok_Set
//-1 мишка поза контуром
int CVertSect_15View::PoiskUzel(double x, double y, double hag)
{
    //Прив'язка до контурів
    double* x_k1, *y_k1, *x_k2, *y_k2;
    int kol1, kol2;
    kol1 = kontur_niz[0].size();
    x_k1 = kontur_niz[0].begin()._Ptr;
    y_k1 = kontur_niz[1].begin()._Ptr;
    kol2 = kontur_verx[0].size();
    x_k2 = kontur_verx[0].begin()._Ptr;
    y_k2 = kontur_verx[1].begin()._Ptr;
    //////////////////////////////////////
    //-1 при не потраплянні у контур
    if (!pDoc->Poisk_t(x_k1, y_k1, kol1, x, y, (float)hag)
        || !pDoc->Poisk_t(x_k2, y_k2, kol2, x, y, (float)hag))return -1;

    double left_side = x - hag;
    double right_side = x + hag;
    double uz_distance, min_distance;
    int i, pos, idx = -1;
    int kol_uz = Pok_set.size();
    Pok_Set *Pokset = Pok_set.begin()._Ptr;
    //Пошук свердловини методом половинного ділення
    pos = (int)(lower_bound(Pok_set.begin(), Pok_set.end(), left_side) -
    Pok_set.begin()) - 1;
    pos = (pos < 0) ? 0 : pos;
    //////////////////////////////////////

    min_distance = 1e+300;
    //Цикл пошуку мінімального значення по вузлу
    for (i = pos; i < kol_uz && Pokset[i].x < right_side; i++)
    {
        uz_distance = (Pokset[i].x - x) * (Pokset[i].x - x) + (Pokset[i].y - y) *
        (Pokset[i].y - y);
        if (uz_distance < min_distance)
        {
            min_distance = uz_distance;
            idx = i;
        }
    }
    return idx;
}
```

Зроблено це з використанням предикатів та алгоритмів бібліотеки STL. Клас сітки Pok_Set є екземпляром класу vector та має в собі два предикати – один для сортування даних за допомогою стандартного алгоритму sort, а інший – для бінарного пошуку з використанням алгоритму lower_bound.

Нижче наведемо опис класу сітки Pok_Set з даними предикатами.

```
//Клас сітки
class Pok_Set
{
public:
    double x;
    double y;
    double feob;
    double femag;
    int sort;

    Pok_Set(double x = 0, double y = 0, double feob = 0, double femag = 0, int sort
= 0)
    {
        this->x = x;
        this->y = y;
        this->feob = feob;
        this->femag = femag;
        this->sort = sort;
    }

    //Предикат для lower_bound
    bool operator<(double xx) { return x < xx; }
    //Предикат для сортування
    bool operator<(Pok_Set& xx) { return x < xx.x; }
};
```

При формуванні сітки даний контейнер сортується за допомогою наступного рядка коду:

```
//Сортировка контейнера
sort(Pok_set.begin(), Pok_set.end());
//////////
```

Такий же механізм пошуку використано при застосуванні 3D-інтерполяції, де спочатку відбувається сортування кернів свердловин за координатою X, а потім методом половинного ділення відбувається пошук мінімальної та максимальної координати X для оптимального пошуку кернів свердловин, що потрапили до заданого радіусу пошуку.

Механізм застосування моделей класів в якості екземпляру динамічного контейнеру вектор разом з відповідними предикатами та стандартними алгоритмами бібліотеки STL дають ефективний механізм пошуку вузла сітки та застосування об'ємної інтерполяції у 3D-просторі.

Після підрахунку площ за типами руд кожного з вертикальних перерізів, не представляє складності отримати повний підрахунок запасів по кар'єру в цілому по відомим формулам в залежності від просторового розташування профілів. Об'єми щодо кожного перерізу обчислюються за формулою

$$V_n = \frac{S_1 + S_2}{2} h, \quad (1)$$

де S_1 та S_2 – площі сусідніх перерізів; h – висота між сусідніми перерізами.

У тому випадку, коли розглядаються профілі на границях кар'єру чи має місце перехід з одного рудного тіла на інше, об'єм може обчислюватися, як об'єм піраміди

$$V_n = \frac{1}{3} S_1 h. \quad (2)$$

Результати розрахунків перевірялися методом горизонтальних перерізів, а також методом підрахунку об'ємів на підставі моделювання поверхні кар'єру, як різницю двох поверхонь. Помилка сходження менше 1%.

Результати розрахунків виводяться у табличному вигляді та можуть бути збережені у форматі HTML або передані до пакетів Microsoft Word, Microsoft Excel.

Висновки та напрямки подальших досліджень. У якості інструментарію з розробки програмного забезпечення вибрано мову C++ на базі бібліотеки MFC інтегрованого середовища Microsoft Visual Studio 2019. Для обробки баз даних використано технологію ADO, для роботи з 3D-графікою – відкриту графічну бібліотеку OpenGL [7-10]. Крім того, розроблено 3D-модуль аналізу кожного вузла сітки відносно найближчих кернів свердловин та організоване поповнення результуючої інформації по довільним профілям кар'єру, які задаються двома параметрами: відстань між профілями та кут нахилу. Це дає можливість порівняти результати при різних параметрах кутів та відстані між профілями та оцінити отримані результати.

Список літератури

1. Автоматизация геолого-маркшейдерского обеспечения в информационной системе управления рудным карьером: монография / **А.С. Зеленский, С.В. Баран, В.С. Лысенко и др.** - Кривой Рог: Издательский центр ГВУЗ «КНУ», 2012.–362 с.
2. **Зеленский А.С.** Построение кривых и поверхностей при решении горно-геометрических задач / **А.С. Зеленский, В.С. Лысенко** // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг: КНУ. – 2013. – Вип. 34.–С. 225-232.
3. **Зеленский А.С.** Моделирование поверхности карьера с использованием В-сплайнов / **А.С. Зеленский, В.С. Лысенко, В.И. Мельничук** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ. – 2009. – № 23. – С. 50–54.
4. Автоматизация полного подсчета запасов на рудных месторождениях / **А.С. Зеленский, С.В. Баран, В.С. Лысенко, И.В. Хивренко** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ. – 2010. – №26. – С. 64 –68.
5. **Зеленский А.С.** Оконтуривание рудных тел с использованием В-сплайнов / **А.С. Зеленский, С.С. Пуханов, Т.А. Подойницына** // Вісник Криворізького технічного університету. – Кривий Ріг: КТУ. – 2011. – № 27. – С. 59 –62.
6. **Зеленский А.С.** Использование NURBS поверхностей для автоматизированного построения изолиний изменчивости качественных показателей руды на карьерах / **А.С. Зеленский, С.С. Пуханов, В.И. Мельничук** // Науковий вісник НГУ. –2009.–№6.–С. 69–73.
7. **Ричард С. Райт, мл., Бенджамин Липчак** OpenGL. Суперкнига, 3-е издание.: Пер. с англ – М.: Издательский дом "Вильямс", 2006. – 1040с.
8. **Хилл Ф.** OpenGL. Программирование компьютерной графики. Для профессионалов.– СПб.: Питер, 2002.– 1088 с.
9. **Дональд Херн, М. Паулин Бейкер** Компьютерная графика и стандарт OpenGL, 3-е издание.–М.: Издательский дом «Вильямс», 2005.–1168 с.
10. **Роджерс Д., Адамс Дж.** Математические основы машинной графики: Пер. с англ.– М.: Мир, 2001.–604 с.

УДК 621.62-1+62-93+681.6

I. A. YAROVA, PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Odesa Polytechnic National University

N. I. TSYVINDA, PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Kryvyi Rih National University

YU. V. YAROVYI, PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Odesa Polytechnic National University

O. A. BONDAR, PhD in Technical Sciences, Associate Professor
Odesa Polytechnic National University

THE ANALYSIS OF WORKING ENVIRONMENT IN OPERATION OF 3D PRINTERS FOR FUSED DEPOSITION MODELLING

Purpose. The creation of safe working environment and the overall environmental footprint of 3D printing process is the relevant issue for the industry and other fields of human activity. The urgency of the research is due to the need to explore the working environment in operation of 3D printers for fused deposition modelling technology (FDM) as one of the most widespread.

Research methods. General theoretical methods (analysis, generalization, synthesis) are used in the study.

Scientific novelty. A comprehensive analytical study of occupational safety of 3D printing as a manufacturing process of processing materials was carried out. It reveals that despite of the digital focus of 3D printing, it is a mistake to apply to it the requirements of safety related only to digital technologies. The negative effects of the equipment for FDM-based 3D printing are of low intensity, but under condition of long-term impact they can have a cumulative effect.

Practical significance. The study identifies hazardous and harmful factors of working environment and the labor process, generated in FDM-based 3D printing with two of the most common type of plastic: ABS and PLA. Harmful chemicals emitted during the printing process by these plastics and their effects are considered. The means of collective protection both for the professional operators and for surrounding persons are suggested.

Results. Hazardous and harmful production factors inherent in fused deposition modelling technology as a method for processing materials were considered. The preference of using PLA plastic for 3D printing in the non-production sphere is substantiated. The suggestions on occupational safety to optimize working environment for FDM-based 3D printing are represented.

Key words: 3D printing, fused deposition modelling, ABS plastic, PLA plastic, occupational safety, working environment, hazardous and harmful production factors, harmful chemicals

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-15-21

The technology of 3D printing is the newest and rapidly developed among the additive technologies used for parts and objects manufacturing. This technology was invented in the mid-80's of the last century, its introduction into everyday practice began by the mid-2000s, and nowadays it has a wide application in various fields of human activity. 3D printing is a generic name of the group of information-based technologies of material treatment. These technologies rely on digital designing of three-dimensional objects and their further layer-by-layer reproducing using special numerical controlled equipment which is conventionally called 3D printers.

The main advantages of 3D printing in comparison with the classical material processing methods are the decrease in level of environmental pollution by minimizing the amount of industrial waste and the reduction of energy consumption of technological equipment. The relevance of the study is due to the fact that 3D printing is placed at the intersection of industrial technologies and the industry of knowledge. As a matter of fact, any industrial production is the processing of large amounts of raw materials and the functioning of technological equipment in different manufacturing processes. Regarding the industry of knowledge – Information Technology – the main its value is the human as the creator of certain methodologies and software products. That's why health preservation as well as increase efficiency and productivity of both individual employee and the team are the main objectives of every company or organization.

Problem and its connection with scientific and practical tasks. The development of 3D printing occurs in three main directions. The first direction is a search for new materials, which can be used for prototyping for already known technologies. The second direction is a search for new 3D printing technologies and a hardware for their implementation. The third direction is a development of software necessary to implement different 3D printing technologies with different materials. The studies in these areas also involve some specific safety issues, for example, the biological compatibility of implant printing materials [1, 2]. However, much of these studies are fragmented and incomplete, because they are considering certain aspects of safety, usually related to the quality of the printed product or with its influence on a human organism during exploitation.

A comprehensive study of occupational and ecological safety of 3D printing as the technological process of processing material is needed. Such a study should be carried out as the analysis of hazardous and harmful factors of production environment and labor process. Guidelines on occupational safety and health as well as recommendations on environmental protection should be based on such a study.

Analysis of recent achievements and publications. 3D printing technologies are characterized by a variety of manufacturing principles and, as a result, they are characterized by a variety of equipment and materials used for prototyping. Currently, Fused Deposition Modelling (FDM) technology is the easiest to implement and the most widespread. Its basic principle is the sequential formation of layers of printed item of a rigid polymer, which is fed into the printing area in the form of heated wire. The range of the materials used for 3D printing is rather small, it has about a hundred items [3]. Most materials can be attributed to three main groups: polymers, metals and ceramics [4]. Organic substances such as tissue cells, cellulose or foodstuffs are used for the specific types of 3D printing [5].

Industry, medicine, education – these are the areas of human activity in which 3D printing is considered to be an important and current technology. Each of these areas makes specific demands for 3D

printing products. The accuracy and strength characteristics of finished item determine the choice of technology and materials for 3D printing in electronic and aerospace industry, in mechanical engineering and automotive industry [6 – 8]. Finished item for regenerative medicine, orthopedics, cardiology, dentistry should meet the requirements of manufacturing accuracy together with biological compatibility of materials [9, 10]. In the field of education 3D printers are considered to be an effective training tool in engineering and natural sciences. The use of 3D printers in secondary and higher educational institutions demands first of all to ensure the safety of students [11]. However, the comprehensive multilateral studies on this issue are lacking. Investigators usually focus on the realism and visibility of printed three-dimensional training models or on the level of difficulty in obtaining competence in 3D design and 3D printing [12, 13]. A number of studies are devoted to the social aspects of 3D printing applications: as a therapeutic tool or as a tool for food security achievement [5, 14, 15]. Also noteworthy is the problem of hazardous or prohibited items printing, such as weapons [12], but issues like this are more in the realm of social and ethical security.

Safety analysis of 3D printing focuses on improving the safety of materials, assessing their impact on human beings and the environment. For example, the main objective of printed medical items is to achieve material biocompatibility considering kinetics of decomposition, minimization of decomposition by-products and other negative effects [4, 16]. 3D printing has a significant potential as a way to reduce the carbon footprint of industrial production [15]. The pressing problem for 3D printing is the product and waste management [17, 18].

Relatively low energy consumption is an advantage of all 3D printing technologies compared to the classical material processing methods. The consequence of this is the lower intensity of hazardous and harmful production factors affecting the operator. Perhaps this is the reason for the low attention paid to the industrial safety issues of 3D printing. However, 3D printers are not absolutely safe in terms of occupational health and safety. Whether in industry, in educational and medical institutions or at home, 3D printers generate factors which are hazardous and harmful to human beings.

The factor which draws attention to the majority of researchers is air pollution in 3D printer working environment. The most obvious effect of printing process is the emission of harmful substances into the air, namely, particulate matter (including ultrafine particles 1 – 3 nm or less), toxic gases and volatile organic compounds [3, 11, 15]. There is a number of studies on air pollution while 3D printing, but authors usually focus on the chemical composition and the intensity of pollution without taking into account the duration of 3D printer users exposure to harmful substances [19].

Some authors consider the problem of vibrations during 3D printing, but the studies are devoted to the impact of vibrations on the quality of a printed product, and do not address the problem of the impact of vibrations on the human operator [20].

The paper [11] emphasize the need for risk assessment and conducting research devoted to additive technologies, with special attention to toxicological and environmental hazards that may arise in production, use and disposal of printed objects, raw materials and waste. As an illustration of an unexpected negative event, the exploitation of 3D printers in educational institutions is considered. So, here the problem is that students, sensitive to air quality, may be inadvertently exposed to harmful substances emitted in 3D printing. For example, in [21] it was shown that 12 volatile organic compounds with concentrations below the recommended limits were detected during 3D printers operating. But according to the authors, the results obtained do not reflect all possible impact scenarios and further research is needed to detect the level of impact and effectiveness of manufacturing process monitoring.

Statement of the problem. Thus, we see that the aspects of production safety of 3D printing have not been duly studied and documented. There is a compelling need for the research of working environment of the process of object manufacturing by 3D printing. The purpose of the research is to identify hazardous and harmful production factors and assess their levels for further occupational risk reduction. The result will be the ability to ensure safe and eco-friendly working environment for 3D printer professional users; as well as the ability to ensure reduction of threats to the health of non-professional users and the development of safer practices of 3D printers using for non-industrial activities. Fused Deposition Modelling (FDM) technology is selected as the research object, which is the most common due to its accessibility and efficiency.

Presentation of the main material and results. Because of its belonging to digital technologies, working environment of 3D printing process can be characterized by hazardous and harmful production factors, typical for all computer-related activities. The main ones are: the danger of electric shock, the

lack of natural daylight and insufficient lightning of the working area, poor indoor climate parameters in working premises. Computer monitors create such harmful factors as increased light brightness, increased light flux pulsation, reduced contrast of images and symbols. The overloading of visual analyzer, the static overloading of locomotor system, the dynamic overloading of upper limbs are typical psychophysiological harmful factors. In addition, as it always been in creative activity, there are mental overstrain and the emotional overload. Protection from hazardous and harmful production factors listed above is carried out with regard to the requirements of regulations.

All the computing hardware is characterized by the high level of high-frequency noise generated in ventilation systems. But in this regard, 3D printing has certain features. Rotary units and reciprocating units of 3D printers generate low-frequency noise and vibration. These include cooling fans of extruder and power supply, stepper motors, linear bearings together with printer cases, that vibrate during printing. The actual noise and vibration levels depend on the materials and design of printer housing, the type of motors and fans, the materials of drive structural elements. The best solutions to reduce noise and vibrations are: printer setting on anti-vibration supports, the use of software for intelligent fan speed control and intelligent stepper motors control, the acoustic treatment of production facilities.

Air pollution with toxic gases and particulate matter is the harmful factor of 3D printing that attracts significant attention of most researchers. Manufacturing of an object on FDM technology consists of heating and melting the filament (polymeric raw material in wire form) and layer-by-layer forming of pre-designed item. Two types of polymeric raw material are most commonly used for 3D printing: they are ABS and PLA plastics. All the filaments are the consumables and they are safe when storing, as any polymer in the solid state. But when the polymers are heated and melted, their thermal destruction (degradation) occurs and the new substances are formed during the oxidative reactions by interaction with oxygen in the air. As a result, the fumes of polymer source components or the fumes of polymer thermal-degradation products are emitted into the workplace air.

ABS polymer (acrylonitrilebutadienestyrene) is the solid opaque copolymer thermoplastic material, produced from three source monomers: acrylonitrile, butadiene 1,3 and styrene. In turn, these three source components are petroleum-based products, so they are highly toxic when heated.

Acrylonitrile, also known as vinyl cyanide, is colorless toxic volatile liquid, which has the faint odor of bitter almonds. Acrylonitrile classified as High Risk substance, it is a potent toxicant, in small doses it has a carcinogenic effect. It enters the human body through the respiratory tract and intact skin, its toxic effect is similar to that of cyanides. When ingested, depending on the volume of the absorbed substance, causes headache, nausea, vomiting, dizziness, sleep disorders, general fatigue.

Styrene is colorless, toxic, volatile liquid with a sharp and unpleasant odor similar to that of alcohol or acetone. It is classified as Moderate Risk substance. It belongs to the category of substances of general toxic action with an irritant, mutagenic and carcinogenic effect. Styrene enters the human body by breathing in, causing irritation of the mucous membranes, disorders of the nervous system and the hematopoietic system, disorder of digestive tract, as well as chronic kidney and liver diseases.

Butadiene is heavy gas with unpleasant odor, it easily interacts with atmospheric oxygen, forming peroxide compounds. It is classified as Low Risk substance. It has general toxic action with an irritant, neurotoxic and carcinogenic effect. In high concentrations butadiene suppresses the nervous system, there may also be respiratory disorders and loss of consciousness. With long-term exposure it is a carcinogen; it can affect bone marrow and liver, it can cause hereditary and genetic disorders.

Also in printing with ABS plastic benzene emission was fixed [21]. Benzene is a High Risk toxic substance, it affects the central nervous and hematopoietic systems, has a carcinogenic and mutagenic effects. At low doses benzene causes chronic poisoning whose early symptoms are headaches and dizziness, irritability, increased fatigue, a general malaise, bleeding gums and retinal hemorrhage.

PLA polymer (polylactic acid) or polylactide is a fully biodegradable thermoplastic polyether based on lactic acid. PLA belongs to a group of polyesters. It is obtained through synthesis of vegetable raw materials, containing starch or sugar, obtained after the processing such plants as corn, potatoes or sugar cane. Since natural ingredients are used for the production of PLA, it is considered to be safe for human health when heated and melted. However, during PLA melting lactide and acetone are emitted. Lactide is harmless to the human and is not capable to cause dysfunction of body systems. Acetone is toxic, colorless, volatile liquid with a characteristic odor. It is classified as Low Risk substance. Acetone fumes enter the human body by breathing in. Acetone irritates the mucous membranes of the eyes and respiratory tract, symptoms of its impact are sore throat and cough, eye pain and blurred vision, nausea,

vomiting, dizziness. In high concentrations or in a particularly sensitive person (children especially) it has a narcotic effect and can cause clouding and loss of consciousness.

It has been determined that contamination with volatile organic compounds in ABS printing is more intense than in PLA printing [21]. In addition to the volatile organic compounds, carbon dioxide, carbon monoxide, nitrogen oxides (NO_x) as well as halocarbons (CFC, HCFC, CCl₄), trichloroethane, nickel and lead compounds are generated in 3D printing process [13].

In addition to the toxic substances in vapor and gas phase, 3D printing generates ultrafine polymer particles, increasing the particulate air pollution in the working premises. Ultrafine particles enter the respiratory system with air flow and penetrate directly into the mucous membranes of the respiratory tract and the alveoli of the lungs, causing allergic reactions and respiratory diseases.

The ABS printing process generates an average of 200 million ultrafine particles per minute. For PLA plastic this rate is an order of magnitude smaller: about 20 million ultrafine particles per minute. The size of particles generated by ABS printing is smaller than in PLA printing. That means a greater degree of their penetration through the respiratory system, as well as through the skin, and therefore, a greater intensity of their participation in the metabolism [21, 22]. Therefore, PLA plastic is more safe than ABS, but it also requires air purification. That's why it is recommended to set up dust trapping and air ventilation for all the premises in which 3D printers are located. Furthermore, for industrial 3D printing environment, the staff must use protective clothes and protective equipment such as gloves, goggles and masks [15, 21]. However, personal protective equipment can cause physiological discomfort and is quite justified only in industrial environments. The removal of pollutants directly from the place of their generation is the most effective measure both for industrial and non-industrial working environment. This can be achieved by operating 3D printers with closed or hermetically sealed cases equipped with integrated HEPA filters. The local exhaust ventilation devices equipped with HEPA filters for air filtration in the vicinity of the printer are the effective protective measure too. In this way gas and ultrafine particles can be filtered efficiently.

The design of any 3D printer provides a significant number of mobile units and elements that can cause mechanical injury: drives, pulleys, threaded screws, timing belts, extruders, fans, movable tables-platforms. 3D printers used in non-industrial applications usually do not pose a significant threat to human operator, but in industrial environments the injuries with quite severe consequences are possible.

During printing and immediately after it some surfaces of printing unit, of the filament in printing zone and of the finished item have a fairly high temperature. The design of FDM printer provides two heating elements: the extruder and the work platform. In printing process the temperature of extruder nozzle varies from 170 to 300 °C depending on the type of plastic and configuration of printed item. Operating temperature of the work platform must be within 50 – 80 °C. At various conditions ABS plastic melting point is 210 – 270 °C, PLA plastic melting point is 190 – 230 °C. Touching the extruder nozzle or the work platform or the workpiece during printing can lead to burns of skin and subcutaneous tissue. Safety requirements for printer operation and maintenance are developed to prevent injury. Since the working temperature of the printing unit is 50 – 300 °C, there is the emission of sensible heat in the premise, which leads to the workplace air heating. Printer design provides fans for cooling the printing area, which create streams of hot air. Therefore, the necessary condition for the premises where 3D printers are located is the normalization of microclimate parameters by using general ventilation.

Conclusions and direction for the further research. The analytical study of working environment and labor process for FDM-based 3D printing identifies the following hazardous and harmful production factors that can cause injury to the equipment operator:

- the movable units of 3D printer can cause mechanical injury;
- the increased temperature of extruder and the work platform surfaces, of the filament in printing zone and of the finished item; contact with these surfaces can cause burns.

The following harmful factors of production environment affecting the health of human operator and the health of those who occupy it arise in the premises where 3D printers are located:

- the increased air pollution by volatile organic compounds;
- the increased air pollution by ultrafine polymer particulate matter;
- the increased level of low frequency noise and vibration;
- the increased temperature of the workplace air because of the emission of sensible heat.

Therefore, despite of the digital-orientation of 3D printing, it would be a mistake to apply safety requirements related only to digital technologies. The negative impacts of FDM-based 3D printing equipment are of low intensity, but they may have a cumulative effect under long-term settings.

Over the next period of the research it is planned to examine the visual work conditions of 3D printer operators in more depth. Of interest are physical and psychophysiological factors of production environment, related to the lightning in a workplace of 3D printer operator.

Reference

1. **Nurul Mohd Fuad, Feng Zhu, Kaslin, Jan, Wlodkowic, Donald.** Applications of stereolithography for rapid prototyping of biologically compatible chip-based physiometers. *Proc. SPIE 10013, SPIE BioPhotonics Australasia*, 1001326, 2016. <https://doi.org/10.1117/12.2242824>
2. **Haocheng Du, Shaoqian Chen.** Development and Application of 3D Printing and Its Materials. *Insight. Material Science*, 2020, Vol. 3, Iss. 2, pp. 28–31. <http://dx.doi.org/10.18282/ims.v3i2.331>
3. **Vinod, G. Gokhare, Raut, D. N., Shinde, D. K.** Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing. *International Journal of Engineering and Technical Research*, 2017, 6, 953-958. <https://www.researchgate.net/publication/350374850>
4. **Hoon Kim, Tanveer Ahmed Khan, Kwang-Hyun Ryu, In-Sung Sohn, Hyun-Joong Kim.** Nanocomposite materials for 3D printing. 2022. <https://www.researchgate.net/publication/361557134>
5. **Lupton, D.** 3D Printing Technologies: Social Perspectives, 2016. 10.13140/RG.2.2.15993.67682
6. Young-Geun Park, Insik Yun, Won Gi Chung, Wonjung Park, Dong Ha Lee, and Jang-Ung Park. High-Resolution 3D Printing for Electronics. *Advanced science*, 2022, 9, 2104623. 10.1002/advs.202104623
7. **Rehbein, T., Johlitz, M., Lion, A., Sekmen, K., Constantinescu, A.** Temperature- and degree of cure-dependent viscoelastic properties of photopolymer resins used in digital light processing. *Progress in Additive Manufacturing*, 2021, 6: 743–756. <https://doi.org/10.1007/s40964-021-00194-2>
8. **Bayraktar, S., Şentürk, E.** Machinability of 3D Printed Materials. In: Khan, M.A., Jappes, J.T.W. *Innovations in Additive Manufacturing*. Springer Tracts in Additive Manufacturing. Springer, Cham, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-89401-6_13
9. **Hoon Kim, Tanveer Ahmed Khan, Kwang-Hyun Ryu, In-Sung Sohn, Hyun-Joong Kim.** Nanocomposite materials for 3D printing. *Applications and Industrialisation of Nanotechnology*, 2022, pp. 91–118. Publisher: One Central Press. <https://www.researchgate.net/publication/361557134>
10. **Deepak Narang.** 3d Printing and Its Uses in Dentistry. *International Journal of Dental Science and Innovative Research*, 2022, Vol. 5, Iss. 2, April, pp. 156–162. <https://www.researchgate.net/publication/360619932>
11. **Rejeski, D., Huang, Y.** Environmental and Health Impacts of Additive Manufacturing. An NSF Workshop Report: Environmental Implications of Additive Manufacturing, 2014. <https://www.wilsoncenter.org/publication/environmental-and-health-impacts-additive-manufacturing>
12. **Novak, E.** 3D Printing in Education. Routledge, 2022. <https://doi.org/10.4324/9781138609877-REE81-1>
13. **Pikkarainen, A., Piili, H.** Implementing 3D Printing Education Through Technical Pedagogy and Curriculum Development. *International Journal of Engineering Pedagogy (iJEP)*, 2020, V. 10, N. 6, pp. 95–119. <https://doi.org/10.3991/ijep.v10i6.14859>
14. **Spicher, L., Gershenson, J.** Key Factors of Design: 3D Printed Occupational Therapy Products in Developing Communities. 2020 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), pp. 1–7. 10.1109/GHTC46280.2020.9342963.
15. **Huang, S. H., Liu, A., Mokasdar, P., Hou, L.** Additive manufacturing and its societal impact: A literature review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2013, 67 (5–8), pp. 1191–1203. 10.1007/s00170-012-4558-5
16. **Pagac, M., Hajnys, J., Ma, Q.-P., Jancar, L., Jansa, J., Stefek, P., Mesicek, J.** A Review of Vat Photopolymerization Technology: Materials, Applications, Challenges, and Future Trends of 3D Printing. *Polymers*, 2021, 13(4): 598. <https://doi.org/10.3390/polym13040598>
17. **Mazurchevici, S.-N., Mazurchevici, A.-D., Nedelcu, D.** Dynamical Mechanical and Thermal Analyses of Biodegradable Raw Materials for Additive Manufacturing. *Materials*, 2020, 13, 1819. <https://doi.org/10.3390/ma13081819>
18. **Weiheng Xu, Sayli Jambhulkar, Yuxiang Zhu, Dharneedar Ravichandran, Mounika Kakarla, Brent Vernon, David G. Lott, Jeffrey L. Cornella, Orit Shefi, Guillaume Miquelard-Garnier, Yang Yang, Kenan Song.** 3D printing for polymer/particle-based processing: A review. *Composites Part B: Engineering*, 2021, Volume 223, 109102. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109102>
19. **Garcia, Hector, Pola, Teresa Lopez.** Health and safety in 3D printing. *International Journal of Occupational and Environmental Safety*, 2022, 6(1), pp.14–25. 10.24840/2184-0954_006.001_0003
20. **Kam, M., Saruhan, H., Ipekci, A.** Investigation the effects of 3D printer system vibrations on mechanical properties of the printed products. *Sigma J Eng & Nat Sci*, 2018, 36 (3), 655–666. <https://www.researchgate.net/publication/327939577>
21. **Stefaniak, A. B., Johnson, A. R., du Preez, S., Hammond, D. R., Wells, J. R., Ham, J. E., LeBouf, R. F., Menchaca, K. W., Martin, S. B., Duling, M. G., Bowers, L. N., Knepp, A. K., Su, F. C., de Beer, D. J., du Plessis, J. L.** Evaluation of emissions and exposures at workplaces using desktop 3-dimensional printers. *Journal of Chemical Health and Safety*, 2019, Vol. 26, Iss. 2, pp. 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.jchas.2018.11.001>
22. **Nima Afshar-Mohajer, Chang-Yu Wu, Thomas Ladun, Didier A. Rajon, Yong Huang.** Characterization of particulate matters and total VOC emissions from a binder jetting 3D printer. *Building and Environment*, 2015, Vol. 93, Part 2, pp. 293–301. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.07.013>

В.А. КОВАЛЬЧУК, д-р техн. наук, проф., Т.М. КОВАЛЬЧУК, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ДИНАМІЧНОГО ПРОГРАМУВАННЯ ПРИ ВИКОНАННІ МАГІСТЕРСЬКИХ КВАЛІФІКАЦІЙНИХ РОБІТ З ЕКОНОМІКИ

Мета. Підвищення якості підготовки магістрів з економіки в системі вищої освіти ґрунтується не тільки на глибокому засвоєнні фахових, але й фундаментальних дисциплін. Саме практичне застосування набутих знань з математичного програмування при виконанні кваліфікаційних робіт з економіки дозволяє вирішувати конкретні виробничі завдання в умовах невизначеності та ризику прийняття рішень. Тому вільне володіння оптимізаційними методами, зокрема методом динамічного програмування, є необхідною передумовою досягнення поставленої мети.

Методи дослідження. В статті використана багаторівнева методологія пізнання за рівнем загальності, а саме загальнонаукові та часткові методи наук. Зокрема, при аналізі сучасних наукових напрацювань з проблеми застосування оптимізаційних методів використані методи аналізу і узагальнення. Методи емпіричного дослідження використано при встановленні взаємозв'язків між показниками виробничо-господарської діяльності суб'єктів господарювання і параметрами функціонування їх структурних підрозділів. Методи оптимізації застосовано при розробці найбільш ефективної програми відновлення та заміни екскаваторного парку, при розподілі інвестицій у розвиток підприємства та при розподілі заохочувального фонду стимулювання робітників цеху технологічного автотранспорту.

Наукова новизна досліджень полягає у поширенні уявлень про області застосування методу динамічного програмування з вирішення прикладних завдань при підготовці магістрів з економіки і виконанні кваліфікаційних робіт.

Практична значимість результатів дослідження, викладених у статті, полягає у посиленні фахових компетентностей, які набувають маїстри в процесі навчання і виконання кваліфікаційної роботи. Ці компетентності дозволяють ставити та вирішувати конкретні виробничі завдання з використанням методів динамічного програмування, що в сучасних умовах виробничої та економічної діяльності підприємств є актуальними. Важливим елементом є можливість впровадження результатів дослідження у діяльність базових підприємств гірничо-металургійного комплексу, які є системоутворюючими і у значній мірі формують регіональний та державний бюджети.

Результати. Сутність одержаних результатів полягає у кваліфікаційній складовій підготовки магістрів з економіки і виробничій, де вони можуть самореалізуватися і показати вміння застосовувати одержані знання і навички з оптимізації та оцінки виробничих завдань з найбільшою ефективністю.

Ключові слова: економіка, магістрант, кваліфікаційна робота, економіко-математичне моделювання, динамічне програмування, ефективність.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-21-27

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Оцінка якості підготовки фахівців за другим освітньо-професійним рівнем вищої освіти «магістр» відбувається за результатами виконання на високому науково-методологічному та методичному рівнях кваліфікаційної роботи і подальшого її захисту. Магістерська робота є концентрованим вираженням результатів попередньої поточної успішності в рамках всієї системи одержаних за період навчання знань і практичних навичок. Зокрема, підготовка магістрів спеціальності 051 «Економіка» спрямована на набуття ряду компетентностей, опанування якими дозволяє досягнути інтегральної у формулюванні: «Здатність визначати та розв'язувати складні економічні задачі та проблеми, приймати відповідні аналітичні та управлінські рішення у сфері економіки або у процесі навчання, що передбачає проведення досліджень та/або здійснення інновацій за невизначених умов і вимог» [1, с. 6]. Зазначене вище надає можливість формулювати конкретні «професійні задачі в сфері економіки та розв'язувати їх, обираючи належні напрями і відповідні методи для їх розв'язання, беручи до уваги наявні ресурси» [1, с. 7]. Для сучасного фахівця окрім постановки і визначення напрямків вирішення проблемного завдання, більш нагальною задачею є знаходження оптимально-ефективного варіанту вирішення поставленого завдання. Досягнення зазначеної мети неможливе без економіко-математичного моделювання, яке в залежності від вихідних умов і задачі оптимізації пропонує цілу низку методів реалізації завдання.

Аналіз досліджень і публікацій. Проблемам економіко-математичного моделювання присвячено багато праць, в яких автори розглядають сутність процесу моделювання, його основні етапи, приклади практичного застосування для вирішення прикладних задач економічного спрямування тощо.

Так, Зеленко С.В. і Гуляницька Д.В. у статті [2, с. 73] вважають, що «моделювання засноване на заміщенні реальних об'єктів їх аналогами, зразками та математичними моделями для кращого

сприйняття, задля здійснення оцінки стану і прогнозу в господарській, фінансовій, економічній діяльності підприємства». Вони пропонують при економічних дослідженнях три основні види моделей: фізичні; аналогові; математичні, але процес моделювання вони зазвичай зводять до банального кореляційно-регресійного аналізу.

Автори [3, с. 5] розглядають основні моменти та процедури в організації моделювання, причини його обмеженого використання, але як і попередні автори все зводять до побудови множинних кореляційних залежностей та їх аналізу.

Хорошун В.В. та Науменко І.А. [4, с. 179] при прогнозуванні збутової логістики неабияку увагу приділяють математичному апарату теорії дослідження операцій, а саме ймовірнісній моделі управління запасами, моделі кількісних знижок та однопіріодній моделі, але всі вони базуються на виробничих функціях, які не враховують при побудові економіко-математичної моделі реально існуючих обмежень, що на них накладаються.

Назаренко І.М. [5, с. 66] пропонує застосовувати зарубіжний досвід для «прогнозування платоспроможності, фінансової стійкості і окреслення майбутніх перспектив фінансової безпеки та розвитку суб'єктів господарювання» здійснювати за допомогою економіко-математичного моделювання, «спрямованого на виявлення ймовірності банкрутства». Це стосується моделей, що були розроблені Е. Альтманом у 1983 році і Г.В. Савицькою, але всі вони зводяться до регресійних рівнянь, точність яких залежить від кількості факторів, які вони вміщують.

Юрчук Н.П. [6, с. 29] вважає, що «модель повинна відображати найбільш істотні, найбільш характерні риси, основні властивості, відношення реального життя» та «найважливіша вимога до економіко-математичної моделі полягає в її можливості адекватного відображення економічних процесів», але «потрібен компроміс між складністю моделі і можливістю її реалізації для практичного застосування». Автор наводить основні методи моделювання: методи елементарної математики; методи вищої математики; методи математичної статистики; економетричні методи; методи математичного програмування; методи дослідження операцій; евристичні методи. Процес управління він розглядає як «метод пошуку найкращих рішень для аналізу поведінки реальної виробничої системи без безпосереднього експериментування із самою системою».

Автори [7, с. 128] вирішують практичну задачу і сутність якої полягає у «визначенні оптимального обсягу випуску кожного виду виробу можливої номенклатури виробництва гірничорудних машин і механізмів при обмежених виробничих ресурсах, з урахуванням обов'язкових поставок щодо виробничих замовлень і можливості збуту даної продукції та забезпеченні максимального сумарного прибутку підприємства і необхідних умов поставки для замовника продукції». Формулювання є дуже конкретним і передбачає знання не тільки економічних процесів, але їх поєднання з технологією виробництва. Вони складають економіко-математичну модель, яка потребує економіко-технологічного обґрунтування як цільової функції (обсяги випуску у грошових одиницях), так і систему обмежень (можливості ресурсного забезпечення). Дана економіко-математична модель є найбільш простою і відноситься до лінійного програмування і має розроблені алгоритми її реалізації. Тому вона є статичною і не передбачає урахування можливих змін у економічних показниках, що були задіяні при моделюванні.

На важливість навчання моделюванню економічних процесів при підготовці майбутніх фахівців звертає увагу Гончаренко Я.В. [8, с. 23], який пропонує розширити коло моделей, оскільки на його думку «економічні системи ... з великими труднощами піддаються дослідженню звичайними (вербальними) теоретичними методами» і «прямий експеримент над ними неможливий» і «ціна помилок і прорахунків велика», тому «математичне (економіко-математичне) моделювання є необхідною складовою науково-технічного прогресу».

Як видно з наведеного аналізу, переважна більшість авторів не оперують поняттям економіко-математичної моделі у класичному її значенні як сукупність цільової функції і системи обмежень, що на неї накладається. Окрім того, у публікаціях недостатньо уваги приділено прикладам застосування саме точних моделей та прикладів їх реалізації на основі розроблених алгоритмів і підходів лінійного, нелінійного, дробово-лінійного, динамічного та ін. методів програмування.

Постановка завдання. Освітня підготовка магістрів спеціальності «Економіка» повинна передбачати виконання всіх етапів систематизації, обробки та аналізу інформації для встановлення оптимального варіанту вирішення практичних задач економічного спрямування за допомогою економіко-математичного моделювання, важливою складовою якого є динамічне

програмування, в умовах непередбачуваності і ризику прийняття рішень, що сприяє здобувачеві на високому рівні виконувати навчально-дослідну кваліфікаційну роботу.

Викладання матеріалу та результати. Кваліфікаційна магістерська робота, яка є підсумком підготовки майбутнього фахівця з економіки, включає проведення ряду досліджень:

визначення сильних і слабких сторін об'єкту дослідження на основі аналізу показників його виробничо-господарської діяльності;

проведення стохастичного факторного аналізу з визначення найбільш впливових факторів на результативні показники функціонування цього об'єкту;

в залежності від теми дипломної роботи і результатів факторного аналізу, сформулювати задачу дослідження (обрати критерій оцінки та керовані змінні), що має економічний зміст і враховує можливості суб'єкта господарювання;

формалізувати задачу, тобто представити її у загальному вигляді за допомогою рівнянь та нерівностей (скласти економіко-математичну модель);

за допомогою встановлених кореляційних залежностей (метод найменших квадратів) адаптувати економіко-математичну модель до умов функціонування досліджуваного суб'єкта господарювання;

дослідити вплив керованих змінних на поведінку цільової функції при послідовній фіксації значень змінних на рівні базового року і покроковій зміні однієї з них;

визначити вид економіко-математичної моделі та проаналізувати можливі методи її реалізації;

знайти оптимальний розв'язок задачі за найбільш придатним методом математичного програмування, вищої математики тощо;

провести аналіз одержаних результатів оптимізації і визначити економічну ефективність запропонованого рішення.

Обсяг необхідного дослідження є значним, тому розглянемо тільки останні його етапи, що стосуються саме реалізації розробленої економіко-математичної моделі у разі, коли доцільно застосувати динамічне програмування. Специфікою задач динамічного програмування є можливість враховувати фактор часу, що передбачає зміну оптимального плану на різних етапах його реалізації. Типи задач, що вирішуються методом динамічного програмування, за кінцевою метою дослідження наведено на рис. 1.



Рис. 1. Основні задачі динамічного програмування

Основним методом реалізації задач динамічного програмування є метод рекурентних співвідношень, в основу якого покладено принцип оптимальності, розроблений Р. Беллманом, який є багатокроковим і незалежно від ефективності кожного з кроків, забезпечує оптимальність процесу загалом. Тобто «відшукується оптимальний план процесу за допомогою рекурентних співвідношень, які пов'язують між собою окремі послідовні етапи календарного періоду» [9, с. 492].

Розглянемо конкретні приклади застосування динамічного програмування, які можна використовувати у кваліфікаційній роботі.

1. *Вибір оптимального методу амортизації екскаваторного парку Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату.*

Постановка економічної задачі.

Скласти програму відновлення та заміни екскаваторного парку за різними методами амортизації (метод зменшення залишкової вартості та прямолінійний метод амортизації) за плановий період N років для екскаваторного парку з віком експлуатації t років, з річними обсягами навантажувальних робіт $Q_e(t)$ (річна продуктивність), з річними затратами на технічне обслуговування $TO(t)$, з витратами на поточні ремонти $PP(t)$, з амортизаційними відрахуваннями $AM(t)$

, із залишковою вартістю $ZB(t)$, з вартістю капітальних ремонтів $KP(t)$. При складанні програми можливі варіанти, або відновлення, або продаж за залишковою вартістю (або за вартістю металобрухту).

Оскільки екскаваторний парк є структурним підрозділом комбінату, то за критерій оцінки ефективності його роботи, оптимальність на кожному кроці визначається за умовним прибутком, що враховує «застосування рентабельності звичайної діяльності підприємства в цілому і інтерполяції її на економічні показники окремих технологічних процесів». Зважаючи на те, що всі наведені показники залежать від віку експлуатації екскаватора, то необхідно попередньо визначити їх значення на кожний рік програми.

Рекурентні співвідношення для кожного кроку мають вигляд:

$$УП_1(t) = \max_t \begin{cases} c_e^r \cdot (1+R) \cdot Q_e(t) - TO(t) - PP(t) - AM(t) - \text{збереження}, & \text{для останнього року програми} \\ c_e^r \cdot (1+R) \cdot Q_e(0) - TO(0) - PP(0) - AM(0) + ZB(t) - \text{заміна}. \end{cases}$$

грами ($n = 1$);

$$УП_2(t) = \max_t \begin{cases} c_e^r \cdot (1+R) \cdot Q_e(t) - TO(t) - PP(t) - AM(t) + УП_1(t+1) - \text{збереження}, & \text{за останні два роки} \\ c_e^r \cdot (1+R) \cdot Q_e(0) - TO(0) - PP(0) - AM(0) + ZB(t) + УП_1(1) - \text{заміна}. \end{cases}$$

програми ($n = 2$);

$$УП_n(t) = \max_t \begin{cases} c_e^r \cdot (1+R) \cdot Q(t) - TO(t) - PP(t) - AM(t) + УП_{n-1}(t+1) - \text{збереження}, & \text{за останні } n \text{ років програми} \\ c_e^r \cdot (1+R) \cdot Q(0) - TO(0) - PP(0) - AM(0) + ZB(t) + УП_{n-1}(1) - \text{заміна} \end{cases}$$

грами, $n = 2, 3, \dots$; $t = 0, 1, 2, \dots$,

де $УП$ - умовний прибуток роботи екскаваторного парку для кожного кроку програми; c_e^r - собівартість екскавації 1 м³ гірничої маси; R - рентабельність звичайної діяльності підприємства.

Результатами розрахунків є програма відновлення та заміни екскаватора ЕКГ-8И при застосуванні методу зменшення залишкової вартості (рис. 2) і прямолінійного методу амортизації (рис. 3).



Рис. 2. Програма при використанні методу зменшення залишкової вартості

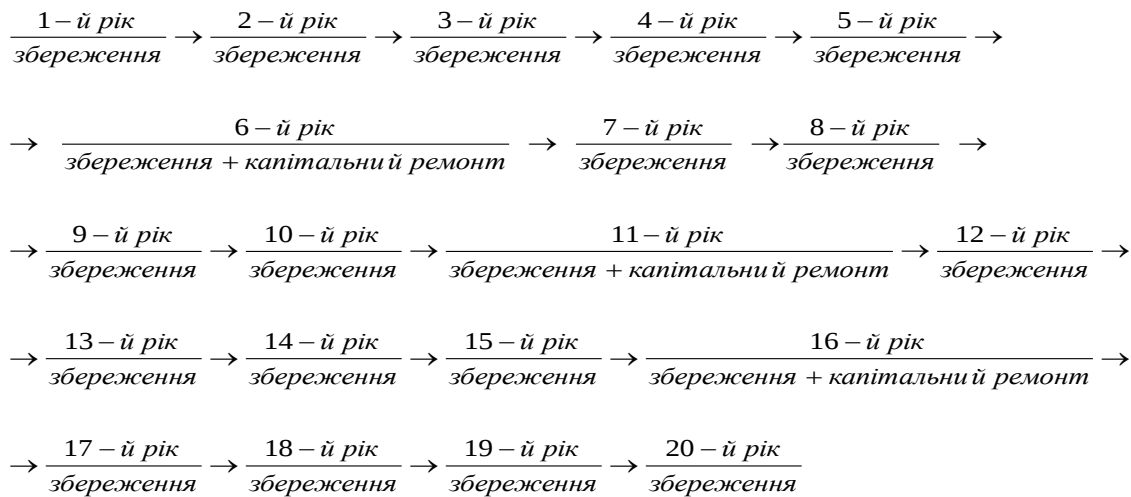


Рис. 3. Програма при використанні прямолінійного методу амортизації

Порівняння значень умовного прибутку за різними методами амортизації показало, що найбільш ефективним є метод зменшення залишкової вартості, а економічна ефективність за процесом екскавації збільшилася більш ніж на 5%.

2. *Встановлення оптимальної структури інвестиційних вкладень у розвиток Центрального гірничо-збагачувального комбінату.*

Постановка економічної задачі.

Знайти оптимальний розподіл коштів x між напрямками інвестування (технічне переозброєння x_1 , капітальні ремонти машин і устаткування x_2 , капітальне будівництво x_3), що забезпечує максимальний приріст чистого прибутку підприємства $g(x)$.

На цільову функцію $g(x) = f(x_1; x_2; x_3) \rightarrow \max$ накладено обмеження, що обумовлені технологією виробництва, при якій виключення будь-якого з напрямків інвестування має негативні наслідки, тобто $x_1 \geq x_1^{\min}$; $x_2 \geq x_2^{\min}$; $x_3 \geq x_3^{\min}$.

Рекурентні співвідношення у загальному вигляді можна представити:

$f_1(x) = g_1(x)$, для останнього напрямку інвестування (капітальне будівництво);

$f_k(x) = \max\{g_k(x_k) + f_{k-1}(x - x_k)\}$, $k = 2, 3, \dots$

Для останніх двох напрямків інвестування (капітальне будівництво та капітальні ремонти машин і устаткування) $k = 2$ та для всіх трьох напрямків інвестування $k = 3$.

Для адаптації економіко-математичної моделі до умов роботи Центрального гірничо-збагачувального комбінату встановлено кореляційні залежності між чистим прибутком і інвестиційними вкладеннями за напрямками, які графічно представлені на рис. 4.

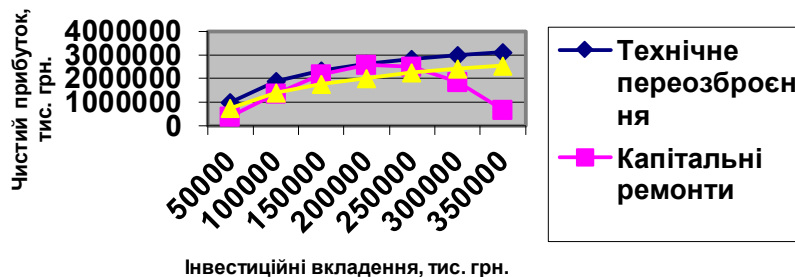


Рис. 4. Кореляційні залежності між чистим прибутком і напрямками інвестування

За наведеними залежностями покроково розраховано величини чистого прибутку в залежності від величини інвестиційних вкладень за напрямками. Аналіз максимального значення чистого прибутку $f_3(x)$ показав, що воно відповідає величині інвестицій 550 млн грн, при цьому на капітальне будівництво необхідно залучити 150 млн грн, тоді на перші два напрямки залишається 400 млн грн. Аналіз $f_2(x)$ показав, що цей максимум досягається при величині коштів на

капітальні ремонти 200 млн грн. Тоді на технічне переозброєння необхідно виділити 200 млн грн. Всі ці значення x_1, x_2, x_3 , що є результатами оптимізації, задовольняють системі обмежень.

Ефективність результатів оптимізації визначена через приріст чистого прибутку, величина якого складає 40,2 млн грн (2%), при цьому запропонована наступна структура інвестиційних вкладень відносно тієї, що склалася на Центральному гірничо-збагачувальному комбінаті, що позначена в дужках: технічне переозброєння – 36,4% (27,2%); капітальні ремонти – 36,4% (36,4%); капітальне будівництво – 27,2% (36,4%).

3. *Економіко-математичне моделювання структури заохочувального фонду працівників цеху технологічного автотранспортного Інгулецького гірничо-збагачувального комбінату.*

Постановка економічної задачі.

Встановити оптимальний розподіл величини заохочувального фонду 3Φ між трьома основними групами робітників, а саме водіїв-технологів, водіїв автосамоскидів та робітників ремонтної групи, що забезпечить максимальний приріст умовного прибутку $УП$ цеху технологічного автотранспорту.

Зважаючи на те, що робота автотранспортного цеху оцінюється за витратними показниками, то за критерій оцінки її ефективності доцільно обрати умовний прибуток $УП$. На основі статистичних даних виробничої діяльності цеху встановлено кореляційні залежності між $УП$ і величинами заохочувальних фондів наведених груп робітників

$$УП = 371,88 \cdot (3\Phi_1)^2 - 172427 \cdot 3\Phi_1 + 20523825,189 \quad (R^2 = 0,7663),$$

де $3\Phi_1$ - заохочувальний фонд водіїв-технологів;

$$УП = 513,82 \cdot (3\Phi_2)^2 - 202684 \cdot 3\Phi_2 + 20524754,389 \quad (R^2 = 0,7783),$$

де $3\Phi_2$ - заохочувальний фонд водіїв автосамоскидів;

$$УП = 648,79 \cdot (3\Phi_3)^2 - 227753 \cdot 3\Phi_3 + 20524575,327 \quad (R^2 = 0,7552),$$

де $3\Phi_3$ - заохочувальний фонд робітників ремонтної групи.

Коефіцієнти трудової участі груп визначаються за формулами

$$k_1 = 3\Phi_1 / 3\Phi; \quad k_2 = 3\Phi_2 / 3\Phi; \quad k_3 = 3\Phi_3 / 3\Phi,$$

де k_1, k_2, k_3 – заохочувальні коефіцієнти для водіїв-технологів, водіїв автосамоскидів і працівників ремонтної групи відповідно.

Цільову функцію економіко-математичної моделі можна представити як $П_y = f(3\Phi_1, 3\Phi_2, 3\Phi_3) \rightarrow \max$, яка має наступні обмеження $3\Phi_1 \geq 3\Phi_{1\min}; 3\Phi_2 \geq 3\Phi_{2\min}; 3\Phi_3 \geq 3\Phi_{3\min}$, де $3\Phi_{1\min}, 3\Phi_{2\min}, 3\Phi_{3\min}$ - мінімальні значення величини заохочувального фонду для водіїв-технологів, водіїв автосамоскидів та для робітників ремонтної групи відповідно.

Рекурентні співвідношення мають вигляд

$$f_1(3\Phi) = g_1(3\Phi), \text{ для заохочувального фонду робітників ремонтної групи;}$$

$$f_k(3\Phi) = \max\{g_k(3\Phi_k) + f_{k-1}(3\Phi - 3\Phi_k)\}, \quad k = 2, 3.$$

Для останніх двох груп робітників (водіїв автосамоскидів та робітників ремонтної групи) $k = 2$ та для всіх трьох груп робітників $k = 3$.

Результати оптимізації за покроковими розрахунками показують, що максимальний $УП$ при розподілі загальної суми фонду у розмірі 700 тис. грн серед працівників цеху буде тоді, коли водіям-технологам і водіям автосамоскидів виділяють кошти у розмірі 231,832 тис. грн (34%) та 197,232 тис. грн (29%) відповідно, а робітникам ремонтної групи – 259,609 тис. грн (37%). З урахуванням коефіцієнтів трудової участі $k_1 = 0,337; k_2 = 0,286; k_3 = 0,377$ запропоновано зменшити розміри заохочувальних фондів для водіїв-технологів і водіїв автосамоскидів на 12%, а для робітників ремонтної групи збільшувати на 16%. Тоді умовний прибуток цеху збільшиться на 8%.

Як видно з наведених прикладів задач, кожна з них носить конкретний характер і вимагає розуміння економічної і технологічної суті досліджуваних процесів, а також врахування значної кількості показників, що характеризують ці процеси і впливають на їх ефективність.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Наведений у статті аналіз з досвіду використання оптимізаційних задач в економічній сфері обмежується спрощеним уявленням про

сутність економіко-математичного моделювання процесів і явищ та ґрунтується переважно на кореляційних взаємозв'язках. Запропонована стаття надає можливість поширити інструментарій для вирішення актуальних задач реального виробництва за допомогою класичного підходу до процесу моделювання з використанням методу динамічного програмування. Запропоновані підходи обумовлені власним досвідом вирішення таких задач магістрантами при виконанні кваліфікаційних робіт. Застосування зазначеного методу оптимізації не обмежується тільки задачами, наведеними у статті, і може бути поширеним на вирішення й інших економічних задач, що є предметом подальших досліджень.

Список літератури

1. Освітньо-професійна програма «Економіка» другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 051 «Економіка» галузь знань «05 Соціальні та поведінкові науки» кваліфікація магістр з економіки. URL: <https://eoup.knu.edu.ua/projects>
2. Зеленко С.В., Гуляницька Д.В. Економіко-математичне моделювання отриманого прибутку підприємства. *Економічні науки. Серія «Облік і фінанси»*. 2019. Вип. 16 (61). С. 72-84.
3. Щербініна С.А., Клименко О.Г., Марочко Т.Р. Застосування економіко-математичного моделювання для аналізу діяльності промислового підприємства. URL: <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/6151>
4. Хорошун В.В., Науменко І.А. Економіко-математичні методи та моделі прогнозування збутової логістики торговельного підприємства. *Причорноморські економічні студії*. 2018. Вип. 28-2. С. 179-183.
5. Назаренко І.М. Економіко-математичне моделювання залежності фінансового стану підприємств від складових капіталу. *Економіка та держава*. 2016. № 2. С. 65-68.
6. Юрчук Н.П. Використання економіко-математичних методів в управлінні економічним розвитком інноваційних систем. *Інвестиції: практика та досвід*. 2015. №18. С. 28-32.
7. Паршина О.А., Паршин Ю.І. Економіко-математичне моделювання виробництва гірничорудних машин крупного машинобудівного підприємства. *Економічний вісник НГУ*. 2005. №1. С. 128-134.
8. Гончаренко Я.В. Економіко-математичні методи та моделі в системі підготовки студентів математичних та економічних спеціальностей. URL: <http://enpuir.npu.edu.ua/handle/123456789/15441>
9. Бугір М.К. Математика для економістів: посібник. Київ: Видавничий центр «Академія», 2003. 520 с.

УДК 622.684: 622.271

В.І. ПАХОМОВ, канд. техн. наук, доц., І.В. ГІРІН, ст. викл.
Криворізький національний університет

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМУ РОБОТИ АВТОТРАНСПОРТУ ГЛИБОКИХ КАР'ЄРІВ

Мета. Метою роботи є розробка методу енергетичної оцінки та практичних рекомендацій щодо зниження енергоємності транспортних систем глибоких кар'єрів за рахунок підвищення інтенсивності використання технологічних автосамоскидів шляхом оптимізації та вдосконалення планування їх продуктивності в конкретних умовах залізрудних кар'єрів.

Методи дослідження. У роботі використано методи статистичного та кореляційно-регресійного аналізу, аналітичні розрахунки, виконано узагальнення опублікованих теоретичних розробок. Наукові положення, висновки та рекомендації обґрунтовані аналізом досвіду планування продуктивності технологічних автосамоскидів на залізрудних кар'єрах; достатнім обсягом експериментальних досліджень із оцінкою точності результатів за критеріями математичної статистики; збіжністю результатів теоретичних досліджень із результатами дослідно-промислових випробувань; ефективністю впровадження на кар'єрах Криворізького басейну норм змінної продуктивності та рекомендацій щодо раціональних умов продуктивної експлуатації технологічних автосамоскидів, розроблених на основі виконаних досліджень.

Наукова новизна роботи полягає у: - розробці диференційованого методу вибору параметрів доріг, залежно від просторового розвитку поля кар'єра та вантажності автосамоскида; - встановленні схеми утворення раціональних профілів кар'єрних автошляхів; - створення нової методології для оцінки значущості та ступеня впливу факторів, що визначають економічність інформаційної панелі автомобілів на основі положень теорії планування екстремальних експериментів та дозволяють передбачити ресурсозбереження транспортних засобів в динаміці технічних умов експлуатації.

Практична цінність роботи полягає у підвищенні продуктивності автотранспорту на кар'єрах Криворізького басейну за рахунок застосування: - зон ефективної роботи автотранспорту в кар'єрі залежно від його вантажопідйомності, удосконалення приводу трансмісії та рівня технічного стану автосамоскидів; - раціональних параметрів поздовжніх профілів автомобільних з'їздів; - підвищення надійності та точності планування змінної роботи транспортних засобів.

Результати. В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що при застосуванні автосамоскидів великої вантажності раціональним поздовжнім профілем для автодоріг глибоких кар'єрів є увігнутий, який забезпечує швидкість руху навантажених автомобілів-самоскидів на 2-5% вище, ніж прямо похилий та на 3-9% вище, ніж опуклий

Ключові слова: кар'єрний автосамоскид, поздовжній профіль, умови експлуатації

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-27-34

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. В теперішній час при видобутку корисних копалин відкритим способом дедалі гостріше постає проблема суттєвого скорочення споживання палива. Витрати на технологічний транспорт для середніх по глибині залізородних кар'єрів досягають 50% повної собівартості видобутку корисної копалини, а для глибоких кар'єрів перевищують цей показник. При цьому рівень використання паливних ресурсів за основними показникам не відповідає сучасним вимогам. Тому підвищення ефективності функціонування транспортних систем кар'єрів робить суттєвий внесок у зниження собівартості видобутку корисних копалин. Одним із засобів скорочення витрати палива у найближчій перспективі є створення інноваційних, у тому числі комбінованих силових установок, які дозволять використовувати особливості експлуатації таких автосамоскидів на конкретних кар'єрах гірничодобувних підприємств. Іншим шляхом вирішення цієї проблеми є удосконалення дорожніх умов експлуатації автотранспорту, які становлять суттєвий вплив на паливну економічність рухомого складу

Аналіз досліджень і публікацій. Широке застосування в США і Канаді отримала технологія малої добавки водню до дизельного палива в системі живлення великих вантажівок. Особливість системи живлення вантажівок полягає в тому, що вона оснащується системою впорскування водню СНЕС ННІ. Система СНЕС ННІ за допомогою електролізного апарату розкладає дистильовану воду на водень і кисень, та направляє отримані гази у впускний колектор двигуна. При цьому апарат виділяє зовсім небагато водню (близько 5% за вагою), якого, звісно ж, не вистачає для роботи дизельного двигуна - останній основну енергію, як і раніше, отримує від згоряння дизельного палива. Однак результати експлуатації підтвердили теоретичні висновки вчених про те, що невелике додавання водню підвищує повноту згоряння дизельного палива. При цьому різко (на 60÷70%) знижується токсичність викидів, зменшуються експлуатаційні витрати дизельного палива на 10% і збільшується ККД двигуна.

В даний час розроблена система переобладнання дизелів на роботу за газодизельним процесом із застосуванням стисненого природного газу і постійною добавкою (уприскуванням 15-20%) запального заряду дизельного палива [6]. Кількість метану, яка подається, залежить від навантаження двигуна. Система включає стандартну паливну апаратуру конвертованого дизеля і додаткову газову систему живлення, яка містить балони високого тиску для стисненого природного газу. Крім того, в систему входять апаратура обмеження подачі паливного насоса і прилади контролю та управління.

Робота двигуна за газодизельним процесом дає наступні переваги по відношенню до дизельного: знижується витрата дизельного палива на 80-90%; підвищується термічний ККД двигуна на 5%; знижується на 70-80% вміст токсичних речовин у відпрацьованих газах; збільшується в 2-3 рази термін служби моторної оливи і в 1,5-2 рази двигуна; зменшується трудомісткість переобладнання двигуна, внаслідок меншого обсягу конструктивних змін дизеля при його конвертації на газове паливо.

Постановка завдання. Враховуючи сталий стан з енергоносіями, який в тому числі значно відчутний при роботі кар'єрного автотранспорту, для підвищення ефективності його роботи можливо рухатися у напрямку удосконалення приводу трансмісії автосамоскидів, а також сформувати новітній підхід до проектування кар'єрних доріг, особливо тих їх параметрів, які істотно впливають на економічність експлуатації автосамоскидів, а також обумовлюють витрати на гірничі роботи в цілому. Тож обґрунтування параметрів автошляхів, що розташовані у системі постійних кар'єрних виробок та забезпечують умови ефективного застосування великовантажних автосамоскидів на кар'єрах в теперішній час є завданням, яке має практичне та наукове значення.

Викладення матеріалу та результати. При переобладнанні дизельного двигуна на газодизельний процес спостерігається зменшення ефективної потужності всього на 3-5%. Це зниження пов'язане не тільки з меншою енергоємністю газоповітряної суміші, а й істотно меншими швидкостями її згоряння по відношенню до дизельно-повітряної суміші. Швидкість поширення

фронту полум'я згоряння метану становить 0,45 м/с і тому при використанні стисненого природного газу (СПГ) необхідно здійснювати займання з великим випередженням впорскування запального палива. Оптимальні значення кутів випередження впорскування запального палива для метану на 5-10% вище по відношенню до дизельного палива.

Деяко відмінним від дизельного палива виявився вплив на індикаторну характеристику двигуна складу газоповітряної суміші [6]. Так коефіцієнт наповнення циліндрів двигуна при роботі на СПГ на 4-6% менше, ніж при роботі на дизельному паливі через малу щільності метану. Максимальні значення ефективної потужності досягнуті при $\alpha = 0,95-1,05$. Швидкість дифузії і коефіцієнт дифузії метану в повітрі в 3-4 рази вище, ніж дизельного палива. Тому застосування газового палива забезпечує відносно високу рівномірність розподілу заряду по циліндрах і в результаті цього спостерігається більш м'яка робота двигуна. Застосування СПГ сприяє підвищенню термічного ККД газодизельних двигунів на 5%, абсолютне значення яких вище ніж газових турбін, і для чотиритактного двигуна становить 38-41%.

Використання СПГ сприяє зниженню корисної вантажопідйомності автомобіля до 10% через високу питому металоємність газобалонної установки. На 1 кг стисненого газу припадає 9-12 кг маси металу. Залежно від марки сталі відношення маси балона до його ємності складає: - 1,6-1,9 кг/л (для вуглецевої сталі); - 0,9-1,2 кг/л (для легованої сталі); - 0,5-0,7 кг/л (для фіброметалу, що застосовується італійською фірмою Faber).

Характерною особливістю робочого процесу, що визначає надійність газодизельного двигуна в цілому, є більш м'яка його робота. Це обумовлено властивостями газового палива, тобто якісним, рівномірно-однорідним складом горючої суміші. Крім того, відсутність рідких фракцій в робочій суміші, що надходить в камеру згоряння двигуна, захищає мастило від розрідження і збільшує терміни його служби, а головне, поліпшуються умови змащення і збільшуються терміни міжремонтного пробігу двигуна. При сприятливих умовах змащення моторне мастило в меншій мірі забруднюється механічними домішками, що дозволяє збільшити регламентовані інтервали зміни не тільки моторного мастила, але і масляних фільтрів. Наявність меншої кількості відкладень сприяє зменшенню зносу тертьових деталей двигуна, в результаті чого ресурс газодизельного двигуна, що працює в більш сприятливих умовах, на 30-50% вище дизельного. Залежно від режиму роботи двигуна на стиснутому природному газі зниження шуму досягає 7-8 дБ.

В цілому газове паливо дає менше відкладень як в самому двигуні, так і в системі живлення. Низька інтенсивність старіння моторного мастила пояснюється тією обставиною, що зміст абразивних забруднюючих домішок, а також сірки в газовому паливі в 4-5 разів менше, ніж в дизельному паливі. Крім того, повнота згоряння газового палива значно вище, ніж дизельного палива, що веде в свою чергу до різкого зниження кількості продуктів неповного згоряння в газових двигунах [6].

При рівних потужностях двигунів і однаковому пробігу кількість забруднень в газових двигунах в 10-20 разів менше, ніж в дизельних двигунах. Тому рекомендується режим заміни моторного мастила і масляних фільтрів для газобалонних автомобілів збільшити в 5 разів до 10 тис. км пробігу.

При переобладнанні дизельного двигуна на газодизельний процес мінімальна питома витрата палива по зовнішній характеристиці у газового двигуна на 3-4% більше, ніж у дизеля. Однак у зв'язку з тим, що вартість газу в три рази менше, ніж дизельного палива, експлуатаційні витрати на паливо при роботі на газі становитимуть лише 10-15%, в той час як частка витрат на дизельне паливо в собівартості перевезення для кар'єрних автосамоскидів складає 25-40%.

Економічність використання стисненого природного газу на автомобілях з дизельним двигуном обумовлюється тим, що природний газ має більш високе (100-110) октанове число, ніж бензин. Тому в дизелях внаслідок застосування високих ступенів стиснення і розширення з газовим паливом досягаються найбільші індикаторний і ефективний ККД перетворення паливної енергії в корисну роботу, а питома перевитрата газу щодо дизельного палива мінімальна.

Крім того, питома витрата оливи в газодизелях менше на 5-10%, а в газових двигунах на 10-20%, ніж в дизелях, що пов'язано з меншим забрудненням мастила і збільшенням його термінів служби до заміни в 1,5-2 рази.

Зараз, як ніколи раніше, екологічні переваги газобалонних автомобілів повинні обумовлювати доцільність їх застосування при роботі в кар'єрах, де забруднення повітряного басейну створює серйозну загрозу здоров'ю працівників та жителів міста. Стиснений природний газ володіє

властивістю більш повного згоряння в двигуні зі значно меншим утворенням токсичних речовин у відпрацьованих газах [6].

Теоретичні дослідження по визначенню впливу дорожніх умов експлуатації на паливну економічність автомобілів-самоскидів полягали в розробці математичної моделі і прикладних програм на комп'ютері для визначення раціонального поздовжнього і поперечного профілю кар'єрних автодоріг [4,5]. У розробленій математичній моделі використовується диференціальне рівняння швидкості руху автомобіля-самоскида від довжини маршруту, в якому враховується залежність коефіцієнта сумарного опору кар'єрних автодороги від відстані перевезення [25]

$$\frac{dV}{dl} = \frac{g(D(V) - \Psi(l))}{\delta(V) \cdot V_{cp}(l)} \quad (1)$$

де g - прискорення сили тяжіння; D - динамічний фактор автомобіля; $\Psi(l)$ - сумарний опір дороги руху; $V_{cp}(l)$ - середня швидкість автомобіля на пройденому відрізку ділянки; $\delta(V)$ - коефіцієнт урахування впливу обертових мас автомобіля.

Для розв'язання поставленого завдання вирішимо щодо швидкості V рівняння динамічного фактора D

$$D = \frac{P_k - P_w}{G} \quad (2)$$

де $P_w = k \cdot F \cdot V^2$ - сила опору повітря, H ; F - лобова площа автомобіля, m^2 ; k - коефіцієнт опору повітря, що залежить від форми і якості поверхні автомобіля, $H \cdot сек^2/m^4$; P_k - тягова сила на ведучих колесах самоскида, H ; G - повна вага автомобіля, H .

Для кар'єрних автосамоскидів з електромеханічною трансмісією потужність, що передається від первинного (дизельного) двигуна на ведучі колеса автомобіля, дорівнює

$$N_k = N_e \eta_p \eta_d \eta_{всп} \eta_c = N_{\Gamma} \eta_p \eta_d = I_{\Gamma} U_{\Gamma} \eta_d \eta_p \times 10^{-3}, \quad (3)$$

де N_k - потужність на ведучих колесах автомобіля-самоскида, кВт; $\eta_{всп}$ - коефіцієнт, що враховує втрати потужності двигуна на привід допоміжного обладнання; η_c - к.к.д. електричної мережі; N_e - ефективна потужність двигуна, кВт; η_p - к.к.д. редуктора мотор-колеса; N_{Γ} , I_{Γ} , U_{Γ} - відповідно потужність, сила струму і напруга силового генератора; η_d - к.к.д. тягового електродвигуна

Потужність, споживана генератором автомобіля-самоскида БелАЗ-7519, дорівнює $N_{св} = 870$ кВт - вільна потужність.

$$N_{\Gamma} = I_{\Gamma} U_{\Gamma} \cdot \eta_c N_{св} = 0,92 \times 870 = 800 \text{ кВт},$$

де $\eta_c = \eta_{\Gamma} \cdot \eta_{в} = 0,945 \times 0,975 = 0,92$; $\eta_{в}$ - к.к.д. випрямляча; η_{Γ} - к.к.д. генератора

Тягові електродвигуни забезпечують реалізацію заданої граничної і часткової тягових характеристик автомобіля відповідно до виразу

$$N_k = P_k V \times 0,272 \times 10^{-3} \quad (4)$$

Прирівнявши вирази (3) і (4), отримаємо залежність тягового зусилля P_k на ведучих колесах від швидкості руху V автомобіля при номінальній вільній потужності $N_{св}$

$$P_k V \times 0,272 \times 10^{-3} = I_{\Gamma} U_{\Gamma} \eta_d \eta_p \times 10^{-3},$$

$$P_k = (3,68 \eta_d \eta_p I_{\Gamma} U_{\Gamma}) / V, \quad (5)$$

де V - швидкість руху автосамоскида, км/год.

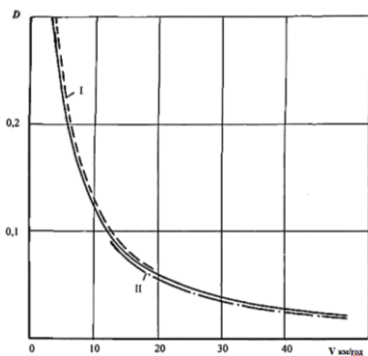


Рис. 1. Динамічна характеристика $D = f(V)$ самоскида БелАЗ-7519

З використанням формули (2) і залежностей $P_k = f(V)$, $P_w = f(V)$ отримана залежність динамічного фактора для навантаженого автомобіля-самоскида БелАЗ-7519 (рис. 1). Вирівнювання кривої $D = f(V)$ з високою точністю зробимо по гіперболі виду

$$D = \frac{A}{B + C \cdot V}, \quad (6)$$

де A , B , C - емпіричні константи для даного автомобіля-самоскида, які визначаються з умови, що отримана крива повинна збігатися з кривою, яка вирівнюється в трьох точках: D_{max} ($V =$

V_0), D_{cp} ($V = V_{cp}$), D_{min} ($V = V_{max}$).

Вирішуючи систему рівнянь

$$D(V) \begin{cases} D_{\max} = A/(B + CV_0) = A/B & V_0 = 0, & D_{\max} = 1,2; \\ D_{cp} = A/(B + CV_0) & V_{cp} = 15 \text{ км/год} & D_{cp} = 0,08; \\ D_{\min} = A/(B + CV_0) & V_{\min} = 50 \text{ км/год} & D_{\min} = 0,02, \end{cases}$$

отримуємо вираз для визначення констант

$$A = \frac{D_{\max}^2 \cdot D_{cp} \cdot V_{cp}}{D_{\min}^2 \cdot (D_{\max} - D_{cp}) \cdot V_{\max}}; \quad (7)$$

$$B = \frac{D_{\max} \cdot D_{cp} \cdot V_{cp}}{D_{\min}^2 \cdot (D_{\max} - D_{cp}) \cdot V_{\max}}; \quad (8)$$

$$C = \frac{D_{\max}}{D_{\min}^2 \cdot V_{\max}}. \quad (9)$$

При підстановці значень швидкості автомобіля V в м/сек, гіперболічна функція $D(V)$ має вигляд

$$D = \frac{77,14}{69,29 + 216 \cdot V}.$$

Сумарний опір дороги руху визначається з виразу

$$\Psi = f_k \pm i \quad (10)$$

де f_k - коефіцієнт опору кочення; i - ухил поздовжнього профілю дороги.

Коефіцієнт опору кочення на всіх ділянках прийнятий умовно постійним, так як рух кар'єрного автотранспорту відбувається, як правило, по добре укоченим щебеневим і гравійним дорогам, що оброблені мінеральними або рідкими в'язкими речовинами. При цьому сумарний опір руху залежить в основному від геометричних елементів поздовжнього профілю кар'єрних доріг, які відрізняються один від одного величиною, чергуванням і протяжністю ухилів.

Для визначення залежності $\Psi = f(l)$ розглянемо геометричні елементи поздовжнього профілю типової кар'єрної дороги кар'єру «Північного ГЗК», яка представлена на рис. 2. Інформація про геометричні елементи поздовжнього профілю кар'єрних доріг при висоті підйому гірничої маси $H_n = 100$ м виписана з робочих проектів кар'єра. При цьому для кожного елемента поздовжнього профілю з робочого проекту виписуються такі величини: ухил i , виражений в %, зі знаком плюс на підйомі і кратний 10 %; довжина l ділянки постійного ухилу, виражена в кілометрах.

Рис. 2. Залежність ухилу поздовжнього профілю (i) типової автомобільної дороги від її довжини (l) для умов нижніх горизонтів кар'єру «Північного ГЗК»

Інтерполююча функція $\Psi = f(l)$ представлена поліномом Ньютона

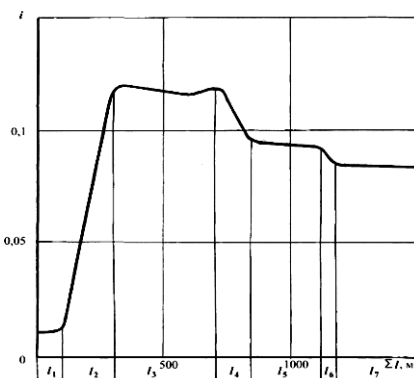
$$\Psi(l) = \sum_{i=0}^n a_i \cdot l^i = a_0 + a_1 \cdot l + a_2 \cdot l^2 + \dots + a_n \cdot l^n. \quad (11)$$

Беручи коефіцієнт опору коченню рівним $f_k = 0,05$ і використовуючи програму, обчислюємо коефіцієнти $a_0 \dots a_n$ степеневого многочлена. Коефіцієнт обліку обертових мас автомобіля з механічною коробкою зміни передач визначається з виразу

$$\delta = 1 + \left[(I_m + I_n) \cdot U_{T,\max}^2 + \sum I_k \right] \cdot \frac{g}{r_k^2 \cdot G}, \quad (12)$$

де I_n - зведений момент інерції обертових деталей двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$ (без маховика); I_m - момент інерції маховика двигуна, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; $U_{T,\max}$ - передавальне число трансмісії; $\sum I_k$ - сумарний момент інерції усіх коліс, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$; r_k - радіус колеса; g - прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$; G - повна вага автомобіля, кгс .

Для чисельного рішення диференціального рівняння (1) формулу (12) в представленому вигляді використовувати не можна, так як вона не відображає зв'язок ні зі швидкістю, ні з відстанню перевезень. Для кар'єрних самоскидів родини БелАЗ іншими дослідниками була



експериментально встановлена залежність зміни коефіцієнта інерції обертових мас від швидкості навантаженого автомобіля (до $V_{\max} = 15$ м/с) [5]

$$\delta = 0,00046 V^2 - 0,0152 \cdot V + 1,188 \quad (13)$$

Представлена залежність може бути використана для чисельного рішення диференціального рівняння (1) і визначення залежності $V = f(l)$

$$dV = \frac{[D(V) - \Psi(l)] \cdot g}{\delta(V) \cdot V_{cp}(l)} \cdot dl.$$

Для визначення раціонального поздовжнього профілю автомобільної дороги при розробці глибоких горизонтів кар'єра диференціальне рівняння (1) вирішимо чисельним методом Рунге-Кутта при початкових умовах $l_0 = 0$, $V_0 = 1,0$ м/с і постійному кроці рішення $h = 2$ м. В результаті застосування комп'ютерного моделювання тягового режиму руху автомобілів-самоскидів вантажопідйомністю 110т встановлено, що раціональним поздовжнім профілем автодоріг на глибоких горизонтах є увігнутий, який забезпечує швидкість руху навантажених автомобілів-самоскидів на 3-9% вище, ніж опуклий і на 2-4% вище, ніж прямо похилий. Досягнення на увігнутому поздовжньому профілі більшої швидкості руху пояснюється, перш за все, тим, що такий профіль обумовлює більш сприятливий навантажувальний режим роботи вузлів і агрегатів автомобіля-самоскида, а також сприяє раціональному використанню сили інерції автомобіля, що рухається. При цьому енергетичні витрати автомобіля-самоскида при русі по автодорозі з увігнутим поздовжнім профілем менші, ніж при русі по прямо похилому і опуклому профілю [4,5]. За рахунок раціонального використання сили інерції автомобіля-самоскида, що рухається по автодорозі з увігнутим профілем, досягається більш висока швидкість при входженні його на ділянки з ухилами поздовжнього профілю більш 90-100 %.

Величина відносного перевищення швидкості автомобіля-самоскида на увігнутому поздовжньому профілі визначається з виразу

$$\eta_v = \frac{\bar{V}_1 - \bar{V}_2}{\bar{V}_2} \cdot 100\%. \quad (14)$$

де $\bar{V}_1$ та $\bar{V}_2$ - середня швидкість навантаженого автомобіля-самоскида на увігнутому і опуклому профілях дороги.

Розрахунки швидкості руху для реальної дороги та дороги, яка моделюється з увігнутим поздовжнім профілем, показали хорошу збіжність результатів. Згода кривих розподілу відхилення швидкості при натуральному експерименті і моделюванні режиму руху оцінювалося за критерієм Пірсона χ^2 . Для кривої моделювання величина $\chi^2 = 4,159$, а експериментальної - $\chi^2 = 7,815$ [5]. Порівняння значення критерію χ^2 показує, що на 5% -му рівні значущості розроблена модель адекватна реальному процесу.

Висновки і напрямки подальших досліджень. В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що раціональним поздовжнім профілем для кар'єрних автодоріг є увігнутий, який забезпечує швидкість руху навантажених автомобілів-самоскидів на 3-9% вище, ніж опуклий і на 2-5% вище, ніж прямо похилий.

Дослідження також дозволили встановити, що раціональним поперечним профілем кар'єрної автодороги є також увігнутий, який забезпечує зменшення величини коефіцієнта опору коченню коліс на 12-23%, що обумовлює збільшення швидкості руху автомобілів-самоскидів. По питомій витраті палива на увігнутому поздовжньому і поперечному профілі досягається економія в розмірі 2-5% в порівнянні з опуклим поперечним і поздовжнім профілем.

Досягнення на увігнутому поздовжньому профілі більшої швидкості руху пояснюється, перш за все, тим, що такий профіль обумовлює більш сприятливий навантажувальний режим роботи вузлів і агрегатів автомобіля-самоскида, а також сприяє раціональному використанню сили інерції автомобіля, що рухається. Це в свою чергу призводить до зменшення енергетичних витрат на виконання транспортної роботи.

Таким чином поліпшення умов експлуатації автомобілів-самоскидів шляхом зменшення сил опору їх руху за рахунок застосування раціонального поздовжнього і поперечного профілю кар'єрних автодоріг є важливим завданням для відповідних підрозділів гірничорудних підприємств.

Список літератури

1. **Монастирський Ю. А.** Питання експлуатації та безпеки роботи кар'єрного автотранспорту / Жуков С. О, Монастирський Ю. А., Янова Л. О. // – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2008. – 202 с.
2. **Почужевський О.Д.** Шляхи скорочення витрат дизельного пального під час експлуатації самохідних машин / О.Д. Почужевський // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. пр. – Кривий Ріг, 2014. – Вип. 36. – С. 267-272.
3. **Сістук В. О.** Результати лабораторних та промислових досліджень концепції застосування силового довороту на великовантажних кар'єрних самоскидах / В. О. Сістук // Вісник КНУ. – Вип. № 35. – Кривий Ріг. – 2012. – С. 262–266.
4. **Пахомов В.И.** Обоснование рациональных условий организации эксплуатации автомобилей-самосвалов в процессе разработки глубоких горизонтов карьеров: Дис. на здобуття наукового ступеня кандидата техн. наук.- К.: КАДІ, 1991.-206с.
5. **Пахомов В.И.** Обоснование рациональных дорожных условий при эксплуатации автомобилей-самосвалов на глубоких горизонтах карьеров. / Пахомов В.И., Босняк Н.Г., Лепский К.Г.// Матеріали Всеукраїнської Науково-технічної конференції «Шляхи вирішення проблем експлуатації спеціалізованих автотранспортних засобів», -Кривий Ріг. -КТУ -2003. - С.24-26.
6. **Пахомов В.И.** Эффективность использования газодизельной системы питания на карьерных автосамосвалах. / Пахомов В.И., Гирин И.В. // Матеріали Всеукраїнської Науково-технічної конференції «Шляхи вирішення проблем експлуатації спеціалізованих автотранспортних засобів», -Кривий Ріг. - ДВНЗ КНУ -2012. - С.49-63.
7. **Галиев С.Ж.** The Automated System Of Disputcing Of ExcavatorRailway Complex Work On Open-Pit – «ADIS-RT» / С.Ж. Галиев, А.С. Бектуреев, К.К. Жусупов, К.К. Иванов., Е.Н. Сейтаев, Е.Н. Татишев, Е.А. Шабельников // Proceedings of the 16th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection (MPES 2007) and the 10th International Symposium on Environmental Issues and Waste Management in Energy and Mineral Production (SWEMP 2007). – Bangkok, Thailand. – 2007. – P. 330–337.
8. **Zberovskiy V.A.** Enhancing the environmental safety of opencast vehicles / V.A. Zberovskiy, A.N. Korobochka, B.E. Sobko // Scientific Report on Resource Issues 2016. – Volume 1. – Bergakademie Freiberg. – 2016. – p. 420-425.
9. **Latino M.A.** BehavioralBasedReliability [Электронный ресурс] / М.А. Latino// 2000 MachineryReliabilityConference. –Электронные текстовые данные. –2000. –April. –Режим доступа: <http://reliability.com/industry/articles/article36.pdf>
10. **Шамрай О.В.** Формування кар'єрних рудопотоків для стабілізації якості руди: дисертація на здобуття вченого ступеню кандидата техн. наук : 05.15.03 / О.В. Шамрай.// – Кривий Ріг, 2009. – 140 с.
11. **Azaryan Vladimir** Use of Bourger-Lambert-Bera law for the operative control and quality management of mineral raw / Albert Azaryan, Vladimir Azaryan // Metallurgical and Mining Industry : Ukrmetallurginform"STA" Ltd. Украина, 2015. – No. 1. – С. 4–8.
12. **Kuo Y.** Highway earthwork and pavement production rates for construction time estimation // Ph.D. Thesis, University of Texas, USA. – 2004.
13. **Лучко М.І.** Вдосконалення роботи промислового автотранспорту в умовах кар'єру на підставі раціонального планування транспортного процесу / Лучко М.І., Кученко В.І. // -Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. - 2004. - № 7 (77) ЧІ. - С. 230-234.
14. **Зберовський В.О.** Оптимізація витрат дизельного палива та рівня забруднення атмосферного повітря продуктами його згорання при експлуатації кар'єрних автосамоскидів / В.О. Зберовський // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми екологічної безпеки» 8-9 жовтня 2014 р. м. Кременчук, КрНУ, 2014.- С. 20.
15. **Brown C.** Autonomous vehicle technology in mining // Engineering and Mining Journal – January 2012 – P. 30-32.
16. **Крейсман Е.А.** Аналіз гірничо-технічних умов експлуатації та режимів руху великовантажних самоскидів Криворізького регіону / Крейсман Е.А., Монастирський Ю.А., Веснін А.В., Гальченко А.В. // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: Науково-виробничий збірник / АДІ ДонНТУ. –2012. – № 1(14). – С. 115-119
17. **Bastos G.S.** A single-dependent agent approach for stochastic timedependent truck dispatching in open-pit mining / G.S. Bastos, L.E. Souza, F.T. Ramos, C.H. Ribeiro // 14th Int. IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. – Washington DC, USA, 5-7 Oct 2011. – P. 1057-1062
18. **Kaufman Walter W.** Design of surface mine haulage raads -a manual. / Kaufman Walter W., Ault James C // Inform. Circ. Bur. Mines. U.S. Dep. Inter., 1977, №8758.- 68 pp.
19. **Garcia Jvejero** Dumperes y pistas de acarreo sudiseno, pendientes, longitudes y costes de construcci6n. / Garcia Jvejero // "Rocas y miner", 1987, 15, №188.- p.76-84, 87-89.
20. **Prizzell E.M.** Trucks versus high-angle conveyor haulage in open pit mines. / Prizzell E.M., Mivissen E.A. // Mining Congress S., 1981, v.67, pp.19-26.
21. **Himehaugh A.E.** Computer-based truck dispatching in the Tyrone Mine. / Himehaugh A.E. // -Mining Congress J., 1980, No.66, 11, pp. 16-21.
22. **Wayne K. Schroeder.** Energy regeneration for surface-mine haulage trucks / K. Schrotder Wayne // Mining Magazine. 1993. - Vol. 148. - №6. - P. 456 -463.
23. **Golubeva A.S.** Improved economic stimulation mechanism to reduce vehicle CO2 emissions/ A.S. Golubeva, E.R. Magaril// WIT Transactions on the Built Environment, 130. – UK: WIT Press, 2013. – P. 485-494
24. **I. N. Varakin.** Application of ultracapacitors as traction energy sources / I. N. Varakin et al // Thesis of 7th International Seminar on Double Lauer Capacitors and Similar Energy Storage Devices, December 8-10, 1997. Florida: Deerfield Beach, 1997.-P. 87-91.
25. **Pakhomov V.I.** Rational profile for career roads / Pakhomov V.I., Hirin I.V., Monastyrskiy Yu.A., Tyshchenko V.Yu. // Вісник Криворізького національного університету : зб. наук. праць. – Кривий Ріг, 2021. – Вип. 53. – С. 102–107.

HARNESSING THE POWER OF ARDUINO SIMULATORS FOR EFFECTIVE IOT EDUCATION

Purpose. The Internet of Things (IoT) is changing the way we interact with the world around us. By connecting the devices and systems around us through the Internet, this technology is driving innovation in a multitude of industries. It increases the demand for professionals with knowledge and skills in IoT systems and technologies. To meet this demand, educational institutions are increasingly incorporating IoT-focused curricula and hands-on training for information technology professionals. This paper aims to explore the role of Arduino simulators in IoT training, especially in distance learning, and to comprehensively analyze the functionality and benefits of these virtual tools.

Research methods. A combination of literature review and analysis of popular Arduino simulators, by studying their advantages and disadvantages in the context of IoT learning.

Scientific novelty. An in-depth examination of the advantages of Arduino simulators as a powerful tool for teaching IoT in a distance learning environment. Providing a comprehensive analysis of their functionality and integration strategies, the importance of these virtual platforms in IoT education is justified.

Practical significance. The benefits of Arduino simulators are to demonstrate IoT education in distance learning environments. The analysis can contribute to developing effective strategies for using these virtual tools in IoT education. The potential of Arduino simulators for facilitating access to quality education and training of skilled professionals in the field of information technology is also highlighted.

Results. The study demonstrates the effectiveness of Arduino simulators in improving the quality of IoT education in distance learning. Through a detailed analysis of their functionality and benefits, the paper demonstrates the potential of these virtual platforms in developing interactive and dynamic learning experiences. The study highlights the applicability of Arduino simulators for facilitating teacher-student interaction, enhancing collaborative project development and experience sharing, and facilitating assessment of learning achievements.

Key words: Arduino simulators, IoT education, virtual platforms, pedagogical strategies, distance learning, blended learning.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-34-37

The problem and its connection with scientific and practical tasks. The Internet of Things (IoT) is rapidly evolving and becoming an integral part of modern society, with its ubiquitous presence in industries such as healthcare, agriculture, smart cities, and Industry 4.0. This technology connects the devices and systems around us to the Internet allowing real-time data collection, analysis, and decision-making [1,2].

IoT education faces many challenges, especially implementing distance learning programs. Traditional teaching methods have often been based on hands-on activities with physical equipment, which are difficult to replicate in remote environments. In addition, the dynamic and interdisciplinary nature of the IoT requires teachers to use innovative approaches to convey complex concepts and develop practical skills in students.

Arduino simulators have become a powerful solution to these challenges, offering a virtual environment that exactly mimics the functionality of physical Arduino boards. These simulators allow students to learn, practice, and experiment with programming and electronics, even in remote environments, and provide instructors with versatile tools to create engaging and interactive learning experiences.

Analysis of the recent research. Research in IoT education shows that Arduino is becoming an increasingly popular and widely used platform for learning programming and electronics [3-5]. This electronic platform allows students to learn programming and electronics by creating interactive projects, providing hands-on experience with basic IoT concepts such as sensors, actuators, communication protocols, and data analysis. As a convenient and versatile tool, Arduino plays an important role in preparing students for an IoT-based future [6-9].

Setting the task. The objectives of the study are to analyze the effectiveness of Arduino simulators when used in distance learning to improve students' learning of IoT concepts, as well as the advantages and challenges of their use in the educational process.

Research material and results. Arduino simulators have become an innovative solution for IoT training, especially in distance learning environments where access to physical equipment may be limited. These virtual platforms offer detailed emulation of Arduino boards, allowing students to learn programming and electronics concepts in a safe and controlled environment.

Based on the Arduino project, an open-source hardware and software system aimed at simplifying electronic project development, Arduino simulators were developed and evolved along with the growing interest in the IoT field. As the demand for affordable and cost-effective training tools grew, software developers introduced simulators that accurately reproduce the behavior of Arduino boards in a virtual environment [10]. These include the web-based simulators Wokwi [11], Tinkercad Circuits [12], and simulators in the form of desktop applications - Fritzing [13] and SimulIDE [14].

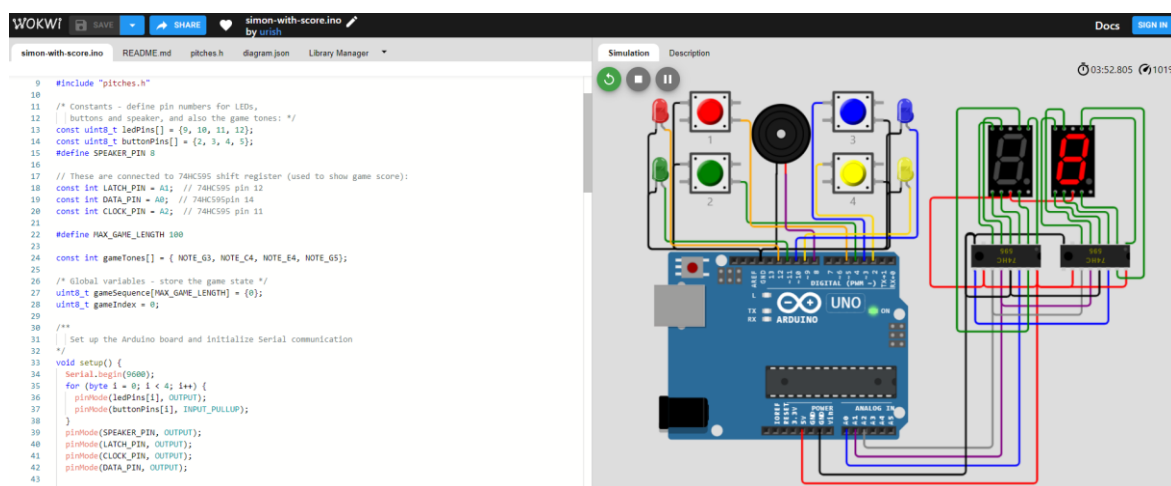


Fig. 1. The appearance of the Wokwi Web Simulator with the downloaded project [15]

These simulators include a range of features designed for novice and experienced users, offering a versatile learning experience for students with varying levels of familiarity with electronics and programming. They typically provide:

Realistic emulation: simulators aim to provide an authentic Arduino experience by emulating the behavior of genuine physical boards. This accurate replication allows students to test and verify their code, providing valuable insight into the real-world performance of their projects;

Integrated Development Environment (IDE): many Arduino simulators are equipped with an integrated development environment that allows users to write, compile, and download code to the virtual board. This feature greatly simplifies the learning process by offering a single platform for both software development and hardware emulation;

Component libraries: for simulating a wide range of electronic projects, Arduino simulators offer extensive libraries of virtual components, including sensors, actuators, and display modules. These extensive libraries allow students to explore different aspects of IoT systems and experiment with a variety of configurations;

Cross-platform: many Arduino simulators are presented as web applications, allowing them to be used on different operating systems. It also means there are no significant hardware requirements for using these tools.

Arduino simulators have many advantages. These virtual tools provide an affordable, efficient, and cost-effective alternative to physical equipment, making it easier for educators to teach IoT concepts and promote the development of practical skills in students. Among these benefits are:

Accessibility: By eliminating the need for physical hardware, Arduino simulators make IoT learning more accessible and inclusive. Students who do not have the means to purchase Arduino boards and components can learn programming and electronics using these virtual platforms;

Cost-effective: Arduino simulators provide a cost-effective solution for IoT education by reducing the costs associated with purchasing, maintaining, and upgrading physical equipment. This financial advantage allows educational institutions to allocate resources in better way and invest in other aspects of the curriculum;

Safety: Working with electronics and hardware components can be risky, especially for inexperienced students who may accidentally damage equipment or injure themselves. Arduino simulators provide a safe learning environment in which students can experiment with programming and electronics without the risk of damaging equipment or injuring themselves;

Instant feedback: Arduino simulators allow students to receive immediate feedback on their code and circuits. This instant feedback allows them to identify errors and troubleshoot more effectively, leading to a deeper understanding of basic concepts and promoting the development of problem-solving skills;

Scalability and flexibility: With extensive component libraries and the ability to emulate multiple Arduino boards, simulators provide a scalable and flexible learning platform that can adapt to different educational needs. Teachers can design lesson plans and assignments to suit different training levels and learning objectives, ensuring student engagement and interest throughout the course.

With distance learning becoming an everyday reality in our education, the necessity of including Arduino simulators in distance IoT courses is essential. It allows a blended learning approach, enhances students' ability to work collaboratively on projects, provides an interactive assessment of students during their work, and allows for iterative project development.

The challenge in using simulators in learning IoT can be the lack of physical interaction with Arduino electronic boards and components. In addition, simulators may have limited support for some hardware components and sensors. Teachers should consider these difficulties when designing appropriate training courses. At the same time, the benefits of using Arduino simulators to teach IoT principles outweigh the challenges, especially in a distance learning context.

Conclusions and directions for further research. The Internet of Things has quickly become a crucial field for a variety of industries as well as for everyday use. As a result, the necessity for effective IoT training has become paramount, especially in distance learning environments, where traditional teaching methods can become ineffective. Arduino simulators have proven to be an effective solution to the challenges faced by teachers and students alike, offering an affordable, cost-effective, and fun platform for learning programming and electronics.

The analysis of the use of Arduino simulators in IoT training allows us to move on to developing strategies for incorporating these virtual tools into the distance learning environment and using their potential to create interactive and dynamic learning experiences.

Developments in technology provide many opportunities for further research and development in introducing Arduino simulators into IoT education, which are versatile and powerful resources for teachers and students alike. By using the capabilities of these tools, it is possible to create an environment in which access to quality IoT education has been enhanced, learning efficiency is improved, and new information technology professionals have been trained.

References

1. **Мойсєсєнко В. В., Швець Д. В.** Розробка додатків для Інтернету речей з використанням технології Node.JS // XVI Всеукраїнська науково-практична конференція «Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі» (KICM). 21-23 березня 2023 р. Кривий Ріг: Криворізький національний університет, 2023. - С. 236-238.
2. **Wijaya H., Khairudin M.** Development of Arduino Assisted Microcontroller Instructional Devices in Vocational High Schools // Journal of Physics: Conference Series. - 2019. - №1413. - DOI: 10.1088/1742-6596/1413/1/012015.
3. **Borgia E.** The Internet of Things Vision: Key Features, Applications and Open Issues // Computer Communications. - 2014. - №54. - pp. 1-31.
4. **Pilz M.** The Future of Vocational Education and Training in a Changing World. - 2012. - 592 p. - DOI: 10.1007/978-3-531-18757-0.
5. **Evans D.** The Internet of Things: How the next evolution of the Internet is changing everything // CISCO White Paper. - 2011. - Vol. 1. - pp. 1-11.
6. **Zlatanov N.** Arduino and Open Source Computer Hardware and Software // ResearchGate. - 2015.
7. **Mouha R.** Internet of Things (IoT) // Journal of Data Analysis and Information Processing. - 2021. - Vol. 9. - pp. 77-101. - DOI: 10.4236/jdaip.2021.92006.
8. **Bashir A., Alhammadi M., Awawdeh M., Faisal T.** Effectiveness of using Arduino platform for the hybrid engineering education learning model // 2019 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET). - Dubai, United Arab Emirates, 2019. - pp. 1-6. - DOI: 10.1109/ICASET.2019.8714438.
9. **Alam M., Samsudin S., Kamaruddin M., Zakaria Z., Othman R.** Introducing Arduino as an Effective Online Distance Learning Tool in Final Year Project for Chemical Engineering Student // Asean Journal of Engineering Education. - 2022. - Vol. 6. - pp. 69-82. - DOI: 10.11113/ajee2022.6n1.88.
10. The Best Arduino Simulators of 2023 (Online & Offline) [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://all3dp.com/2/best-arduino-simulators-online-offline/>

11. Wokwi [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://wokwi.com>
12. Autodesk Tinkercad [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.tinkercad.com>
13. Fritzing [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://fritzing.org>
14. SimulIDE [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://www.simulide.com/p/home.html>
15. Simon Game for Arduino with Score display [Електронний ресурс] - Режим доступу: <https://wokwi.com/projects/328451800839488084>

УДК 621.771.001

В.А. ЧУБЕНКО, Л.Н. САЙТГАРСЄВ, Т.П. ЯРОШ, кандидати техн. наук, доценти,
А.А. ХІНОЦЬКА, ст. викладач
Криворізький національний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЖИМІВ ОБТИСНЕННЯ НА ВИТРАТИ ЕНЕРГІЇ ПРИ ХОЛОДНОМУ ПРОКАТУВАННІ ТОНКИХ ЛИСТІВ

Мета: дослідити процес холодного прокатування тонких сталевих листів за допомогою інженерної програми DEFORM 3D для визначення енергосилових параметрів обробки та встановити раціональні режими прокатування для підвищення енергоефективності процесу обтиснення.

Методи дослідження: для дослідження процесів, що відбуваються при виготовленні тонкого листа зі сталевих матеріалів методом холодного прокатування, було виконано моделювання з використанням комп'ютерної програми DEFORM 3D, яка дозволяє точно визначити технологію холодного прокатування та витрати енергії на процес. Під час моделювання було створено модель процесу холодної обробки тонкого листа; задані початкові дані, режими обтиснення і температура обробки, параметри руху прокатних валків та оброблюваної смуги, коефіцієнт тертя; обрано матеріал заготовки і встановлено його властивості. Визначено тип об'єктів моделювання, де встановлено, що інструмент має жорсткий тип, а оброблюваний матеріал – пластичний. Головним призначено верхній прокатний валок. При моделюванні процесу холодного прокатування листового матеріалу використовувався аналіз Лагранжа. Було визначено кількість кроків моделювання, яка дорівнювала 100. Обробка відбувалася у системі SI.

Наукова новизна: вперше отримані аналітичні залежності для визначення енергосилових параметрів холодного прокатування тонких сталевих листів за допомогою моделювання процесу методом дискретних елементів

Практична значимість: визначено раціональні режими обробки металу для удосконалення технологічного процесу холодного прокатування тонких листів.

Результати. Виконано дослідження процесу пластичної деформації матеріалу за криволінійною сіткою, визначено поле векторних переміщень і встановлено, що максимальне переміщення сталевих матеріалів здійснюється під дією верхнього прокатного валка, досліджено розподіл напружено-деформованого стану оброблюваного матеріалу і визначено максимальні напруження в зоні деформації. Вивчено розподіл зусиль прокатування і крутного моменту, що дозволило визначити їхні максимальні значення, які спостерігаються на 7-9 секунді обробки. В подальшому величина цих показників зменшується через зникнення захоплюваних сил і встановлюється сталий процес холодного прокатування.

Ключові слова: моделювання, осередок деформації, прокатний валок, тонкий лист, холодна прокатка, витрати енергії, комп'ютерна програма

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-37-42

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. У металургійній промисловості для отримання тонких листів широко використовуються технології прокатування в холодному стані. Такий технологічний процес дозволяє отримати листові вироби точного розміру та високої якості як зовнішньої поверхні, так і внутрішнього шару. Процес холодного прокатування є доволі трудомістким; крім того, для його реалізації потрібні великі витрати енергії та складне обладнання. Розподіл зусиль і деформації при обтисненні під час холодної обробки дуже складно дослідити у виробничих умовах через дуже високу вартість таких експериментів.

Використання комп'ютерних програм, здатних відтворювати процеси обробки металів тиском, дозволить значно спростити умови дослідження процесів прокатного виробництва. Такі програми дозволяють створювати моделі, які точно відображають параметри обробки тиском, де можна прослідити усі перетворення, що відбуваються при обтисненні металевих листів. Дослідження процесу холодного прокатування за допомогою інженерного програмного комплексу DEFORM 3D є актуальним, тому що воно дозволяє суттєво скоротити час на проведення

експериментів, прискорює процес визначення раціональних режимів обробки, які в подальшому забезпечать зменшення витрат зусиль та енергії, покращення якості виробів, збільшення продуктивності процесу та зменшення собівартості тонких листів.

Аналіз досліджень та публікацій. Сталеві тонкі листи широко використовують в машинобудуванні при виготовленні автомобілів, літаків, побутової техніки тощо. Тонколистову сталь виготовляють холодним прокатуванням на станах холодної обробки. Такі технології дозволяють отримати листи товщиною 0,15-1,8 мм і шириною 700-2300 мм, жерсть та стрічки при товщині 0,0015 мм. Вихідним матеріалом для холодного прокатування є гарячекатана сталь, що має товщину 1,6-6 мм [1]. Виробництво холоднокатаних листів, що отримують у цехах холодного прокатування, враховує велику кількість переділів і вимагає використання різноманітного, складного і вартісного устаткування [2]. До якості поверхні холоднокатаної листової сталі пред'являють високі вимоги з міцності, стійкості матеріалу, шорсткості поверхні.

Холодне прокатування істотно змінює властивості металів: при збільшенні величини обтиснення границя течії металу й опір пластичній деформації збільшуються, подовження смуги зменшується [3], що призводить до ускладнення процесу обробки тиском. Величина обтиснення при прокатуванні має суттєвий вплив на властивості матеріалу через те, що відбувається зміна розміру зерна внутрішньої будови та межі між ними у металевих виробах [4]. Величина обтиснення при прокатуванні визначає зміну витрат енергії, що в свою чергу впливає на вартість прокатного виробництва. Процеси холодного прокатування потребують подальшого вивчення, дослідження й удосконалення з метою покращення якості виробу, зменшення витрат енергії та собівартості виробництва. Об'ємні переміщення металу в осередку деформації при прокатуванні недоступні для прямого наочного вивчення, а експерименти не можуть врахувати одночасний вплив всіх технологічних чинників обтиснення, через що багато відомих на сьогодні результатів можуть бути використані лише для умов, в яких вони отримані [5]. Методи комп'ютерного моделювання відкривають широкі можливості при вирішенні завдань з обробки металів тиском [6].

У теорії прокатного виробництва велику популярність отримали методи кінцевих елементів, скінченних різниць і граничних елементів, метод кінцевих об'ємів [7]. Відомо [8], що при обтисненні смуги прокатними валками утворюється осередок деформації, на що витрачається велика кількість енергії та створюється складний напружено-деформований стан металу [9-11]. Моделювання з метою дослідження енергосилових параметрів дресирування листів було виконано у роботі [12]. Велика кількість досліджень з використанням методів кінцевих елементів [13, 14] присвячена проблемі течії металу під час деформації, але слід зазначити, що у цих роботах не досліджується процес холодного прокатування тонких листів.

У роботі [15] було використано інженерний програмний комплекс DEFORM 3D для дослідження процесів гарячого прокатування листів, де було ретельно вивчено характер формозміни металу, мікроструктуру виробів, енергетичні витрати на процес, але не досліджувалися особливості холодного прокатування тонких листів. Тому можна вважати, що в попередніх дослідженнях недостатньо приділено уваги вивченню впливу ступеня обтиснення на витрати енергії при моделюванні холодного прокатування тонких листів за допомогою програми DEFORM 3D.

Постановка задачі: дослідити процес холодного прокатування тонких листів за допомогою програми DEFORM 3D для визначення впливу величини обтиснення матеріалу на витрати енергії при обробці. Для вирішення цієї мети поставлені наступні задачі: створити модель холодного прокатування тонкого листа в програмному комплексі DEFORM 3D; визначити зусилля деформації та їх розподіл в осередку при холодній обробці.

Викладення матеріалу та результати. Для моделювання холодного прокатування було використано режим обробки, в якому задано вихідні параметри виробу: довжина смуги $l=1000$ мм, ширина $b=1000$ мм, висота $h=5$ мм. Діаметр прокатних валків 200 мм, довжина 1200 мм. Процес прокатування починався при температурі 20 °C. У процесі дослідження змінювався ступінь обтиснення матеріалу з метою визначення раціонального режиму обробки.

За допомогою комп'ютерної програми DEFORM 3D змодельовано вихідну заготовку, розташовано її у просторі, визначено параметри взаємодії інструменту і заготовки, умови тертя та характер теплообміну, виконано позиціонування прокатних валків відносно заготовки, як показано на рис. 1.

На схемі зображено процес захоплення металу прокатними валками, що відбувається на початковій стадії прокатування (першому кроці моделювання). Зі схеми видно, яким чином

відбувається взаємодія валків і оброблюваного матеріалу. Прокатні валки обтискують прокатний матеріал, обертаються, смуга рухається поступово назустріч обертанню валків.

На заготовці створено сітку кінцевих елементів, як показано на рис. 1 і 2. Кількість цих елементів дорівнює 2051.

Головним прийнято верхній валок, який обтискує метал за висотою. Виконано позиціонування інструменту відносно заготовки (рис. 2).

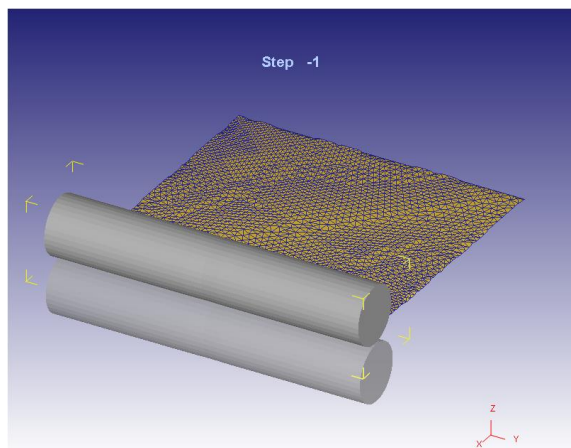


Рис. 1. Схема захоплення листа прокатними валками

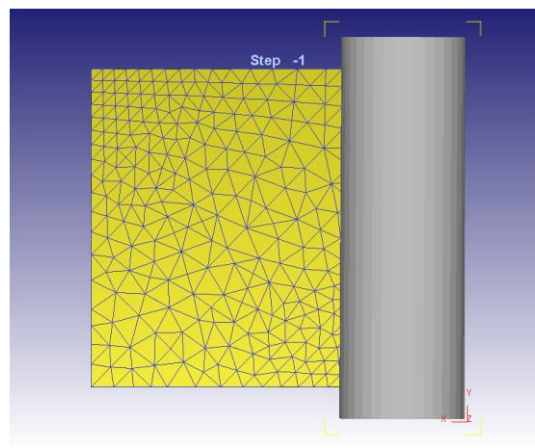


Рис. 2. Позиціонування інструменту відносно заготовки (вид зверху)

Матеріал оброблюваної заготовки обрано з бібліотеки комп'ютерної програми. У дослідженнях було використано холоднокатаний лист з вуглецевої сталі AISI-1015_(20-1200C). Визначено його властивості: напруження течії металу та зміна величини напруження в залежності від ступеня обтиснення.

Діаграму напруження-деформація представлено на рис. 3, з якої видно, що при ступені обтиснення, меншому відбувається пружна деформація металевих виробів.

Пластична деформація, при якій матеріал здатен змінювати свою форму та розміри, починається тоді, коли ступінь обтиснення перевищить 35 %.

Границю течії металу визначали за енергетичним законом [15]

$$\sigma = \varepsilon^n \cdot u^m + y, \quad (1)$$

де σ – ефективне напруження пластичної течії металу, ε – ступінь деформації, u – швидкість деформації; n – показник ступеня деформації, m – показник швидкості деформації, y – стала матеріалу.

Ступінь деформації ε визначався за формулою

$$\varepsilon = \Delta h / h_0, \quad (2)$$

де Δh – абсолютне обтиснення, що визначається за формулою

$$\Delta h = h_0 - h_1, \quad (3)$$

де h_0 , h_1 – відповідно початкова та кінцева товщина смуги.

Визначено пружні властивості матеріалу, які характеризуються модулем Юнга E та коефіцієнтом Пуассона μ . Ці коефіцієнти прийнято сталими величинами, які дорівнюють відповідно $E=0,3$ і $\mu=1,5 \cdot 10^5$.

Після позиціонування об'єктів у просторі при холодному прокатуванні задано точність позиціонування. Коефіцієнт прокатування прийнято для процесу холодної обробки рівним 0,1. Запропоновано умову, що фізична модель тертя при обробці тиском описується формулою Зибеля. Згенеровано контакт між заготовкою та верхнім і нижнім прокатними валками.

Визначено методи розрахунку та параметри моделювання. Встановлено систему одиниць SI. При моделюванні використовувався аналіз Лагранжа, було прийнято режим моделювання – деформація.

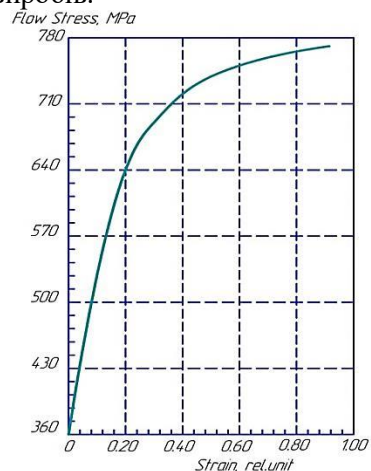


Рис. 3. Діаграма напруження-деформація

Задано типи об'єктів: оброблювану заготовку віднесено до пластичного типу, де аналіз виконується на підставі заданих значень границі течії металу; інструмент визнано жорстким, тобто недеформівним, матеріалом. Задано рух верхнього прокатного валку та його швидкість.

Таким чином, було сформовано базу даних для моделювання, що дозволило виконати дослідження процесу прокатування та визначити його основні характеристики, зміни напруження та деформації при холодній обробці, дослідити перетворення в осередку деформації, що утворюється при прокатуванні, зміни зусиль і моментів деформації.

Процес моделювання здійснювався в програмі DEFORM 3D; кількість кроків дорівнювала 100.

Теоретичні дослідження зусилля прокатування виконувалося за формулою [3]

$$P = \sigma_n b \sqrt{\Delta h R}, \quad (4)$$

де σ_n – коефіцієнт напруження [2], b – ширина листа.

Моделювання дозволило дослідити процес течії металу по викривленій координатній сітці. Було визначено векторне поле переміщення (рис. 4), з якого видно, що максимальне переміщення металу відбувається під дією верхнього прокатного валка, який і є головним деформувальним інструментом.

З рисунка 4 також видно, що векторне поле переміщення досягає максимальних значень на початку процесу прокатування, коли відбувається захоплення металу прокатними валками. Далі процес прокатування відбувається в сталому режимі, що супроводжується зменшенням інтенсивності векторного поля.

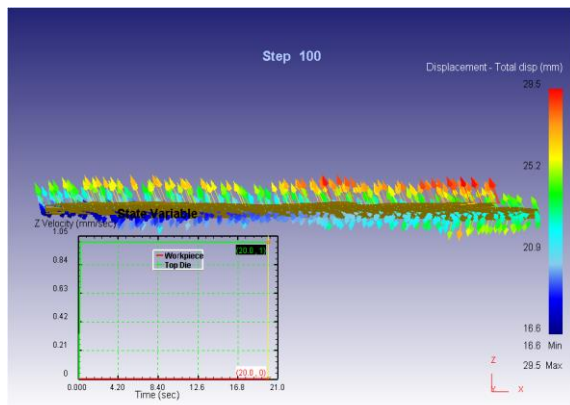


Рис. 4. Векторне поле переміщення металу при прокатуванні

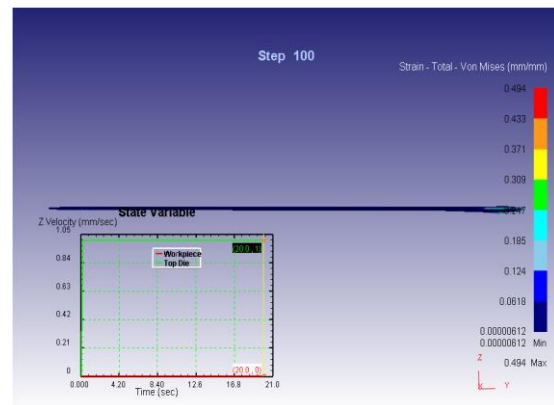


Рис. 5. Розподіл напруження при холодному прокатуванні

При моделюванні процесу виявлено напружено-деформований стан заготовки (рис. 5). Встановлено максимальні напруження, що знаходяться саме в осередку деформації та досягають 0,309 мм/мм.

Досліджено зміну сили прокатування (P) в часі при холодній обробці. На рис. 6 чітко просліджується збільшення зусиль прокатування в перші 9 секунд, які досягають максимальних значень на рівні 5,5 МН. При подальшому протіканні процесу спостерігається зменшення зусилля прокатування. Це пояснюється тим, що відбувся процес захоплення, і настав сталий рух прокатування, який характеризується відсутністю захоплювальних сил і зусиль обтиснення, а рух металу відбувається самочинно.

У виробничих умовах на цих режимах сила прокатування дорівнює 5,3 МН, що свідчить про високу точність моделювання в програмі DEFORM 3D.

Графік зміни крутного моменту (M), який створює верхній прокатний валок (рис 7), показав, що має місце зміна крутного моменту на початку процесу холодного прокатування з досягненням максимальних значень на 7 секунд від початку процесу. Далі процес прокатування переходить у сталий режим, який характеризується зменшенням крутного моменту. Параметри, що були отримані під час моделювання, використано в подальших теоретичних розрахунках.

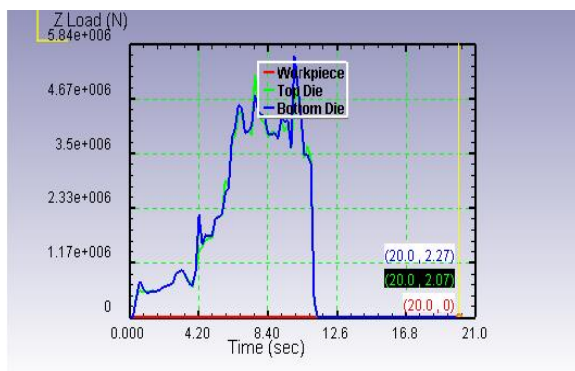


Рис. 6. Зміна сили прокатування в часі

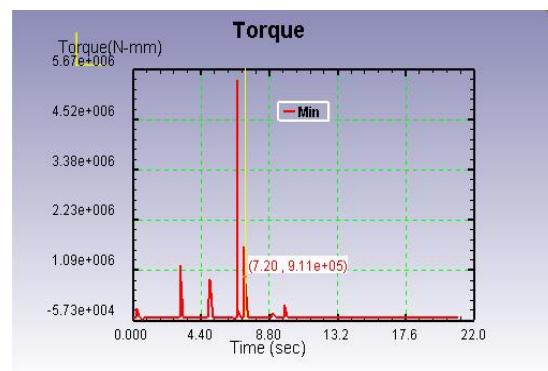


Рис.7. Зміна крутного моменту в часі

Дослідження дозволили визначити раціональні режими обтиснення в умовах холодного прокатування тонких листів. Встановлено, що ефективний ступінь деформації знаходиться на рівні 70 %. Така величина дозволяє отримати листи з максимальною твердістю, які здатні до пластичної деформації. Підвищення ступеня деформації призводить до негативних наслідків: потребує збільшення енергетичних витрат, зростання зусиль і моментів прокатування, збільшує напруження поверхневого шару металу, призводить до пружного зміщення валків, що погіршує якість отриманих листів, призводить до виникнення технологічних дефектів, таких як мікротріщини та мікроволоконна. Зменшення ступеня деформації призводить до зниження твердості та міцності матеріалу, що дає змогу листовому виробу деформуватися під дією навантаження під час експлуатації. Крім того, зменшення величини обтиснення є причиною зниження продуктивності процесу обробки. Результати дослідження наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати дослідження силових параметрів холодного прокатування тонких листів

σ , MPa	b , mm	h_0 , mm	h_1 , mm	ϵ , %	Δh	P , MN	M , MNm
740	1000	5	1,5	70	3,5	5,5	0,198
765	1000	7	1,5	78,6	5,5	6,9	0,248
735	1000	4	1,5	62,5	2,5	4,9	0,176

Висновок і подальший напрямок дослідження створено модель холодного прокатування тонкого листа в програмному комплексі DEFORM 3D і розроблено методику дослідження, що дозволило визначити зміни енергосилових параметрів процесів, які відбуваються в осередку деформації при обробці; визначено зусилля деформації та їх розподіл в осередку, встановлено витрати енергії та раціональні режими обтиснення в процесі холодного прокатування тонких листів, що забезпечує виготовлення якісних виробів.

Список літератури

1. Чубенко В.А., Хіноцька А.А. Технологія процесів прокатування: Навчальний посібник. – Кривий Ріг: Видавець ФОП Чернявський Д.О., 2017. – 170 с.
2. Бережний М.М., Чубенко В.А. Основи проектування технологічних ліній та комплексів металургійних цехів: Монографія. – Кривий Ріг: Видавничий дім, 2010. – 444 с.
3. Данченко В.М., Гринкеч В.О., Головка О.М. Терія процесів обробки металів тиском: Підручник. – Дніпропетровськ: Пороги, 2008. – 370 с.
4. Визначення впливу режиму обтиснення при прокатуванні на внутрішню будову металу / В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька // Качество минерального сырья. Кривой Рог, 2018 Т2 С. 151-159.
5. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров: Монография [Текст] / И.К. Огинский, В.Н. Данченко, А.А. Самсоненко, В.В. Бояркин. – Днепропетровськ: Пороги, 2011. – 355 с.
6. Компьютерное моделирование процесса обработки металлов давлением [Текст] / В.Н. Данченко, А.А. Миленин, В.И. Кузьменко, В.А. Гринкевич. – Днепропетровск. Системные технологии, 2005. – 448 с.
7. Компьютерное моделирование в инженерной проактике/ А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов [и др.]/ Санкт-Петербург: БХВ-Петербург, 2005. – 799 с.
8. Исследование очага деформации при продольном прокатывании с точки зрения реологической концепции [Текст] / Н.Н. Бережной, В.А. Чубенко, А.А. Хиноцкая, С.О. Мацишин // Восточно-Европейский журнал передовых технологий – том 1 № 7 (73) (2015), - с. 31-35 doi:10.15587/1729-4061.2015.38059.

9. **Kodjaspurov, G.E.** Effect of thermomechanical processing on structure and corrosion-mechanical properties of AISI 321 steel [Text] / G.E. Kodjaspurov, A.I. Rudkoy, V.V. Rybin // *Advanced Materials Research*. – 2010 – Vol. 89-91. – P. 769–772. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.89-91.769.
10. **Faraji, G.** Accumulative Torsion Back (ATB) Processing as a New Plastic Deformation Technique [Text] / G. Faraji, H. Jafarzadeh // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2012 – Vol. 27, Issue 5 – P. 507–511. doi: 10.1080/10426914.2011.593235
11. Вплив швидкості деформації на зміну напруження при поздовжньому прокатуванні [Текст] / **В.А. Чубенко, А.А. Хіноцька** // *Гірничий вісник*. – 2019, Випуск 105. – С. 42 – 46.
12. **Тимофеева М.А.** Исследование и моделирование энергосиловых параметров процесса дрессировки для совершенствования технологий и оборудования дрессировочных станков: Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук: спец. 05.02.13 «Машины, агрегаты процессы металлургического производства»/ М.А. Тимофеева. – Череповец, 2006. – 24 с.
13. **Huey-Lin Ho.** A study of improving warped characteristics during flange forging [Text] / Huey-Lin Ho, Su-Hai Hsiang, Chia-Ju Chang // *Journal of materials processing technology* 201. – 2008. – P. 14–18.
14. **Monaghan J.** An investigation of plane-strain lateral extrusion to form components having staggered branches [Text] / J. Monaghan // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1998. – 77. – P. 305–313.
15. Практическое руководство к программному комплексу DEFORM-3D: учебное пособие [Текст] / **В.С.Паршин, А.П. Карамышев, И.И. Некрасов** и др. – Екатеринбург: УрФУ, 2010. – 266 с.

УДК 669.162.26

К.О. ШМЕЛЬЦЕР, канд. техн. наук, доц., М.В. КОРМЕР, канд. хім. наук, доц.,
Д.О. КАССИМ, д-р техн. наук, проф., І.А. ЛЯХОВА, канд. техн. наук, доц.
Державний університет економіки і технологій

КЕРУВАННЯ ЯКІСТЮ КОКСУ ДЛЯ СТАБІЛІЗАЦІЇ ЙОГО МЕТАЛУРГІЙНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ

Мета. Підвищення показників якості коксу при обмеженні переведення доменного коксу у відсів (зниження втрат доменного коксу) за рахунок установки оптимального кута нахилу безперервно або періодично працюючого відкритого або закритого промислового циліндричного похилого барабана-стабілізатора, який забезпечує необхідне число обертів для механічної обробки коксу.

Методи дослідження. Механічна обробка коксу у барабані Мікум.

Наукова новизна. Запропоновано спосіб механічної обробки доменного коксу для поліпшення вихідних показників його якості M_{25} , M_{10} і класу >80 мм у промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі. Запропонований агрегат може замінити валковий грохот та використовуватися на коксових сортувальнях в доменному або коксовому цехах для підвищення холодних показників якості коксу для доменної плавки.

Практична значимість. Перевагою та відмінністю методу є те, що кут нахилу барабана-стабілізатора до горизонту і кількість його обертів вибирають з оптимального числа обертів випробувального барабана Мікум по динаміці поліпшення вихідних показників якості коксу за кожен 1-2 оберти барабана з урахуванням сум добуток показників якості на коефіцієнти впливу кожного показника і на величину питомої витрати коксу в доменній печі. Кількість обертів барабана-стабілізатора обмежують величиною втрат коксу для доменної плавки, не допускаючи збільшення класу <25 мм більше 3,0-3,5% від вихідної величини.

Результати. Використання процесу механічної обробки кусків коксу дозволяє не тільки стабілізувати властивості коксу, а й істотно поліпшити їх аж до отримання заданих, бажаних показників гранулометричного складу, міцності і стійкості до тертя. Вибір раціональних параметрів технології стабілізації показників якості коксу в промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі з урахуванням недопущення великих втрат доменного коксу дозволяє значно знизити собівартість чавуну в доменній плавці.

Ключові слова: технологічні властивості вугільної шихти, коксування, доменний кокс, гранулометричний склад, дробимість, стиранність, барабан-стабілізатор.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-42-47

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Металургійним підприємствам в умовах світової економічної кризи для того, щоб успішно конкурувати на ринку, необхідно знижувати собівартість продукції. Найчастіше цю задачу підприємства намагаються вирішити за рахунок зменшення витрат на виробництво, в деяких випадках навіть, якщо це шкодить технології. Але раціональним та перспективним є вдосконалення та впровадження нових технологічних процесів та устаткування, а також зниження витрат на паливно-енергетичні ресурси для виробництва

основних видів продукції. В доменній плавці до таких високоефективних технологій належить вдування пиловугільного палива (ПВП) у кількості до 250 кг/т чавуну та технологія використання кускового антрацити у кількості до 90 кг/т чавуну з коефіцієнтом заміни коксу кг/кг [1, 2]. При цьому необхідно підкреслити, що друга технологія забезпечує значний економічний ефект за рахунок зниження витрати коксу та собівартості чавуну при повній відсутності додаткових капіталовкладень, як цього потребує впровадження технології вдування ПВП. Зазначені технології потребують насамперед підвищення якості коксу. Але при відсутності можливості впровадження таких технологічних заходів як термічна сушка та виробництво формованого коксу зростає актуальність вдосконалення існуючих технологічних прийомів та устаткування.

Для вирішення задач керування якістю коксу необхідно здійснювати контроль якості вугільної сировини, товарного продукту та всіх технологічних стадій цього виробництва. К сучасним методам керування якістю коксу можна віднести наступні: контроль вологості та гранулометричного складу сировини; оптимізацію вугільних шихт з урахуванням хімічного складу мінеральної частини їх компонентів; контроль виходу коксу; регулювання режиму гасіння коксу; контроль готовності коксу за показником виходу летких речовин, значенням питомого опору та температурі; механічна обробка коксу з метою стабілізації та поліпшення його металургійних властивостей.

Аналіз досліджень і публікацій. В роботах [3-6] сформульовані основні вимоги до гранулометричного складу коксу, вивчено вплив сировинних та технологічних факторів на розподілення коксу за класами крупності. В процесі виробництва коксу шляхом шарового коксування утворюються куски різної крупності: від < 10 мм до > 150 мм. При цьому в залежності від спікливості вугільної шихти, швидкості коксування кількість кусків різної крупності може коливатися в досить широких межах, особливо кусків розміром > 80 мм (от 1 до 40 %).

Однією з основних вимог до якості коксу для великих доменних печей є висока рівномірність та однорідність його ситового складу. Чим однорідніше за крупністю кокс, тим більш рівномірно він згоряє у фурм, більш плавно опускається в окислювальну зону без підвисання та підстоїв. Висока однорідність коксу досягається звуженням меж його крупності. З урахуванням ситового складу агломерату та окатишів нижню межу крупності кусків коксу необхідно встановлювати на рівні 25-30 мм. Оскільки матеріали не заповнюють пустоти між кусками при співвідношенні до 2,0, верхня межа не повинна перевищувати 60 мм. Така однорідність ситового складу може бути забезпечена за рахунок його стабілізації шляхом механічної [7].

Високий вихід фракції коксу > 80 мм, як правило, потребує післяпичної обробки: дроблення всього рампового коксу при транспортуванні на тракті коксоподачі або виділення > 80 мм та його дроблення за допомогою зубчастих дробарок. Процес дроблення всього рампового коксу або виділення на валковому грохоті > 80 мм супроводжується втратами товарного коксу (КД крупністю > 25 мм або > 40 мм) через складність регулювання відстані між валками зубчастої дробарки.

Згідно з висновками роботи [8] механічна обробка може бути економічно обґрунтована у двох випадках: А) якщо економія при доменній плавці з використанням обробленого металургійного коксу (або окремих його класів крупності) внаслідок зменшення його питомої витрати на виплавку чавуну та приросту виробництва чавуну перевищує збитки, пов'язані з дробленням крупного коксу та утворенням додаткової кількості дрібних класів; Б) якщо кокс, отриманий з недефіцитного та більш дешевого вугілля, після механічної обробки якщо кокс, виявиться достатньо міцним та забезпечить техніко-економічні показники доменної плавки, які перекрыють можливі збитки при виробництві коксу.

В залежності від фізико-механічних характеристики коксу та його окремих фракцій іноді раціонально піддавати механічній обробці лише крупні, найменш міцні класи (> 80 мм або > 60 мм) з метою реалізації тріщин, збільшення міцності та зменшення утворення дрібняку.

При постійному технологічному режимі коксування факторами впливу на крупність коксу, його гранулометричний склад є зольність вугільної сировини, а також насипна густина, яка у свою чергу, залежить від вологості та ступеню подрібнення (вміст класу 0-3 мм) шихти [6,9]. Таким чином, на сучасному етапі основним напрямком поліпшення якості доменного коксу на коксохімічних підприємствах були та залишаються фактори, які обумовлені властивостями вугільної сировини та технологією коксового виробництва. Але цей процес дуже складно контролювати. Альтернативний варіант, який забезпечить керування властивостями коксу та досягнення необхідних показників його міцності та гранулометричного складу, це механічна обробка (стабілізація) коксу.

Теорія управління гранулометричним складом і міцністю коксу базується на математичному описі процесу його руйнування в залежності від величини і характеру механічного навантаження, а також початкових властивостей коксу і їх змін. Однак, оскільки руйнування відбувається в різних апаратах по-різному, названі константи залежать від типу в апараті. Зіставлення різних агрегатів, які можуть здійснити механічний вплив на кокс за умови зміни його інтенсивності, показало, що найбільш перспективним є барабан [10].

Відомий спосіб механічної обробки доменного коксу, що включає поліпшення вихідних показників його якості M_{25} (M_{40}), M_{10} і класу >80 мм в безперервно або періодично працюючому відкритому чи закритому промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі [10].

Недолік відомого способу механічної обробки доменного коксу в безперервно або періодично працюючому відкритому чи закритому промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі полягає в тому, що поліпшення вихідних холодних показників його якості, підвищення показників M_{25} (M_{40}) і зменшення показника M_{10} і вмісту класу >80 мм, не обмежують величиною втрат доменного коксу у відсів, що позначається на зменшенні (дефіциті) кількості коксу, який подається в доменний цех, та викликає перевитрату коксу в доменній плавці і підвищення питомих витрат на виробництво чавуну.

Постановка задачі. Актуальним є завдання підвищення показників якості коксу при обмеженні переведення доменного коксу у відсів (зниження втрат доменного коксу) за рахунок установки оптимального кута нахилу безперервно або періодично працюючого відкритого або закритого промислового циліндричного похилого барабана-стабілізатора, який забезпечує необхідне число обробляючих кокс обертів.

Викладення матеріалу та результати. Найбільш прийнятним для класифікації та управління якістю коксу є агрегат отримання заданих властивостей коксу – АОЗВК, який виконує функції стабілізації коксу, класифікації та поліпшення його якості за вибраним показником до необхідного рівню. Пропонується встановлення вказаного агрегату замість валкового грохоту. За конструкцією – це барабан, циліндрична поверхня якого виконана у вигляді профільних стрижнів з відстанню між ними, що залежить від крупності надрешітної частини коксу, яка задається у вигляді змінних карт з отворами заданого розміру і форми.

Матеріал, що знаходиться всередині обертового барабана, в залежності від частоти обертання може перебувати в каскадному або водоспадному, або центрифужному режимах. Центрифужний режим барабана діаметром D створюється при частоті обертання, яка дорівнює критичній. У цих умовах виникає відцентрова сила притискає матеріал до стінки барабана. Обертання матеріалу відбувається разом з барабаном без взаємного переміщення (рис. 1).

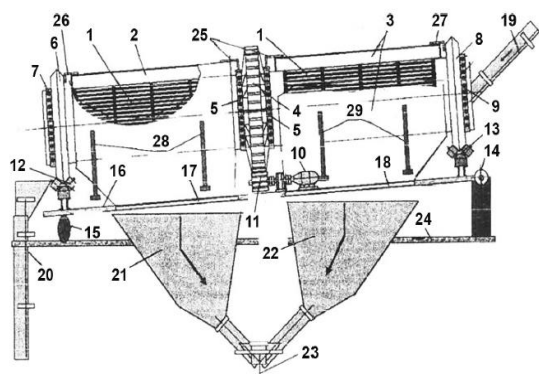
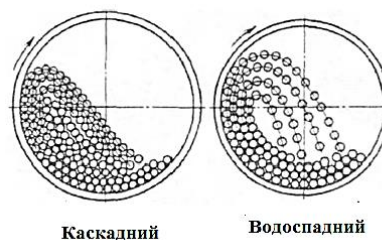


Рис.1. Агрегат отримання заданих властивостей коксу (АОЗВК): 1 – класифікаційний барабан; 2,3 – передній і задній кожух; 4, 5, 25 – відома основна шестерня приводу, її кріплення до барабана і фіксатор; 6, 8, 26, 27 – передній та задній опорний кільцевий обід барабану та їх кріплення; 7, 9 – кріплення опорних ободів к барабану; 10 – електропривод; 11 – відома шестерня приводу; 12, 13 – роликові опори; 14, 16 – система зміни кута нахилу; 15 – площадка розміщення барабану; 17, 18 – передній і задній пройоми для барабанного провалу; 19 – жолоб для коксу; 20 – розвантажувальний жолоб барабану; 21, 22, 23 – жолоби розвантаження підбарабанного провалу; 24 – будівельна площадка розміщення АОЗВК; 28, 29 – опора переднього і заднього кожуха

Схема руху матеріалу в обертовому барабані при каскадному і водоспадних режимах представлена на рис.2. При каскадному режимі (А), який реалізує при швидкості, що дорівнює 50-60 % критичної, матеріал, піднімаючись на невелику висоту, скочується вниз. При цьому відбувається стирання за рахунок взаємного тертя кусків матеріалу і деяке роздавлювання під впливом тиску верхніх шарів.

Рис.2. Схема руху продукту в барабані, який обертається

При водоспадному режимі, який здійснюється при швидкості обертання барабана 75-88 % від критичної, куски матеріалу переходять з кругової траєкторії на параболічну. Відбувається руйнування кусків за рахунок удару при падінні і частково стиранням. Змішаний режим здійснюється як падінням, так і перекочуванням кусків матеріалу, що спостерігається при частоті обертання барабанного млина 60-75 % від критичної [10, 11].



Управління АОЗВК, з метою поліпшення якості коксу як в плані стабілізації властивостей насипної густини, так і для досягнення одного з обраних показників заданої величини, здійснюють зміною кута нахилу агрегату.

Так, в разі необхідності поліпшення гранулометричного складу коксу, зокрема зменшення вмісту фракції >80 мм з 11 до 3 % знаходять кількість обертів випробувального барабану n_M , яке потребується для зміни кількості вказаної фракції. Для цього вирішуємо рівняння [11, 12] відносно n_M

$$C_n = C_0 e^{-m_1 n^{t_1}}.$$

Звідки, при $C_n = 3$, $n_M = 22,5$ обертів.

Обчислюємо

$$n = \frac{\sqrt{\pi^2 n_M^2 - L^2}}{\pi D} = \frac{\sqrt{3,14^2 \cdot 22,5^2 - 14^2}}{3,14 \cdot 2} = 11,0.$$

Знаходимо

$$\sin \alpha = \frac{L}{n \cdot \sqrt{\left(\frac{L}{n}\right)^2 + \pi^2 D^2}} = \frac{14}{11 \cdot \sqrt{\left(\frac{14}{11}\right)^2 + 9,86 \cdot 4}} = 0,202,$$

звідки $\alpha \approx 11,5$ градусів.

Встановлюючи барабан-стабілізатор під кутом 11,5 градусів, обробляючи кокс, поліпшуємо його якість за гранулометричним складом.

Недолік наведеного способу механічної обробки доменного коксу, що включає поліпшення вихідних показників його якості M_{25} (M_{40}), M_{10} і класу >80 мм в безперервно або періодично працюючому відкритому чи закритому промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі [11], полягає в тому, що поліпшення вихідних показників його якості, підвищення показників M_{25} (M_{40}) і зменшення показника M_{10} і вмісту класу >80 мм, не обмежують величиною втрат доменного коксу у відсів, що позначається на зменшенні (дефіциті) кількості коксу, який подається в доменний цех, та викликає перевитрату коксу в доменній плавці і підвищення питомих витрат на виробництво чавуну.

Для підвищення показників якості коксу при обмеженні переведення доменного коксу у відсів (зниження втрат доменного коксу) необхідно забезпечити вибір та установку оптимального кута нахилу безперервно або періодично працюючого відкритого або закритого промислового циліндричного похилого барабана-стабілізатора, який забезпечує необхідне число обробляючих кокс обертів.

У запропонованому способі [11, 12] механічної обробки доменного коксу для поліпшення вихідних показників його якості, наприклад, збільшення M_{25} до 88-90 % і зменшення M_{10} до 5-6 %, а класу >80 мм 3-4 % здійснюють в безперервно або періодично працюючому відкритому чи закритому промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі.

При цьому для забезпечення поліпшення цих показників якості коксу необхідно визначити і встановити барабан-стабілізатор на певний кут його нахилу до горизонту (α) і вибрати необхідну кількість його обертів (n), що з одного боку дозволить поліпшити показники, а з іншого – не допустити переведення кусків коксу у відсів, тобто досягти зменшення виходу класу <25 мм і підвищення кількості придатної фракції коксу 25-80 мм, яка завантажується в доменну піч. Для встановлення оптимальних α і n для обробки кусків коксу в стаціонарному барабані-стабілізаторі спочатку здійснюють випробування коксу, з визначенням змін від вихідних M_{25} , M_{10} і класу >80 мм, в барабані Мікум після 1-2 його обертів.

На підставі цих випробувань визначають оптимальне число обертів (n_M), для чого по динаміці поліпшення вихідних показників якості коксу за кожен 1-2 оберти барабана визначають суму добутків

показників якості коксу на коефіцієнти впливу кожного показника на зниження питомої витрати коксу ($M_{25} +1\% -0,6\%$; $M_{10} -1\% -2,8\%$ та $>80\text{ мм} -1\% -0,2\%$) і на величину питомої витрати коксу в доменній печі, на яку подають дану партію стабілізованого коксу. Отриману суму економії коксу в доменній плавці за рахунок його стабілізації порівнюють з величиною втрат доменного коксу, тобто постійно контролюють переведення кусків коксу в клас $<25\text{ мм}$.

У зв'язку з цим кількість обертів барабана-стабілізатора обмежують величиною втрат доменного коксу, не допускаючи збільшення класу $<25\text{ мм}$ більше $3,0-3,5\%$ від вихідної величини.

Вибравши оптимальну кількість обертів n_m визначають оптимальні α і n для барабана-стабілізатора за формулами

$$\alpha = \arcsin L / \pi n_m, \quad (1)$$

де α – кут нахилу барабана, град.; L – довжина барабана, м; n_m – оптимальна кількість обертів барабана Мікум,

$$i \quad n = n_m / D, \quad (2)$$

де D – діаметр барабана-стабілізатора.

Так, на доменній печі, наприклад, обсягом 5000 м^3 , яка виплавляє 9390 тонн чавуну на добу, при питомій витраті коксу – 450 кг/т здійснюють підвищення якості коксу шляхом його стабілізації в безперервно або періодично працюючому відкритому чи закритому промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі. Можливим варіантом використання є встановлення барабану стабілізатору замість валкового грохоту на коксорегульвальні в коксовому цеху.

Різниця (Δ) показників M_{25} , M_{10} і кількість в коксі фракції $>80\text{ мм}$, що утворилася в результаті механічної обробки, множилося на коефіцієнти впливу кожного показника і на величину питомої витрати коксу в доменній печі. Всі результати розрахунків наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Зміна показників властивостей коксу та зниження його питомої витрати в результаті механічної обробки

n_m	Зміна показників			Зниження питомої витрати коксу, кг/т				Відходи
	$\Delta (>80)$	ΔM_{25}	ΔM_{10}	$\Delta (>80) \cdot 0,2 \cdot 4,5$	$\Delta M_{25} \cdot 0,6 \cdot 4,5$	$\Delta M_{10} \cdot 2,8 \cdot 4,5$	Δ	
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	3,92	0,82	0,44	3,53	2,22	5,55	11,30	0,84
4	4,97	1,13	0,65	4,47	3,05	8,15	15,68	1,37
6	5,66	1,37	0,80	5,10	3,70	10,14	18,93	1,82
8	6,19	1,57	0,94	5,57	4,24	11,79	21,60	2,22
10	6,61	1,75	1,05	5,95	4,72	13,21	23,88	2,60
12	6,96	1,91	1,15	6,26	5,15	14,47	25,89	2,95
14	7,26	2,05	1,24	6,53	5,54	15,61	27,68	3,28
16	7,52	2,19	1,32	6,77	5,90	16,64	29,31	3,60
18	7,75	2,31	1,40	6,98	6,24	17,59	30,80	3,90
20	7,96	2,43	1,47	7,16	6,55	18,47	32,18	4,19
22	8,15	2,53	1,53	7,33	6,84	19,29	33,46	4,48
24	8,32	2,63	1,59	7,48	7,11	20,06	34,66	4,75
25	8,40	2,68	1,62	7,56	7,25	20,43	35,23	4,89

З табл. 1 видно, що сумарне зниження питомої витрати коксу спочатку змінюється за 2 оберти на $11,3\text{ кг/т}$ чавуну, а потім зменшується. Після 22 обертів ефект зменшився до $1,2\text{ кг}$ за 2 оберти. В сумі, якщо оцінити ефект зниження витрати коксу на тонну чавуну, що представляє собою пряме зниження собівартості чавуну, при обробці в 14 обертів і умовної вартості тони коксу $3600\text{ \$/т}$, зниження собівартості складе $3600 \cdot 0,02768 \approx 99,6\text{ \$/т}$. При цьому втрати доменного коксу складуть всього $3,28\%$ [11, 12].

Барабан-стабілізатор для механічної обробки коксу може бути довжиною $5-8\text{ м}$ і діаметром від $1,75$ до $2,5\text{ м}$ залежно від продуктивності барабана і меж регульованої частоти його обертання. На доменній печі об'ємом 5000 м^3 з урахуванням її продуктивності можна використовувати барабан-стабілізатор довжиною $8,5\text{ м}$ і діаметром 2 м , тоді кут його нахилу до горизонту встановлюють рівним

$$\alpha = \arcsin L / \pi n_m = \arcsin 8,5 / 3,14 \cdot 14 = 11\text{ градусів},$$

а кількість його обертів буде дорівнювати

$$n = n_m / D = 14 / 2 = 7.$$

Висновки та напрямки подальших досліджень. Таким чином, вибір раціональних параметрів технології стабілізації показників якості коксу в промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі з урахуванням недопущення великих втрат доменного коксу дозволяє значно знизити собівартість чавуну в доменній плавці. При річному виробництві чавуну на печі об'ємом 5000 м³ рівному 3,5 млн тонн отриманий прибуток складе 34,86 млн \$.

Отже, використання та вдосконалення процесу механічної обробки кусків коксу є актуальним напрямком досліджень та дозволить не тільки стабілізувати властивості коксу, а й істотно поліпшити їх аж до отримання заданих, бажаних показників гранулометричного складу, міцності і стійкості до тертя.

Список літератури

1. **Лялюк В.П.** Проблемы реализации вдувания пылеугольного топлива и альтернативных технологий доменной плавки / В.П. Лялюк, И.Г. Товаровский, А.К. Тараканов // Черная металлургия: Бюллетень института "Черметинформация". – 2011. – №11. – С. 20-26.
2. **Товаровский И.Г.** Альтернативные коксоберегающие технологии – перспектива развития доменного производства / И.Г. Товаровский, В.И. Большаков, В.П. Лялюк // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2011. – №2. – С. 10-13.
3. **Lyalyuk, V.P.** Influence of the properties raw coal materials and coking technology on the granulometric composition of coke. Message 1. Analysis of changes in particle size distribution of coke on the example of the coke plant in Krivyi Rig / V.P. Lyalyuk, K.O. Shmeltser, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova // Petroleum and coal. – 2019. – Vol. 62(1). – pp. 173-177.
4. **Lyalyuk V.P.** Influence of the properties raw coal materials and coking technology on the granulometric composition of coke. Message 2. Granulometric composition of the coke as a function of the coal batch properties / V.P. Lyalyuk, K.O. Shmeltser, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova // Petroleum and coal. – 2019. – Vol. 62(2). – pp. P. 309-315.
5. **Lyalyuk V.P.** Changes in granulometric composition of blastfurnace coke / V.P. Lyalyuk, K.O. Shmeltser, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova // Coke and Chemistry. – 2013. – vol. 56. – pp. 456–460.
6. **Лялюк В.П.** О гранулометрическом составе кокса для доменной плавки / В.П. Лялюк, Е.О. Шмельцер, Ляхова И.А., Д.А. Кассим // Вісник Криворізького національного університету. Серія: Технічні науки. – Кривий Ріг: Криворізький національний університет – 2014. – вип.36. – С. 141–146.
7. Требования к качеству кокса для мощных доменных печей. Кокс и химия. – 1976. – №2. – С.8-10.
8. **Лазовский И.М.** Эффективность механической обработки кокса восточных коксохимических предприятий / И.М. Лазовский, Е.В. Беляев, Т.П. Варшавский, А.П. Фомин, П.В. Акулов, В.П. Холопцев // Кокс и химия. – 1970. – №11. – С.20-24.
9. **Лялюк В.П.** О рациональной степени дробления угольных шихт для коксования с высоким содержанием жирных углей / Лялюк В.П., Соколова В.П., Шмельцер Е.О., Кассим Д.А., Ляхова И.А. // Гірничий вісник. Науково-технічний збірник. – Кривий Ріг: Криворізький національний університет. – 2013. – вип.97. – С. 170–173.
10. **Мучник Д.А., Лялюк В.П.** Высокоэффективная внекамерная технология повышения качества кокса для доменной плавки. ФЛ-П Чернявский Д.А., Кривой Рог: 2019. – 184 с.
11. **Lyalyuk, V.P., Shmeltser, E.O., Kassim, D.A.** Improving the technology production of coke for blast furnace smelting. Octan Print, Praga: 2022. – 197 p.
12. Патент України, 2018, № 127112. Спосіб механічної обробки доменного коксу / **Мучник Д.А., Товаровський Й.Г., Лялюк В.П., Шмельцер К.О.** Опубл. бюл. № 13.

УДК 622.752:544.722.23

Т.А. ОЛІЙНИК, д-р техн. наук, проф., Д.О. РУМНИЦЬКИЙ, аспірант,
Л.В.СКЛЯР, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

СЕГРЕГАЦІЯ ЧАСТИНОК ПРИ ГРАВІТАЦІЙНІЙ СЕПАРАЦІЇ МІНЕРАЛЬНИХ АГРЕГАТИВ У ВОДНОМУ СЕРЕДОВИЩІ

Метою даної роботи є аналіз механізмів сегрегації у процесі гравітаційної сепарації руди для розробки методики проведення досліджень із встановлення закономірностей процесу розділення частинок на похилій поверхні гвинтових сепараторів, які засновані на особливостях розширювання зернистого матеріалу в залежності від крупності та щільності частинок.

Методи дослідження. Узагальнення, аналіз науково-технічної інформації стосовно сегрегації частинок у гравітаційних сепараторах різного типу для дослідження процесу розшарування та концентрації частинок у потоці пульпи, що дозволить створити оптимальні умови розділення мінеральних зерен за крупністю та щільністю на похилій поверхні гвинтового сепаратору.

Наукова новизна. Запропоновано механізм розділення частинок на похилій поверхні гвинтових сепараторів, який на відміну від існуючих, враховує гідродинамічні та відцентровані сили, співвідношення яких міняється в залежності від зміння швидкості течії пульпи та перерозподілу концентрації мінеральних зерен різної крупності.

Практична значимість. Розроблено методику проведення досліджень гравітаційного збагачення магнетитових кварцитів в умовах АТ «ПВДГЗК» з урахуванням особливостей сегрегації мінеральних частинок, їх агрегатів на похилій поверхні гвинтового сепаратору.

Результати. В умовах АТ «Південний ГЗК» на секції №5 РЗФ-1 на однозахідному гвинтовому сепараторі проведено попереднє тестування проміжних продуктів з визначенням їх гранулометричного складу, щільності пульпи, масової частки заліза у продуктах розділення. Досліджено режим розділення за щільністю живлення (1150-1350 г/л). В результаті проведених досліджень отримано промпродукти магнітної сепарації першої стадії, в яких підвищено масову частку заліза загального на 3,6-9,8 % – з 47,7-48,7% до 51,3-58,5%. З пісків II стадії класифікації, з масовою часткою заліза загального 49,8-53,2 % за рахунок застосування гвинтової сепарації отримано товарні продукти з масовою часткою заліза загального 65,5-68,4 %.

Ключові слова. сегрегація, розшарування, сепарація гравітаційна, розділення, крупність, щільність, потік, сепаратор гвинтовий.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-47-54

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними завданнями. Гравітаційні процеси мають значне поширення в практиці збагачення руд чорних, кольорових і рідкісних металів, вугілля, розсипів та неметалевих корисних копалин. Серед усього різноманіття гравітаційних апаратів заслуговує на окрему увагу гвинтова сепарація [1]. При гвинтовій сепарації розподіл руди здійснюється за щільністю зерен, завдяки впливу на частинки відцентрової сили та сили тяжіння в умовах руху потоку пульпи по похилій гладкій або рифленій площині [1,2].

Важливими етапами процесу концентрації у гвинтових апаратах є розшарування та сепарація мінеральних зерен. При цьому, розшарування – це розподіл за крупністю мінеральних зерен (за глибиною жолоба); а сепарація – розсігнування вже розподілених частинок [1]. У процесі розшарування мінеральних зерен у потоці по похилій площині жолоба механізм руху частинок і їх концентрації вивчено не досконало. Для оцінки цього явища створено багато моделей, але жодна з них не надала повного уявлення про процес розшарування та концентрації різних за крупністю частинок потоку пульпи у жолобі гвинтового сепаратору.

Отже, одним з найважливіших науково-технологічних завдань при розробці технологій гравітаційного збагачення мінеральної сировини із застосуванням гвинтової сепарації є дослідження процесу розшарування та концентрації частинок у потоці пульпи (сегрегації), що дозволить створити оптимальні умови розділення мінеральних зерен за густиною та крупністю. Актуальними є дослідження, які мають на меті виявлення механізмів і кінетичних закономірностей сегрегації частинок для найбільш загальних і практично значущих випадків течії зернистих середовищ.

Аналіз досліджень. У всіх гравітаційних апаратах розподілення часток здійснюється у зважених розпушених шарах, тобто в шарах, в яких тверді частинки знаходяться у зваженому стані, що обумовлюється впливом на них рідини, газу або вібруючих твердих стін.

Розділення частинок при гравітаційних процесах можна класифікувати на два основних його види: сегрегаційні (частки стикаються один з одним та розподіляються за крупністю) та гідравлічні (частки розділені прошарком води). До процесів, наслідком протікання яких є ті або інші ефекти сегрегації, віднесені:

- просіювання і проникнення, що є процесом проникнення дрібних частинок у зазори між великими частинками, коли останні або рухаються щодо один одного (просіювання), або перебувають у нерухомому стані (проникнення);

- течія дисперсних середовищ з різним вмістом глинистих компонентів;

- процеси спливання або занурення, обумовлені різною плавучістю частинок, внаслідок їх відмінності за щільністю та формі;

- виштовхування як процес, що протікає внаслідок різноманітних ефектів розклинюючого впливу частинок друг на друга;

- взаємодія частинок та їх агрегатів, що визначає різну динаміку поведінки частинок, що відрізняються за розміром, формою, щільністю, пружністю і т.д. (перекочування, відскок, захоплення тощо);

- вимивання частинок поперечними та зустрічними потоками міжчасткового середовища;

- «захоплення» одних частинок іншими, обумовлене різною геометрією частинок та динамічними факторами взаємодії;

- стирання частинок з наступним відділенням тонких та дисперсних частинок;

розділення, яке обумовлено псевдозрідженням окремих компонентів зернистого середовища, що мають низьку швидкість псевдозрідження, що супроводжується зміною вектору швидкості різних частинок за модулем або напрямом;

розділення частинок у шарі сипучого матеріалу;

поперечне циклічне розширювання неоднорідних частинок у безперервному спіральному обертovому потоці зернистого матеріалу;

розширювання неоднорідних частинок у вібраційному шарі.

Процес сегрегації зернистого матеріалу при механічному впливі найбільш досконало вивчено при грохоченні корисних копалин.

При моделюванні процесу сегрегації сипучих матеріалів автори [3]. виділяють чотирнадцять видів характеристик властивостей дисперсних матеріалів, які можуть впливати на сегрегацію. При цьому, кожна з властивостей окремо визначає поведінку відповідних частинок у тому чи іншому фізичному полі. В умовах певного поля домінуючий вплив на сегрегацію може надавати різницю в тій або іншій властивості частинок дисперсного середовища. При оцінці характеру впливу властивостей частинок на сегрегацію необхідно взяти до уваги, що сегрегація є результатом взаємодії неоднорідних частинок під впливом фізичного поля або комбінації різних полів. Тому властивості можна умовно поділити на дві категорії:

властивості, що визначають сили, що діють на окремі частинки з боку поля, і тим самим впливають на динаміку їх переміщень у просторі впливу полів;

властивості, що впливають на ефект взаємодії неоднорідних частинок, тобто. на напрямок та інтенсивність відносного переміщення частинок.

Звідси випливає, що схильність суміші частинок до сегрегації визначається не тільки сукупністю їх властивостей за зазначеними категоріями, а й сукупністю та інтенсивністю фізичних полів та додаткових факторів, що сприяють і перешкоджають сегрегації.

Комплекс таких властивостей для зернистих матеріалів включає в першу чергу розмір, щільність, шорсткість, пружність, форму частинок та адгезійні властивості їх поверхні.

Першорядне значення для сегрегації має розмір і співвідношення розмірів частинок [4], Цей висновок дійсний, наприклад, для багатьох випадків сегрегації та зсувних потоках зернистих матеріалів. Однак, беручи до уваги різноманітність можливих механізмів сегрегації та умов взаємодії неоднорідних частинок, обумовлених сукупністю фізичних полів та граничних умов, слід визнати певну умовність такого висновку. Це тим більше справедливо, якщо врахувати, що взаємодія частинок у дисперсному середовищі, у переважній більшості випадків протікає у присутності дисперсійної (міжчасткового) середовища, яке в певних умовах також може істотно впливати на ефект взаємодії неоднорідних частинок.

У роботі [3] здійснено спробу систематизації механізмів сегрегації. Для підвищення стрункості системи автор пропонує розділити всі фактори, що сприяють сегрегації, на дві категорії:

1) сили, що ініціюють прояви ефектів сегрегації;

2) процеси, що призводять до сегрегації частинок.

При цьому до сил, які ініціюють прояв тих чи інших механізмів сегрегації, віднесені: гравітаційний вплив;

сили, що виникають при міжчастковому контакті;

тертя частинок при їх контакті з поверхнями, що обмежують;

ударні сили, що виникають під час взаємодії частинок;

розклинюючі сили, що виникають в агрегатах, які складаються з неоднорідних частинок;

сили пружності, які виникають при контакті частинок з поверхнями, що їх обмежують;

моменти кочення, при взаємодії частинок один з одним або з обмежувачами поверхнями;

сили опору, що виникають під час переміщення частинок щодо міжчасткового середовища;

сили поверхневого зчеплення частинок, спричиненого адгезією, електростатичними ефектами та іншими.

У зв'язку з викладеними загальними уявленнями про природу сегрегації стає зрозумілим, що математичний опис кінетичних закономірностей процесу повинно відображати залежність швидкості розподілу неоднорідних частинок від комплексу їх фізико-механічних властивостей, властивостей міжчасткового середовища та комплексу факторів фізичних полів, що ініціюють та гальмують сегрегацію. Різноманітність властивостей частинок та умов їх взаємодії є причиною безлічі різних механізмів розділення частинок, які можуть виявлятися або окремо, або у деяких

їх поєднаннях. Зауважимо, що кінетичні характеристики сегрегації мають визначатися з урахуванням діючих механізмів розділення частинок.

У роботах [5,6] авторами проаналізовано явище сегрегації зернистого матеріалу на основі існування «дисперсійного тиску», при якому крупні частинки переміщуються в шар потоку з меншою швидкістю зсуву, а дрібні – в шар, із найбільшою швидкістю зсуву.

Однак, ця аналогія з «ефектом парціальних тисків» є недостатньо коректною, оскільки явище сегрегації має місце і в однорідному швидкості зсуву потоці. Крім того, як показує досвід [6], переміщення великих частинок може відбуватися і в протилежному напрямку, наприклад, до відкритої поверхні гравітаційного потоку, у бік якої швидкість зсуву збільшується.

Існує також інтерпретація механізму руху частинок, як механізм проникнення, який полягає у проникненні дрібних частинок під дією сили тяжіння в міжчастковий простір, що утворюється між більшими частинками в рухомому шарі суміші частинок [7, 8]. Внаслідок цього механізму крупні частки видавлюватимуться дрібними у зворотному напрямку. Наприклад, рух частинок до відкритої поверхні рушійного або вібруючого шару.

Інший механізм названо механізмом різних траєкторій, який зумовлений різницею в траєкторіях руху неоднорідних частинок при взаємодії їх з міжчастковим середовищем та має місце, в першу чергу, під час руху частинок у відкритих поверхнях зсувних потоків. Відмінність траєкторій для неоднорідних частинок є наслідком різного співвідношення сил опору та інерційних сил для частинок, що відрізняються один від одного від друга за розміром та щільністю [7-11].

При русі частинок має місце також механізм розшаровування, при якому сегрегація відбувається у розріджених зернистих середовищах, які аналогічні псевдозрідженим системам. Кінетика цього механізму сегрегації залежить від комплексу фізико - механічних характеристик самих частинок, а не визначається лише їх розміром або щільністю як у рідких середовищах.

При гідравлічному розділенні діють сили тяжіння, гідродинамічні сили та сили зіткнення частинок, а при сегрегаційному – основними є взаємодія частинок при їх зіткнення та розподіленням за крупністю [12].

У роботі [13] вивчено декілька способів розшарування, у тому числі змивну дію потоку води, що тече по похилій площині. Виявлено, що у процесі розшарування мінеральних зерен велике значення має розклинювальна дія зерен, які лежать вище. Крім того, експериментально встановлено збільшення швидкості розшарування при сегрегації зі збільшенням крупності та різниці в щільностях частинок, що розділяються, підвищенням інтенсивності вібрацій та зменшенням товщини шару. Дані дослідження мають загальний характер так як вони показували явище розшарування і розкривали лише деякі закономірності.

У теорії гравітаційної сепарації руд розшарування частинок, які рухаються по похилій поверхні, розглядається з урахуванням на них турбулентних вихорів, взаємного впливу на частинки, обумовленого градієнтом швидкості за глибиною [1]. Частка, що знаходиться в деякому шарі, отримує удари від частинок, розташованих вище; виникає їх обертання та має ефект Магнуса. Вважається, що підйомна сила від впливу частинок між собою є основною з причин розпушування, а отже, і розшарування частинок. Концентрація за висотою для дрібних частинок змінюється менш різко, ніж для крупних, а найбільш дрібні частинки за глибиною потоку похилої поверхні розподілені практично рівномірно.

У роботі [13], показано що при зважуванні в зернистих сумішах при накладанні кругових горизонтальних коливань виявляються в'язкісні властивості. При цьому крупні частинки серед дрібних частинок поведуться як у псевдорідині. Частинки меншої щільності, ніж середовище, спливають, а частинки більшої густини тонуть.

У роботі [14] наведено результати дослідження формування концентрату в відцентровому полі. Згідно аналізу цих результатів доведено, що сегрегація важких частинок за щільністю та крупністю відбувається за меншою кількістю води, сегрегація за масою – за більшою кількістю води. Автори визначили, що в основі відцентрового збагачення лежить інтенсифікація процесів взаємодії твердих частинок один з одним у згуртованому та розпушеному стані, а збільшення різниці між гідравлічною крупністю частинок різної питомої ваги у відцентровому полі має другорядну роль.

Слід зазначити, що деякі з нововиявлених механізмів є результатом акцентування уваги на окремих елементарних актах складні механізми. Наприклад, у роботах [7, 8] автори зазначають, що механізм сегрегації «розшаруванням» цілком асимілює в собі сегрегацію виштовхуванням і

переміщенням частинок і є по відношенню до них найбільш загальним механізмом. Певною мірою сказане відноситься і до механізму, зумовленого різною схильністю частинок до кочення, оскільки названий механізм може бути представлений як один із елементарних актів складнішої взаємодії.

При цьому важливо відзначити, що за визначенням [7, 8] «розшаровування» є наслідком відмінності частинок не тільки за розміром та щільністю, але і залежить від комплексу фізико-механічних властивостей. Такий підхід є, зрозуміло, найадекватнішим наближенням до реального процесу і дозволяє врахувати різну плинність, тобто. відмінність у кутах природного укусу окремих фракцій дисперсного середовища.

Разом з тим, тут слід зазначити, що в залежності від умов взаємодії неоднорідних частинок може домінувати те чи інше їхня відмінна властивість, а, відповідно, той чи інший елементарний акт у їхній комплексній взаємодії може стати визначальним. Ці обставини забезпечують формальні умови для розгляду таких елементарних актів як окремих механізмів сегрегації. Водночас це не заважає враховувати такого роду механізми у складі механізмів вищого порядку.

Аналіз механізмів сегрегації свідчить не лише про їх надзвичайну різноманітність, але й про відсутність досить строгої класифікації, складеної з урахуванням принципово розмежованих класифікаційних ознак. Навіть при допущенні структурної однорідності зсувного гравітаційного потоку математичний опис динаміки сегрегації викликає серйозні труднощі у зв'язку з відсутністю єдиного судження щодо фізичного механізму процесу.

Наслідком використання різних механізмів при описі сегрегації у гравітаційних потоках частинок є те, що частинки різняться, наприклад, в одному випадку за густиною [15], а в іншому – за розміром [16]. Для опису динаміки сегрегації частинок різної густини в роботі [15] використаний механізм плавучості, а в роботі [16] сегрегація частинок за розміром описана з урахуванням неоднорідного розподілу тиску між частинками дрібною та крупною фракцій. При цьому важливо зазначити, що у обох випадках опис динаміки сегрегації не враховує залежність швидкості процесу від швидкості зсуву, ні концентрації твердої фази. Це тим більше важливо, якщо врахувати, що швидкість зсуву і концентрація твердої фази істотно впливають на швидкість сегрегації, а значення названих параметрів в обсязі гравітаційного зсувного потоку, загалом випадку, змінюються в широкому діапазоні.

З метою врахування впливу швидкості зсуву на процес розділення неоднорідних частинок у роботі [17] проведено дослідження динаміки сегрегації частинок, що відрізняються за розміром і щільністю, у швидких зсувних потоках зернистих матеріалів. Динаміку сегрегації проаналізовано на базі різних висловлених її механізмів для частинок, що відрізняються за розміром [16] та щільністю [15]. Моделювання сегрегації за щільністю проведено з використанням механізму плавучості [15], формально аналогічного для спливання тіл, занурених у рідину. Кінетика сегрегації частинок за розміром змодельована на базі механізму розділення частинок під дією градієнта літостатичного тиску, що є наслідком гравітації [16]. Відповідно до цього механізму напруги, що генеруються гравітацією в зсувному потоці, деяким чином розподілені між частинками, що розрізняються за розміром, пропорційно деякому індивідуальному коефіцієнту парціального тиску. При цьому, у загальному випадку, значення цих коефіцієнтів не збігаються із відносною концентрацією частинок відповідного розміру. Передбачається [18], що частинки, для яких частка парціальних напруг перевершує їх локальну відносну концентрацію в суміші, переміщуються в область потоку з більш низьким літостатичним тиском. Навпаки, частинки, внаслідок розміру яких припадає на них частка парціальних напруг менше їх локальної відносної об'ємної концентрації в суміші, переміщуються в область потоку з вищим літостатичним тиском. У всіх названих роботах ефект перемішування частинок змодельований з використанням квазидифузійної моделі.

За відсутності теоретичної бази для прогнозування залежності кінетичних характеристик сегрегації та перемішування від кінематичних та структурних параметрів потоку в роботах [14 – 16] коефіцієнти сегрегації частинок за розміром, щільністю та коефіцієнт квазидифузійного перемішування апроксимувалися константами, які визначалися в процесі математичного моделювання. Проте, результати досліджень, виконаних у низці наступних робіт, наприклад [19 – 21], свідчать про суттєву залежність від перерахованих коефіцієнтів від швидкості зсуву, яка, в загальному випадку, в обсязі потоку має високу неоднорідність. У цих роботах показано, що встановлення залежності коефіцієнтів сегрегації та квазидифузії від швидкості зсуву дозволяє покращити відповідність між експериментальними та розрахунковими результатами.

Проте, до сьогодні не втрачає актуальності завдання визначення залежностей коефіцієнтів сегрегації та дифузії від параметрів зсувного потоку [16]. Більше того, як вірно зазначено в роботі [16], при всій гнучкості розроблених математичних моделей сегрегації [19 – 21], що лежать в їх основі модельні уявлення не дозволяють врахувати ефекти розділення частинок внаслідок неоднорідності швидкості зсуву та безпосередньо пов'язаної з нею температури зернистого середовища у зсувному потоці матеріалу. Про необхідність встановлення ефектів розділення, викликаних просторовою неоднорідністю параметрів зсувного потоку зернистого середовища, свідчать результати досліджень, виконаних у роботах [16, 22-26].

У роботах [16, 26] величина потоку розділення частинок, що різняться за розміром, визначена як величина, пропорційна градієнту кінетичної складової напружки. При цьому в локальних напружках, що генеруються у зсувному потоці зернистого середовища, виділяються компоненти кінетичних та контактних напружень.

Кінетична складова напружки при зрушенні розглядається як наслідок перенесення імпульсів при флуктуації частинок. Передбачається, що розділення неоднорідних частинок відбувається внаслідок різного розподілу контактних та кінетичних напружок по компонентах зернистого середовища, що розрізняються за розміром частинок.

Постановка задачі. Явище сегрегації в даний час описано лише якісно. Відсутні розрахунки швидкості сегрегації, вплив основних факторів на процес розшарування та концентрації частинок у течії пульпи в жолобі гвинтового сепаратора. Тому метою роботи є аналіз механізмів сегрегації у процесі гравітаційної сепарації руди для розробки методики проведення досліджень із встановлення закономірностей процесу розділення частинок на похилій поверхні гвинтових сепараторів, які засновані на особливостях розшаровування зернистого матеріалу в залежності від крупності та щільності частинок.

Викладення матеріалу та результати. Аналіз вище викладеного матеріалу дозволив розробити методику проведення експериментів зі збагачення продуктів різної крупності та щільності на гвинтових сепараторах в умовах Південного гірничо – збагачувального комбінату на секції №5 РЗФ-1. Метою виробничих досліджень було встановлення можливості отримання концентрату марки КЗВ з масовою часткою $Fe_{\text{заг}}$ на рівні 68,0+%. Згідно методики визначались такі показники: гранулометричний склад та щільність пульпи, масова частка заліза у продуктах розділення, продуктивність гвинтового сепаратора для визначення механізму сегрегації.

Для досліджень цих факторів використовували апарат, який являє собою однозахідний гвинт сепаратора типу СВШ-2-1000, що працює в замкнутому циклі з зумпфом-змішувачем обладнаним відцентровим насосом модифікації ІГР для забору живлення і подачі через трубу нагнітання, оснащену пристроєм, що розмагнічує, для руйнування флокул.

Дослідження проводились з таких проміжних продуктів: розвантаження першої стадії мокрої магнітної сепарації секції №5 РОФ-1; піски II стадії класифікації секції №5 РЗФ-1; концентрат $Fe = 66,0\%$; концентрат $Fe = 68,5\%$.

У результаті аналізу гранулометричного складу продуктів подрібнення та магнітного збагачення встановлено, що у магнітному продукті першої стадії сепарації найбільш багатого за залізом є фракція - 0,04+0 мм, вихід якої складає 39,59 - 40,3 %. Масова частка заліза загального у ній на рівні 65,1 – 66,2 %. У пісках II стадії класифікації, на відміну від магнітного продукту, найбільш багатими фракціями за залізом є класи крупності -0,056+0,04 мм та -0,04+0 мм, вихід яких відповідно складає 23,7-25,97 % та 16,04-16,5 % відповідно. Масова частка заліза загального у цих класах складає 66,6-67,1% та 66-66,2 % відповідно. За мінералогічним аналізом у цих фракціях концентруються мономінеральні частинки магнетиту та кварцу. Кількість зростків у цих фракціях незначна. У матеріалі з крупністю частинок більше 0,05 мм кварц утворює зростки з магнетитом, рідше із силікатами, карбонатами. Вміст мономінеральних частинок незначний. У більш крупнозернистому матеріалі магнетит представлений включеннями частково кварцового, іноді магнетит-кварцового складу.

У процесі проведення тестування та підбору режиму за щільністю живлення в діапазоні 1150-1350 г/л, а також положення шибера (концентрат/промпродукт) гвинтового сепаратора в межах від 9,5 см до 19 см від внутрішнього борту жолоба, отримано «важка» фракція – концентрат та промпродукт.

При розділенні промпродуктів магнітної сепарації першої стадії, в концентраті гвинтового сепаратора підвищено масову частку заліза загального на 3,6-9,8 % – з 47,7-48,7% до 51,3-58,5%.

З пісків II стадії класифікації, з масовою часткою заліза загального 49,8-57,9 % за рахунок застосування гвинтової сепарації отримано товарні продукти з масовою часткою заліза загального 65,5-68,4 % за виходом від операції 41,2 – 5,0 %.

Для покращення технологічних показників розділення мінеральних частинок у гвинтових сепараторах необхідно вивчити механізм розшарування та особливості сегрегації у течії пульпи в його жолобі на похилій поверхні.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Встановлено, що існує багато механізмів опису сегрегації матеріалу при гравітаційній сепарації мінеральних агрегатів у повітряному та водному середовищах. Але збільшення кількості механізмів від однієї класифікації до іншої не призводить до розширення знань про сегрегацію, але, більше того, ускладнює вивчення названого явища.

Подальші дослідження направлені на визначення механізму переміщення зерен всередині шару при розшаруванні, з подальшим формуванням залежності між цим механізмом і закономірностями різновидів розшарування та врахуванням властивостей частинок, які зумовлюють розташування зерен при сегрегації на гвинтовому сепараторі.

Проведенні попереднє тестування проміжних продуктів технологічної схеми секції РЗФ №1 на гвинтових сепараторах типу СВШ-2-1000, які показали можливість застосування гвинтових сепараторів для удосконалення технологічної схеми збагачення магнетитових кварцитів АТ «Пів-ДГЗК» з метою отримання концентрату марки КЗВ з масовою часткою $Fe_{заг}$ на рівні 68,0+%.

При розділенні промпродуктів магнітної сепарації першої стадії, в концентраті гвинтового сепаратору підвищено масову частку заліза загального на 3,6-9,8 % – з 47,7-48,7% до 51,3-58,5%. З пісків II стадії класифікації, з масовою часткою заліза загального 49,8-57,9 % за рахунок застосування гвинтової сепарації отримано товарні продукти з масовою часткою заліза загального 65,5-68,4 % за виходом від операції 41,2 – 5,0 %.

Для опису механізму сегрегації магнетитових кварцитів у гвинтовому сепараторі необхідно вивчити: форму частинок, швидкість течії пульпи, вплив в'язкості рідкої фази, яка залежить від зміни температури пульпи, на процес гравітаційного збагачення.

З метою створення оптимальних умов розділення мінеральних зерен на похилій поверхні гвинтового сепаратору необхідно розробити метод розрахунку швидкості течії пульпи та розподілу концентрації мінеральних зерен, при якому відбувається розшарування суміші за крупністю та щільністю.

З метою підвищення технологічних показників збагачення магнетитових кварцитів необхідно провести дослідження щодо моделювання процесу розділення мінеральних частинок та їх агрегатів у гвинтовому сепараторі за рахунок встановлення впливу основних фізико – механічних властивостей пульпи у течії на співвідношення гідродинамічних та відцентрованих сил у процесі розшарування частинок на похилій поверхні.

Список літератури

1. **Смирнов В.О., Білецький В.С.** Гравітаційні процеси збагачення корисних копалин: Донецьк: Східний видавничий дім, 2005. 300 с.
2. **Пілов П.І.** Гравітаційні методи збагачення корисних копалин. Дніпро : Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», 2021. 152 с.
3. **Bates, L.** User Guide to Segregation / L. Bates. – British Materials Handling Board, Elsinore house, United Kingdom, 1997. – 134 p.
4. **Bridgwater, J.** Interparticle Percolation: Equipment Development and mean Percolation Velocities / J. Bridgwater, M. H. A. M. Cooke, Scott // Trans. I Chem. E. – 1978. – P. 157 – 167
5. **Brown, R. L.** The Fundamental Principles of Segregation / R. L. Brown // J. Inst. Fuel. – 1939. – V. 13. – P. 15 – 19
6. **Bagnold, R. A.** Experiments on a Gravity Free Dispersion of Large Solid Spheres in a Newtonian Fluid under Shear / R. A. Bagnold // Proc. Roy. Soc. – London, 1954. – A 225. P. 49 – 63.
7. **Williams, J. C.** Segregation of Powders and Granular Materials / J. C. Williams // Fuel Society Journal. – 1963. – 14. – P. 29 – 34.
8. **Williams, J. C.** The Segregation of Particulate Materials / J. C. Williams // Powder Technology, 15, 1976. – P. 245.
9. **Enstad, G. G.** Segregation of Powders and its Minimization in Kalman H. Ed. / Enstad, G. G. // The 2-nd Israel Conference for Conveying and Handling of Particulate Solid. Proceedings. – Jerusalem, 1997. – P. 11 – 52.
10. **Shinohara, K.** Some Segregation Mechanisms and their Prevention. Proc. Int. Sump. Reliable flow of Particulate Solids / K. Shinohara, G. G. Enstad. – Oslo, 1993. – P. 819.
11. **Shinohara, K.** Mechanism of Density Segregation of Particles in Filling Vessels / K. Shinohara, S. Miyata // Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev. – 23(3). – 1984. – P. 423].
12. **Кизевальтер Б.В.** Теоретические основы гравитационных процессов обогащения. М.: Недра, 1979. 296 с

13. **Блехман И.И.** К теории разделения сыпучих смесей под воздействием колебаний / И.И.Блехман, В.Я.Хайман // Инженерный журнал «Механика твердого тела». 1968. № 6, С.5-13.
14. **Богданович А.В.** Сравнительные испытания центробежных концентраторов различных типов / А.В.Богданович, С.В.Петров // Обогащение руд. 2001. № 3. С.38-41.
15. **Khakhar, D. V.** Radial Segregation of Granular Mixtures in Rotating Cylinders / D. V. Khakhar, J. J. McCarthy, J. M. Ottino // Phys. Fluids. – 1997. – 9. – 3600.
16. **Gray, J.** Particle-size Segregation and Diffusive Remixing in Shallow Granular Avalanches / J. Gray, V. A. Chugunov // Journal of Fluid Mechanics. – 2006. – 569. – P. 365 – 398.
17. **Hill, K. M.** Granular Temperature and Segregation in Dense Sheared Particulate Mixtures / K. M. Hill, Y. Fan // Kona. – 2016. – V. 33. – P. 150 – 168.
18. **Gray, J.** Theory for Particle Size Segregation in Shallow Granular Free-surface Flows / J. Gray, A. R. Thornton // Proceedings of the Royal Society of London A. – 2005. – 461(2057). – P. 1447 – 1473.
19. **Tripathi, A.** Density Difference-driven Segregation in a Dense Granular Flow / A. Tripathi, D. V. Khakhar // J. Fluid Mech. – 2013. – 717. – P. 643 – 669.
20. **Fan Y.** Modelling Size Segregation of Granular Materials: the Roles of Segregation, Advection and Diffusion / Y. Fan, C. P. Schlick, P. B. Umbanhowar, J. M. Ottino, R. M. Lueptow // J. Fluid Mech. – 2014. – 741. – P. 252 – 279.
21. **Tunuguntla, D. R.** A Mixture Theory for Size and Density Segregation in Shallow Granular Free-surface Flows / D. R. Tunuguntla, O. Bokhove, A. R. Thornton // Journal of Fluid Mechanics. – 2014. – 749. – P. 99 – 112.
22. **Dolgunin V. N.** Rapid Granular Flows on a Vibrated Rough Chute: Behavior Patterns and Interaction Effects of Particles / A. N. Kudi, A. V. Ukolov, M. A. Tuev // Chemical Engineering Research and Design. – 2017. – 122. – P. 22 – 32.
23. **Dolgunin, V. N.** Development of the Model of Segregation of Particles Undergoing Granular Flow Down on Inclined Chute / V. N. Dolgunin, A. N. Kudy, A. A. Ukolov // Powder Technology. – 1998. – 56. – P. 211 – 218. 132
24. **Dolgunin, V. N.** Segregation Kinetics of Particles with Different Roughness and Elasticity under a Rapid Gravity Flow of a Granular Medium / V. N. Dolgunin, A. N. Kudy, A. A. Ukolov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2009. – 43(2). – P. 187 – 196.
25. **Fan, Y.** Shear-induced Segregation of Particles by Material Density / Y. Fan, K. M. Hill // Phys. Rev. E. – 2015. – 022211.
26. **Hill, K. M.** Segregation in Dense Sheared Flows: Gravity, Temperature Gradients, and Stress Partitioning / K. M. Hill, D. S. Tan // J. Fluid Mech. – 756. – 2014. – P. 54 – 88.

УДК 622.7: 534

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
А. А. ГАПОНЕНКО, Є. Ю. БОБРОВ, аспіранти
Криворізький національний університет

МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКОВИХ ХВИЛЬ У ПРАКТИЦІ БЕЗКОНТАКТНИХ НЕРУЙНІВНИХ ВИМІРЮВАНЬ

Метою дослідження є аналіз методів формування ультразвукових хвиль для вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні використання електромагнітних ультразвукових перетворювачів та визначенні їх можливої конфігурації для вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

Практичне значення полягає в тому, що використання електромагнітних ультразвукових перетворювачів запропонованої конструкції дозволить створити вимірювальну систему для мінералогічного аналізу феромагнітних руд для функціонування якої не потрібен контакт з досліджуванним середовищем.

Результати. У практиці ультразвукових вимірювань найбільшого поширення знайшли п'єзоелектричні та електромагнітні перетворювачі (ЕМАТ). Ці перетворювачі можуть працювати, як у режимі генерації ультразвуку, так і як його детектор, відрізняються порівняно невеликим споживанням енергії та малими габаритами, перекривають широкий частотний діапазон і здатні формувати різні види ультразвукових хвиль. Вимірювальні системи з ЕМАТ мають усі переваги ультразвукових вимірювань у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю. Як і з п'єзоелектричними датчиками, за допомогою ЕМАТ можуть бути реалізовані різні методи вимірювань: ехо-імпульсні, з тангажем, наскрізною передачею та ін. Порівняльна характеристика та аналіз різних методів генерації та прийому ультразвуку дозволяють зробити висновок про те, що при реалізації акустичних вимірювань характеристик феромагнітної руди доцільно використовувати електромагнітні перетворювачі ЕМАТ з високоенергетичною імпульсною системою збудження без статичного магнітного зміщення. Це дозволить проводити вимірювання без фізичного контакту між перетворювачем та випробуваним зразком та простіше генерувати різні типи ультразвукових хвиль. Для спрощення налаштування геометрії вимірювального каналу та збільшення його функціональних можливостей, ЕМАТ можуть бути виконані з використанням технології фазованих решіток.

Ключові слова: ультразвук, вимірювання, електромагнітний перетворювач, руда, аналіз.

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Методи ультразвукового контролю використовуються у багатьох галузях науки і техніки. В практиці неруйнівного контролю ультразвук знайшов широке застосування для дефектоскопії різних виробів та контролю їх геометричних параметрів: вимірювання товщини сталевих прокату, виробничий та експлуатаційний контроль зварних швів труб, трубопроводів, компонентів та агрегатів у машинобудуванні, огляд залізничних колій та ін. [1]. Ультразвук незамінний у різноманітних біомедичних застосуваннях [2]. Також ультразвукові вимірювання активно застосовуються для визначення характеристик твердих, рідких і газоподібних матеріалів [3,4]. Ефективність та якість ультразвукових вимірювань багато в чому визначаються методом генерації та прийому ультразвукових хвиль. Це особливо стосується таких складних гетерогенних структур, якими є руда та супутні породи. Наявність інформації про фізико-механічні та хіміко-мінералогічні характеристики руди дозволяє ефективно управляти технологічним процесом її підготовки до металургійного переделу [5]. Вирішенню цієї проблеми присвячено велику кількість досліджень, але поки результати жодного з них не набули широкого практичного поширення.

Аналіз досліджень і публікацій. Відомі різні методи генерації ультразвуку, що відрізняються видом перетворюваної енергії: аеродинамічні (перетворюють енергію газових потоків), гідродинамічні (перетворюють енергію струменя рідини), електромеханічні (використовують енергію коливань різних механічних пристроїв), теплові (перетворюють енергію теплового удару), електророзрядні (перетворюють енергію електричного розряду в рідині), вибухові (перетворюють енергію вибуху) та ін [6]. Останнім часом відзначається великий прогрес у розробці лазерних та різноманітних оптичних систем на їх основі [7]. Однак у практиці ультразвукових вимірювань найбільшого поширення знайшли електроакустичні перетворювачі: п'єзоелектричні, електростатичні та електромагнітні (рис.1) [8,9].

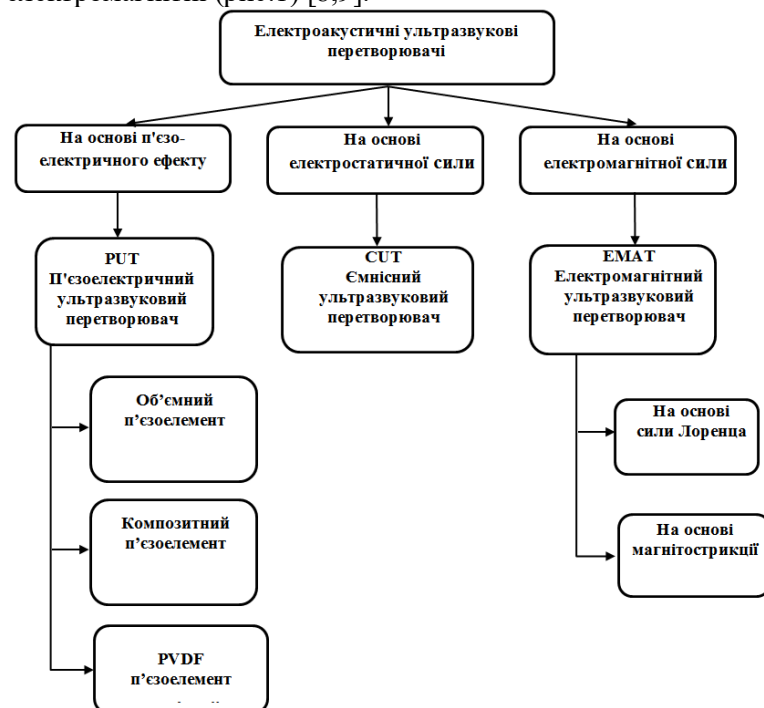


Рис.1. Електроакустичні перетворювачі

Ці перетворювачі можуть працювати, як в режимі генерації ультразвуку, так і як його детектор, відрізняються порівняно невеликим споживанням енергії і малими габаритами, перекривають широкий частотний діапазон і здатні формувати різні види ультразвукових хвиль [10].

Постановка завдання: обґрунтування використання електромагнітних ультразвукових перетворювачів та визначення їх можливої конфігурації для вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

Викладення матеріалу і результати. У режимі генерації ультразвуку електроакустичні перетворювачі перетворюють електричну енергію на акустичну. Перетворення енергії не відбувається безпосередньо. Електрична енергія в першу чергу перетворюється на механічну, а потім механічна енергія перетворюється на акустичну. При цьому акустична енергія є особливою областю механічної енергії. Той самий принцип здійснюється і при зворотному перетворенні, коли перетворювачі працюють в режимі прийому ультразвукового сигналу: спочатку акустична енергія перетворюється на механічну, а потім механічна енергія перетворюється на електричну. Наведені перетворення визначає діаграму спрямованості ультразвукового перетворювача та його ефективність [11].

Ультразвукові перетворювачі, що ґрунтуються на п'єзoeлектричному принципі, в даний час є найбільш застосовуваними в різних сферах науки і техніки. Основний їх елемент, який виготовляється з п'єзoeлектричних матеріалів, має електричну поляризацію при механічній напрузі або деформації. Ця властивість (прямий п'єзoeлектричний ефект) використовується для прийому ультразвукових сигналів. В результаті зворотного п'єзoeлектричного ефекту п'єзoeлектрики деформуються за дією прикладеної напруги і ця їхня властивість використовується для генерації ультразвуку.

До перетворювачів на основі п'єзoeлектричного ефекту відносяться: ультразвукові перетворювачі з одним об'ємним п'єзoeлементом (мономорфні) або складові; композитні ультразвукові перетворювачі; ультразвукові перетворювачі PVDF.

На рис. 2а наведена конструкція класичного п'єзoeлектричного перетворювача Ланжевена з болтовим кріпленням (BLT) на основі об'ємних (дискових) п'єзoeлементів [12].

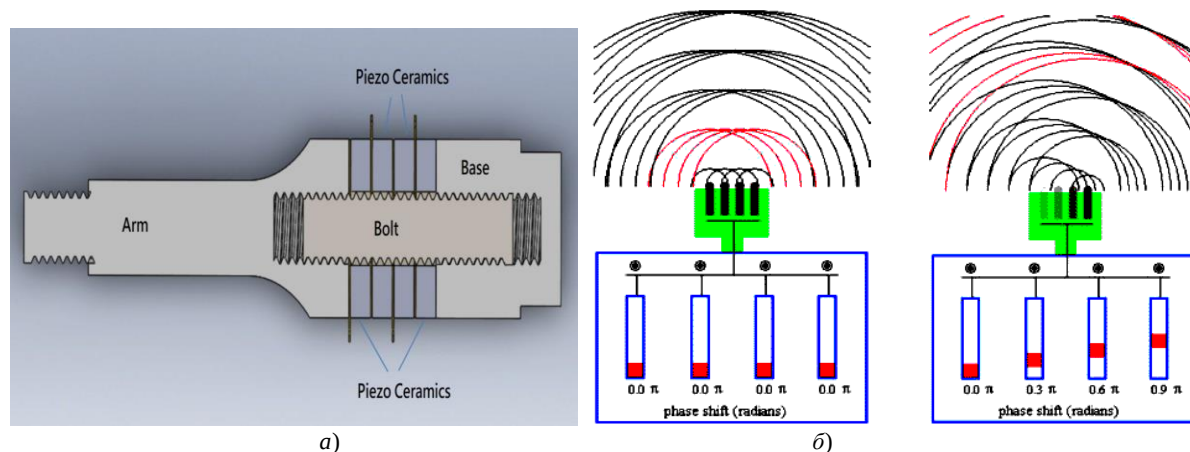


Рис. 2. Перетворювачі на основі об'ємних п'єзoeлементів: а - перетворювач Ланжевена з болтовим кріпленням (BLT); б – принцип роботи складеного п'єзоперетворювача на основі технології фазованих решіток

Перетворювач Ланжевена (BLT) складається із двох металевих блоків, скріплених між собою болтом. П'єзокераміка здатна витримувати стиск (але не розтяг), тому може нормально працювати навіть за високої сили стиснення, створюваної болтовим з'єднанням. Існують різні варіанти конструкції подібних перетворювачів з одним п'єзoeлементом або набором із них. В цілому, BLT мають такі позитивні якості:

- висока ефективність електромеханічного перетворення;
- можуть бути виготовлені з різної п'єзокераміки для одержання цільової резонансної частоти та амплітуди;
- можуть використовувати до 8 п'єзокерамічних елементів для збільшення вихідної амплітуди;
- болт, що застосовується в BLT, також можна використовувати для точного налаштування загальної резонансної частоти перетворювача і амплітуди генерованого ультразвуку.

Такі властивості роблять BLT звичайним джерелом ультразвуку.

Рис. 2б ілюструє принцип роботи складового п'єзоперетворювача, що використовує технологію фазованих решіток [13]. Ультразвукові промені керуються шляхом регулювання часу затримки активації кожного елемента перетворювача. Закономірності впливу часу затримки на процеси випромінювання та прийому ультразвуку знаходяться в пам'яті регулятора часу затримки, який зсуває імпульси збудження під час передачі та сигнали відбитих хвиль у процесі їх прийому.

Алгоритм затримки, стосовно кожного елемента перетворювача, розташованого в точці $x = (x_n, y_m)$ променю під кутом до певної траєкторії, з фокальною точкою F у матеріалі, що характеризується швидкістю поширення c , визначаються різницею часу поширення [14]

$$\Delta\tau_{nm}(x; F) = (|F - x_0| - |F - x|)/c, \quad (1)$$

де x_0 - центральне положення перетворювача матриці.

Фокус F виражається кутом падіння (зенітним кутом) θ і кутами повороту (азимутальними кутами) $\varnothing$

$$F = (F_1, F_2, F_3) = (R \sin \theta \cos \varnothing, R \sin \theta \sin \varnothing, R \cos \theta). \quad (2)$$

Тому вираз, що визначає запізнення $\Delta\tau_{nm}$ має вигляд

$$\Delta\tau_{nm}(x; F) = R \left[1 - \sqrt{(\sin \theta \cos \varnothing - x_n/R)^2 + (\sin \theta \sin \varnothing - y_m/R)^2 + \cos^2 \theta} \right] / c. \quad (3)$$

Для перетворювачів з лінійною решіткою рівняння (3) спрощується

$$\Delta\tau_{nm}(x; F) = R \left[1 - \sqrt{(\sin \theta - x_n/R)^2 + \cos^2 \theta} \right]. \quad (4)$$

При кінцевому обмеженні фокусної відстані R рівняння (3) та (4) матимуть такий вигляд

$$\Delta\tau_{nm}(x; \theta, \varnothing) = x_n \sin \theta \cos \varnothing / c + y_m \sin \theta \sin \varnothing / c. \quad (5)$$

$$\Delta\tau_n(x; \theta) = x_n \sin \theta / c. \quad (6)$$

Наведені вирази дозволяють сформувати управління елементами матричного перетворювача обраної конфігурації таким чином, щоб регулювати інтенсивність та змінювати просторові координати ультразвукового впливу із заданими параметрами на середовище, що досліджується.

П'єзoeлектрична кераміка на основі цирконату-титанату свинцю (PZT) - функціональний матеріал, який широко використовується у виробництві ультразвукових перетворювачів, завдяки високому коефіцієнту електромеханічного зв'язку, широкому діапазону діелектричної проникності, низьким механічним втратам, простоті виготовлення та низькій вартості [15,16]. Однак через високий акустичний імпеданс чистої PZT їх поперечний зв'язок в режимі резонансу товщини великий, смуга пропускання вузька, і тому перетворювач, виготовлений з неї має суттєві обмеження у сфері застосування. Ці недоліки значною мірою усуваються шляхом змішування чистої п'єзoeлектричної кераміки PZT з полімерами та створення, таким чином, п'єзoeлектричних композитів. П'єзокомпозити стали кращим матеріалом для багатьох високоефективних ультразвукових перетворювачів з того часу, як вони були винайдені R.E. Newnham та L.E. Cross наприкінці 1970-х. П'єзoeлектричні композити складаються з матеріалів п'єзoeлектричної керамічної фази PZT та матеріалів полімерної фази з певною зв'язністю, об'ємом, вагою та просторовим геометричним розподілом (рис. 3) [17]. Зв'язність визначається кількістю вимірів, через які матеріал є безперервним. Зазвичай перша цифра відноситься до п'єзoeлектрично активної фази. Відомі композити зі зв'язністю: 0-0, 0-1, 0-2, 0-3, 1-1, 1-2, 1-3, 2-2, 2-3 та 3-3. З них, 1-3 п'єзoeлектричні композити є найбільш широко досліджуваними та застосовуваними.

П'єзокомпозити мають такі переваги у порівнянні зі стандартною об'ємною п'єзoкерамікою: нижчий акустичний імпеданс, від 5 MRayl до 27 MRayl; високі коефіцієнти зв'язку, від 0,61 до 0,75; висока пропускна спроможність [18]. Недоліки п'єзокомпозитів порівняно з об'ємними п'єзoкерамічними компонентами, як правило, полягають у більш високій вартості та часто обмеженому діапазоні робочих температур. Використання різних технологій дозволяє виробляти 1-3 композити для частот від 80 кГц до 10 МГц, з коефіцієнтом заповнення від 15% до 80% і розмірами до 100 мм на 100 мм.

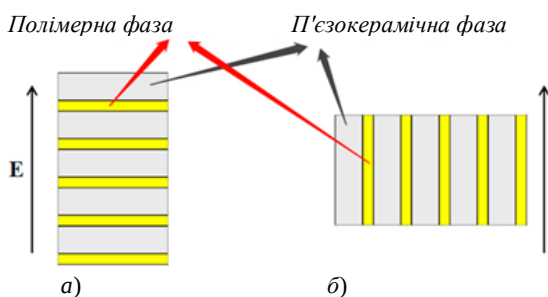


Рис. 3. Структура п'єзoeлектричних композитів: а – послідовна; б – паралельна

Якщо для перетворювачів, що працюють у рідких контактних середовищах, потрібна широка смуга пропускання або фокусуюча дія, то як матеріал перетворювача доцільно розглядати п'єзoeлектричні плівки з полівініліденфториду (PVDF). Використовуючи прості методи

з'єднання, можна легко виготовити перетворювачі, що працюють у діапазоні 1-100 МГц, з плоскими та/або криволінійними поверхнями. Вища чутливість порівняно з перетворювачем, що складається з однієї п'єзоелектричної плівки, досягається за рахунок використання методів кореляції з багатошаровими версіями перетворювачів з PVDF з кодуванням Баркера [19].

У роботі [20] наводяться результати моделювання накопичувача енергії та п'єзоелектричного наногенератора (PENG) на основі мікрomodифікованого полівініліденфториду (PVDF) та його сополімеру полі(вініліден-трифторетилен) (P(VDF-TrFE)) з помітним збільшенням виходу по струму. Нижня форма кантилевера має довжину 800 мкм, ширину 200 мкм і висоту 10 мкм. У площині 18 рядів та 4 стовпці циліндрів, як показано на рис. 4а. Нижня частина конструкції з'єднується із землею, а верхня поверхня циліндрів з'єднується із електричним контуром. Таким чином, PENG сприймається як джерело змінного струму (рис. 4б).

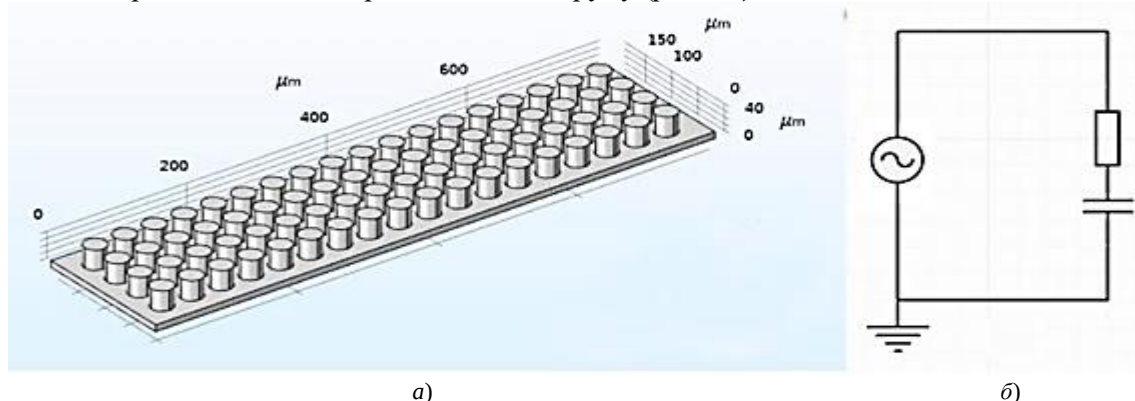


Рис. 4. П'єзоелектричний наногенератор PENG: а - схема поверхнево-модифікованої циліндричної структури PENG; б - принципова електрична схема PENG

Іншою групою поширених електроакустичних перетворювачів є ультразвукові перетворювачі, що базуються на електростатичному принципі. Вони складаються із двох електродів, звернених один до одного (рис.5) [21]. При цьому один електрод фіксується і не може рухатися чи згинатися. Протилежний електрод виготовляється тонким та може деформуватися. Це може бути або тонка фольга, що діє як мембрана, або тонка пластина, що згинається. Ці пристрої часто називають ємнісними ультразвуковими перетворювачами (CUT). Між їх електродами знаходиться повітря чи вакуум для електричної ізоляції. На відміну від ультразвукових перетворювачів, заснованих на п'єзоелектричному принципі, таких як мономорфні, складові або композитні, ємнісний перетворювач працює з використанням високої напруги зміщення постійного струму.

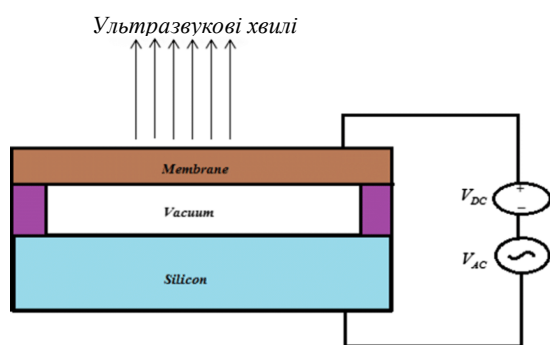
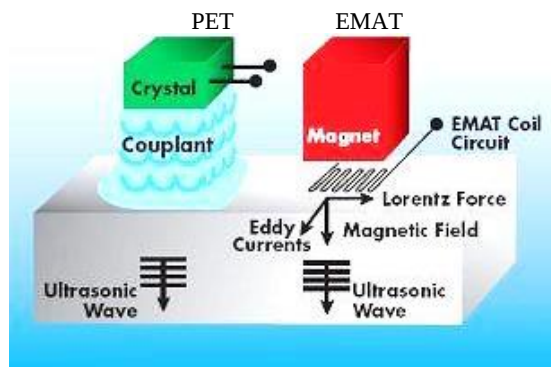


Рис.5. Конструкція електростатичного ультразвукового перетворювача

У роботі [22] показано, що використання мембрани з нітриду кремнію може збільшити сигнал, що передається на 28% і чутливість приймача на 33% у порівнянні зі звичайною полікремнієвою мембраною. Моделювання з полімерною мембраною показало максимальне збільшення прогину мембрани до 67% при частоті приблизно 6,5 МГц у порівнянні з нітридом. Крім того, оптимальна частота зв'язку механічного імпедансу полімеру була знижена до 3,7 МГц.

Електромагнітні акустичні перетворювачі (EMAT) використовуються для безконтактної генерації та прийому акустичних хвиль у провідних та/або магнітострикційних (феромагнітних) матеріалах (рис. 6) [23]. На відміну від п'єзоелектричних перетворювачів EMAT не потребує прямого контакту з поверхнею матеріалу, характеристики якого досліджуються.

Рис. 6. Принцип дії електромагнітного акустичного перетворювача EMAT у порівнянні з п'єзоелектричним перетворювачем PET



Перетворювач EMAT складається з двох основних компонентів: магніту (постійного або електромагніту) та електричної котушки. Магніт створює магнітне поле зміщення (статичне або квазістатичне). На котушку подається електричний сигнал із частотою в діапазоні від 20 до 10 МГц. Залежно від розв'язуваної задачі, сигнал може бути безперервним або імпульсним. Таким чином, електрична котушка також формує змінне магнітне поле. Ультразвукові хвилі генеруються в контрольованому матеріалі за рахунок взаємодії двох прикладених магнітних полів.

Існує два основних механізми електромагнітної генерації ультразвукових хвиль: сила Лоренца у провідних матеріалах та магнітострикція у матеріалах, що мають цю властивість (рис. 7) [24]. Можлива також об'єднана дія цих факторів.

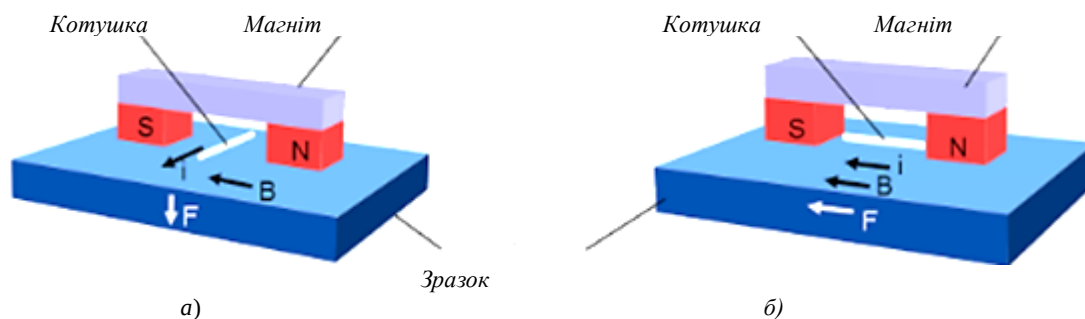


Рис. 7. Основні механізми електромагнітної генерації ультразвукових хвиль: а - сила Лоренца; б - магнітострикція

Котушка, що розташована біля поверхні досліджуваного провідного середовища, випромінює електромагнітний сигнал, який на глибині скін-шару δ , індукує вихрові струми та пов'язані з ними електричні поля. Статичне або квазістатичне магнітне поле порушує баланс, що склався, породжуючи силу Лоренца, що діє на електрони. Це сила визначається наступним виразом [25]

$$F_L = J_e \times B, \quad (7)$$

де F_L - сила Лоренца у провідному матеріалі; J_e - щільність вихрових струмів; B - динамічна щільність магнітного потоку.

За рахунок сили Лоренца відбувається деформація зразка, що досліджується, і, як наслідок, формуються пружні хвилі.

Коли EMAT використовується з феромагнітним середовищем, пружна деформація матеріалу відбувається на основі магнітострикції. Домени Вейсса феромагнетиків взаємодіють із зовнішнім змінним магнітним полем. Вони можуть зміщуватися та обертатися залежно від зовнішнього магнітного поля. Через цей рух розмір матеріалу змінюється в діапазоні від 10 мкм до 2 мм на метр у матеріалів із високою магнітострикцією [26]. Напруженість магнітного поля H та магнітострикційна сила F_M пов'язані залежністю

$$F_M = -\nabla_t(N^T H) \quad (8)$$

де N^T - магнітна матриця зворотного тиску.

В обох розглянутих випадках і під дією сили Лоренца F_L , і під дією магнітострикційної сили F_M досліджуване середовище є обов'язковою складовою електромагнітного акустичного перетворювача.

Залежно від конструкції та орієнтації котушок та магнітів EMAT може формувати у досліджуваному зразку різні типи хвиль: об'ємні поздовжні (нормальні або кутові), поперечні (SH) з горизонтальною та вертикальною поляризацією, поверхневі хвилі Релея, хвилі Лемба у пластинах та інші види об'ємних та хвильоводних мод (рис. 8) [27].

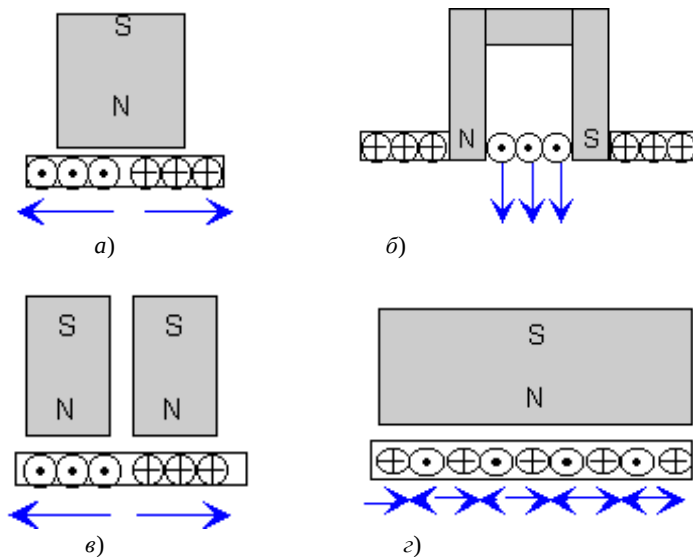


Рис. 8. Ультразвукові хвилі, що формуються ЕМАТ: *а* - радіально поляризовані поперечні хвилі; *б* - поздовжні хвилі; *в* - поверхнево поляризовані поперечні хвилі; *г* - вертикально поляризовані поперечні хвилі, поздовжні або хвилі Релея

У звичайних електромагнітних акустичних перетворювачах ЕМАТ є статичне магнітне поле, створюване постійними магнітами. Магніт збільшує розмір ЕМАТ, а його магнітна сила може притягувати магнітні предмети, що знаходяться поблизу. Це може призвести до механічного пошкодження датчика та досліджуваних об'єктів. У роботі [25] пропонується високоенергетична система акустичного збудження ЕМАТ без статичного магнітного зміщення, що не містить постійних магнітів. Імпульсна потужність збудження високої енергії формується за допомогою коливального контуру *LC*. Максимальна амплітуда струму може досягати 1700 А, що набагато більше струму у звичайних ЕМАТ. Така конструкція дозволила значно збільшити інтенсивність ультразвукового сигналу, що генерується, а розмір ЕМАТ значно зменшити. Пропонована високоенергетична імпульсна котушка збудження використовується для формування хвилі Лемба моди *A0*. Результати моделювання та експерименту показали, що порівняно із звичайними ЕМАТ використання високоенергетичного імпульсного електромагнітного акустичного перетворювача з меандровою котушкою дозволяє збільшити відстань до об'єкта, що досліджується, а сформовані сигнали мають високе відношення сигнал/шум. Запропонована структура ЕМАТ використовується для точного визначення розташування дефектів у феромагнітних матеріалах і не допускає притягування сторонніх магнітних предметів.

Так само як і п'єзoeлектричні перетворювачі, ЕМАТ можуть бути виконані з використанням технології фазованих решіток. Діаграму далекого поля перетворювача можна зробити більш цілеспрямованою, просто впливаючи на ваговий коефіцієнт амплітуди збудження кожного елемента масиву. Це дозволяє ефективно керувати орієнтацією, поляризацією та фокусуванням генерованого ультразвукового променя. Керування можна здійснювати, впливаючи на конфігурацію статичного намагнічування і збудження, а також змінюючи геометричні характеристики котушки. Однак важливішим є те, що просторове управління орієнтацією і фокусуванням променя, що формується, може виконуватися електронним способом шляхом впливу на фази і амплітуди елементів решітки в котушці. Для цього обмотки ЕМАТ повинні бути розділені на контури, що окремо керуються, які управляються таким же чином, як і розглянуті раніше п'єзoeлектричні перетворювачі [28].

Висновки та напрямки подальших досліджень. У практиці ультразвукових вимірювань найбільшого поширення знайшли п'єзoeлектричні та електромагнітні перетворювачі. Системи з ЕМАТ мають усі переваги ультразвукових вимірювань у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю. Як і з п'єзoeлектричними датчиками, за допомогою ЕМАТ можуть бути реалізовані різні методи вимірювань: ехо-імпульсні, з тангажем, наскрізною передачею та ін.

Порівняно з п'єзoeлектричними перетворювачами ЕМАТ мають такі переваги:

фізичний контакт (контактна рідина) між перетворювачем та досліджуваним зразком не потрібен;

ЕМАТ менш чутливий до стану поверхні об'єкта, що досліджується;
простіше конструкція вимірювального каналу, зважаючи на менші обмеження на геометрію введення-виведення ультразвукового променю;
легше генерувати хвилі SH-типу (об'ємні та спрямовані поперечні хвилі), а також інші типи ультразвукових хвиль.

Недоліки ЕМАТ порівняно з п'єзоелектричними перетворювачами можна резюмувати так:
менша ефективність перетворення, тому необхідні складніші методи обробки сигналів, щоб виділити сигнал з шуму;

область застосування обмежена провідними та/або магнітними середовищами;

ЕМАТ, що зазвичай використовуються (з постійними магнітами), більше за розміром, тому фазовані решітки з ЕМАТ складніше виготовляти;

постійні магнітні ЕМАТ можуть притягувати сторонні магнітні предмети.

Порівняльна характеристика та аналіз різних методів генерації та прийому ультразвуку дозволяють зробити висновок про те, що при реалізації акустичних вимірювань характеристик ферромагнітної руди доцільно використовувати електромагнітні перетворювачі ЕМАТ з високоенергетичною імпульсною системою збудження без статичного магнітного зміщення. Для спрощення налаштування геометрії вимірювального каналу ЕМАТ можуть бути виконані з використанням технології фазованих решіток. Така конфігурація ЕМАТ дозволяє усунути наведені вище його недоліки порівняно з п'єзоелектричними перетворювачами та повною мірою скористатися їх перевагами.

Напрямок подальших досліджень слід вважати розробку конструкції та моделювання ультразвукового вимірювального каналу на основі високоенергетичного імпульсного ЕМАТ, а також його апробацію із зразками залізної руди з різними характеристиками.

Список літератури

1. **Ramazan Demirli, Moeness G. Amin, XizhongShen, Yimin D. Zhang.** Ultrasonic Flaw Detection and Imaging through Reverberant Layers via Subspace Analysis and Projection. - *Advances in Acoustics and Vibration* Volume 2012, Article ID 957379, 10 pages. doi:10.1155/2012/957379.
2. **Lashkari B, Jan L, Mandelis A.** Application of backscattered ultrasound and photoacoustic signals to evaluate bone collagen and minerals. *Quant Imaging Med Surg* 2015;5(1):46-56. doi: 10.3978/j.issn.2223-4292.2014.11.11.
3. **Zborovjanz M.** Identification of minerals during drilling process via acoustic signal. *Metallurgy and foundry* 4/2001, Vol. 26. Krakow, Poland, 2001.
4. **Моркун Н.В., Тронь В.В., Сердюк О.Ю., Гапоненко А.А., Грищенко С.М., Бобров Є.Ю.** Визначення параметрів пульпи у робочій камері магнітного сепаратора на основі оцінки процесу розповсюдження хвиль Лемба // *Гірничий вісник*. – Кривий Ріг, 2022. Вип. 110. С. 172-177.
5. **Моркун В.С., Моркун Н.В., Тронь В.В., Сердюк О.Ю., Гапоненко І.А., Гапоненко А.А.** Вимірювання параметрів процесу магнітної сепарації на основі методів ультразвукового контролю. – *Вісник Криворізького національного університету*. – 2021, випуск 52, С. 10-15. DOI: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-10-15.
6. **Гершгал Д.А., Фридман В.М.** Ультразвукова апаратура промислового призначення. - *Енергія*, 1967, 263 с.
7. **Feiming Qian, Guangzhen Xing, Ping Yang, Pengcheng Hu, Limin Zou, Triantafillos Koukoulas.** Laser-induced ultrasonic measurements for the detection and reconstruction of surface defects. - *Acta Acustica* 2021, 5, 38. <https://doi.org/10.1051/aacus/2021031>.
8. **Моркун В.С., Кравченко О.М.** Моделювання параметрів ультразвукового поля в процесі очищення виробів складної конфігурації, – *Кривий Ріг: Гірничий вісник*. 2020. Вип. 107. С. 3-10.
9. **Моркун В.С., Пікільняк А.В.** Дослідження динаміки газових бульбашок у процесі флотації рудної пульпи, *Гірничий вісник*. – Кривий Ріг: 2020. Вип. 107. С.48-53.
10. **Моркун В.С., Моркун Н.В., Сердюк О.Ю.** Використання високоенергетичного ультразвуку для оцінки параметрів процесу осадження часток твердої фази пульпи // *Вісник Криворізького національного університету: зб. наук праць*. – 2019. – Вип. 48. – С. 3-7.
11. **G. Sessler R. Lerch and D. Wolf.** Technische Akustik. 1st ed. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN: 978-3-540-23430-2.
12. <https://www.unictron.com/ultrasonic-transducers/piezoelectric-technologies/bolt-clamped-langevin-transducer>.
13. <https://www.ndt.net/article/dgzfp04/papers/v51/v51.htm>.
14. **K. Nakahata, N. Kono.** 3-D Modelings of an Ultrasonic Phased Array Transducer and Its Radiation Properties in Solid. - *Materials Science, Physics*, 2012. DOI:10.5772/29954.
15. **Fischer, J.; Herzog, T.; Walter, S.** Smart Sensors, Actuators, and MEMS VI—Design and fabrication of a 5 MHz ultrasonic phased array probe with curved transducer. *SPIE Proc.* 2013, 8763, 87632M.
16. **Costa, D.J.; Buiochi, F.; Elvira, L.** Graded piezocomposite for the construction of air-coupled ultrasound transducer. In *Proceedings of the Ultrasonics Symposium, Chicago, IL, USA, 3–6 September 2014*.
17. **Qiguo Huang, Hongwei Wang, Shaohua Hao, Chao Zhong, Likun Wang.** Design and Fabrication of a High-Frequency Single-Directional Planar Underwater Ultrasound Transducer - *Sensors* 2019, 19(19), 4336; <https://doi.org/10.3390/s19194336>.

18. <https://www.smart-material.com/13CompOverviewV2.html>
19. **M. Platte** (1987) PVDF ultrasonic transducers, *Ferroelectrics*, 75:1, 327-337, DOI: 10.1080/00150198708008983
20. **Yizhi Liu, Ziyu Huang, Chen Liu**. Improved Design via Simulation of Micro-Modified PVDF and Its Copolymer Energy Harvester with High Electrical Outputs. - *Sensors (Basel)*. 2020 Oct; 20(20): 5834.
21. **Reshmi Maity, Kalpana Gogoi, Niladri Pratap Maity**. Micro-electro-mechanical-system based capacitive ultrasonic transducer as an efficient immersion sensor. - *Microsystem Technologies* 2019, 25(4):1-8. DOI: 10.1007/s00542-019-04384-5.
22. **Ming-Wei Chang, M. et al**. Polymer-based Capacitive Micromachined Ultrasonic Transducers (CMUT) for Micro Surgical Imaging Applications. - *2006 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems* (2006): 61-65.
23. https://www.wikiwand.com/en/Electromagnetic_acoustic_transducer#Codes_and_standards
24. <https://www.rosen-group.com/global/company/explore/we-can/technologies/measurement/emat.html>
25. **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.
26. 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. URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/8974>.
27. <https://www.ndt.net/ndtaz/content.php?id=144>
28. **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>

УДК 336.67.1

А.М. ТУРИЛО, д-р екон. наук, проф., Р.В. КОРОЛЕНКО, канд. екон. наук, доц.,
С.В. СВЯТЕНКО, ст. викладач
Криворізький національний університет

ФІНАНСОВИЙ РЕЗУЛЬТАТ: СУТНІСТЬ І ОЦІНКА ЙОГО ІННОВАЦІЙНОЇ СКЛАДОВОЇ ДЛЯ ПІДПРИЄМСТВ ЗАЛІЗОРУДНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ КРИВБАСУ З ПОЗИЦІЇ ЗМІСТУ ФІНАНСОВОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Мета. Метою є дослідження категорії «фінансовий результат підприємства» з позиції її сутності відносно змісту фінансової діяльності, яка визначена в національних стандартах бухгалтерського обліку і розробка на цій основі теоретико-методичних підходів щодо оцінювання інноваційно-якісної складової отриманого на підприємстві фінансового результату.

Методи дослідження. Результати і наукові положення, наведені у статті отримані з використанням певних методів (різних за напрямом і масштабом охоплення предмету дослідження): узагальнення результатів попередніх досліджень, комплексного аналізу та синтезу, логіко-структурного й логіко-динамічного аналізу, науково-аналітичний, порівняння й аналогії, економіко-математичний тощо.

Наукова новизна. Досліджено сутність фінансового результату підприємства з позиції його ув'язки зі змістом категорії «фінансова діяльність підприємства», що визначена в національних стандартах бухгалтерського обліку.

Вперше запропоновано і розроблено теоретико-методичні підходи до визначення величини інноваційно-якісної складової фінансового результату підприємства від його фінансової діяльності.

Практична значимість. Представлений матеріал виступає значним методичним підґрунтям у процесі комплексного аналізу, оцінки, планування й управління фінансовою діяльністю підприємства.

Запропонована в роботі методика дозволяє оцінити фінансовий результат підприємства, по-перше, суто з фінансових позицій, а по-друге, розрахувати в загальній величині фінансового результату підприємства його інноваційно-якісну складову.

Результати. Ключовим результатом виконаного авторами дослідження є методика, що дозволяє оцінити інноваційно-якісні чинники відносно фінансової діяльності підприємства шляхом виявлення їх впливу на загальну величину фінансового результату підприємства.

Визначено питому вагу інноваційно-якісних чинників фінансової діяльності для гірничо-збагачувальних комбінатів Криворізького регіону.

Зазначено, що фінансовий результат і його конкретизація в показнику плати за фінансовий ресурс (капітал) є важливою складовою і важливим підґрунтям до визначення іншого поняття й іншого показника, що характеризують фінансову діяльність підприємства.

Ключові слова: фінансовий результат підприємства, інноваційно-якісна складова, фінансова діяльність, оцінка, інновації, вартість капіталу.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-62-67

© Турило А.М., Короленко Р.В., Святенко С.В., 2023

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Ситуація в економічній науці в аспекті використання і трактування сукупності термінів і показників відносно таких видів діяльності, станів, оцінки (аналізу) і систем управління на підприємстві, як відповідно економічна (операційна) і фінансова діяльність, економічний і фінансовий стан, економічний і фінансовий менеджмент, економічний і фінансовий аналіз тощо дійшла до того критичного моменту, коли грані і відмінності між певними економічними і фінансовими сферами в діяльності підприємства практично стерті.

Наука ґрунтується і вимагає чітких критеріїв, змістовних ознак і термінологічних підходів у процесі діалектичного пізнання, дослідження, розкриття сутності й оцінки будь-яких явищ, процесів, об'єктів тощо.

Можливі різні підходи, але в нашому випадку розглядається варіант, коли для підприємств за основу розмежування і подальшого теоретико-методичного удосконалення певних аспектів фінансової та економічної діяльності беруться теоретико-методичні підходи, які закладені в національних стандартах бухгалтерського обліку.

Там чітко визначено критерії розмежування і зміст фінансової й економічної (операційної) діяльності підприємства.

Яскраво, наприклад, така відмінність відображена в положенні (стандарті) бухгалтерського обліку 2 і формі 1 «Баланс». Баланс підприємства має дві окремі й абсолютно різні за змістом частини: активи підприємства і пасиви (капітал) підприємства, при цьому операційна (економічна) діяльність підприємства за своїм змістом пов'язана і розкривається в активах підприємства, а фінансова діяльність аналогічним чином пов'язана і розкривається в пасивах підприємства.

Подібні конкретні принципи і критерії розмежування потрібно перенести в цілому на економічну і фінансову сферу діяльності підприємства, що дозволить чітко визначити сутність і межі фінансової й економічної ефективності та систем управління фінансовою й економічною діяльністю підприємства.

Аналіз досліджень і публікацій. В економічній літературі доволі широко розглядається питання фінансових результатів підприємства [1-10 та ін.].

Постановка задачі. У даній роботі розглянуто проблему сутності категорії «фінансовий результат підприємства».

У науковій і навчально-методичній літературі, а також у реальному практичному використанні менеджерами різних сфер і напрямів господарювання поняття «фінансовий результат (фінансові результати) підприємства» має різні тлумачення і в розрахунках конкретизується через різні показники.

Доволі часто фінансовий результат за змістом ототожнюється з поняттями економічний результат, фінансово-економічний результат, комерційний результат, кінцевий результат, виробничо-фінансовий результат тощо.

Зрозуміло, що такого не може бути, бо це має серйозні наслідки різного ґатунку. Це стосується, наприклад, чистоти, обґрунтованості й ефективності наукової, навчальної і практичної діяльності, тобто загальна визначеність і обґрунтованість у питаннях такого роду не гальмує, не «розмиває», а прискорює і робить більш свідомим шлях до досягнення поставлених цілей в різних сферах господарської діяльності людини.

Ще більше зауважень існує до показників, які конкретизують поняття «фінансовий результат (результати) підприємства». Так, до фінансових результатів діяльності підприємства відносять: дохід (виручку) від реалізації продукції (робіт, послуг), чистий дохід (виручку) від реалізації продукції (робіт, послуг), валовий прибуток, прибуток (збиток) від операційної діяльності, прибуток (збиток) від звичайної діяльності до оподаткування, чистий прибуток (збиток) тощо.

Даний перелік показників, які характеризують різні види фінансових результатів підприємства, нами розглянуто з тієї позиції, що вони, по-перше, найбільш комплексно, змістовно і предметно представлені серед інших літературних джерел, а по-друге, представлені в такому нормативно-методичному матеріалі, як положення (стандарти) бухгалтерського обліку 3 «Звіт про фінансові результати».

Викладення матеріалу та результати. З цього приводу наше бачення і запрошення до дискусії відносно важливих аспектів поставленої в даній роботі мети.

У положеннях (стандартах) бухгалтерського обліку (П(С)БО) чітко дано визначення і розкрито зміст понять «фінансова діяльність» і «операційна діяльність» по відношенню до підприємства (П(С)БО 3, П(С)БО 4).

Операційна діяльність пов'язана з економічними ресурсами підприємства (активами підприємства) (її трактується як економічна діяльність), а фінансова діяльність пов'язана з фінансовими джерелами і ресурсами підприємства (пасивами підприємства).

Прибуток підприємства в П(С)БО 3 визначається як сума, на яку доходи перевищують пов'язані з ними витрати.

Таким чином, розгляд П(С)БО в аспекті змісту і відмінностей між операційною (економічною) і фінансовою діяльністю підприємства, сутності понять і розрахунку показників прибутку і доходу дозволяє нам аргументовано визначити, що доходи від реалізації продукції (виручка від реалізації) і прибуток (за видами) пов'язані з операційною (економічною) діяльністю підприємства, тобто доходи від реалізації продукції (робіт, послуг) і прибуток від реалізації продукції (робіт, послуг) представляють собою економічні результати підприємства (а не фінансові результати).

Далі, існує протиріччя між змістом поняття «фінансова діяльність» (П(С)БО 4) і змістом поняття «фінансові результати» (П(С)БО 3), бо в П(С)БО 3 фінансові результати за своєю сутністю є економічними (операційними) результатами підприємства, а в П(С)БО 4 фінансова діяльність чітко й обґрунтовано розкрита за фінансовими критеріями і фінансовим змістом.

Таке протиріччя спонукає до пошуку сутності поняття фінансовий результат (у відповідності до змісту фінансової діяльності підприємства).

Аргументація і специфіка поняття «фінансовий результат» закладена в сутності фінансової діяльності підприємства, що чітко визначена в П(С)БО 4.

На наш погляд, фінансовий результат у відповідності до змісту поняття «фінансова діяльність» (П(С)БО 4) представляє собою плату за певний вид залученого фінансового ресурсу (певний вид капіталу), який відображений і обліковується в пасиві підприємства (П(С)БО 2). Плата за певну залучену величину фінансового ресурсу (капіталу) для підприємства представляє собою абсолютну величину і має грошову одиницю виміру.

Методологічна особливість і кардинальна відмінність полягає не тільки у виді результату, а і в тому, що мета економічної діяльності підприємства – це максимізація економічного результату, а мета фінансової діяльності це мінімізація фінансового результату (при даному варіанті величини і структури капіталу підприємства та при інших рівних умовах).

Мова йде саме про той вид фінансового результату в багатогранній фінансовій діяльності підприємства, що безпосередньо пов'язаний з пасивами (капіталом) підприємства і є об'єктом в системі пошуку фінансових джерел і управління якістю пасивів та вартістю капіталу підприємства.

Формування і якість пасиву підприємства визначається під впливом багатьох чинників.

Ефективне управління цими процесами потребує від менеджменту підприємства серйозних знань, навичок, досвіду, креативу, стабільності в забезпеченні ринкової комунікації в сфері зовнішніх фінансових відносин з різними суб'єктами господарювання.

Система формування фінансових ресурсів і забезпечення якості пасиву підприємства (склад і структура капіталу підприємства, плата за капітал (фінансовий результат), вартість капіталу), на наш погляд, в узагальненому виді залежить від трьох базових чинників:

інновацій в матеріальній і нематеріальній формі у всіх аспектах фінансової діяльності, й особливо в системі управління фінансами підприємства;

інтересів, потенціалу і бажання власників до процвітання підприємства, забезпечення його перспективного, прогресивно-конкурентного розвитку;

професійно-ділових якостей менеджменту підприємства в сфері фінансово-ринкових відносин, а точніше від рівня і мотивації людського капіталу в сфері фінансово-ринкової діяльності підприємства.

Фінансовий результат і його конкретизація в показнику плати за фінансовий ресурс (капітал) є важливою складовою і важливим підґрунтям до визначення іншого поняття й іншого показника, що характеризують фінансову діяльність підприємства. Це стосується відповідно поняття «фінансова ефективність підприємства» і показника «вартість капіталу». З цього приводу покажемо відмінність між категорією і показником.

Підпорядкованість між категорією (поняттям, терміном) і показником наступна. Вони обидва важливі і необхідні. Категорія (поняття, термін) є першоосновою і визначає теоретико-

сутнісний аспект предмету, що досліджується, а показник – конкретизує категорію з методико-практичних позицій і є інструментом до забезпечення необхідних розрахунків та аналітики в діяльності підприємства.

Фінансовий результат підприємства – це категорія, що пов’язана і відображає специфіку і природній, ринково-логічний підсумок фінансової діяльності підприємства з позиції формування і забезпечення необхідної якості його капіталу, конкретизується в показнику плати за капітал, розраховується як абсолютна величина та має грошову одиницю виміру.

Фінансова діяльність, як і будь-який вид діяльності підприємства, потребує інновацій. Але інновації в сфері фінансової діяльності є більш складними за змістом і ефективністю впровадження. Фінансова діяльність, і це аксіоматично, в принципі неможлива без інновацій. І взагалі інновації й інноваційний розвиток – це об’єктивний закон суспільного та економічного розвитку.

На рисунку представлено логіку впливу інновацій на якість пасиву підприємства і визначено необхідність розрахунку інноваційної (інноваційно-якісної) складової фінансового результату підприємства.

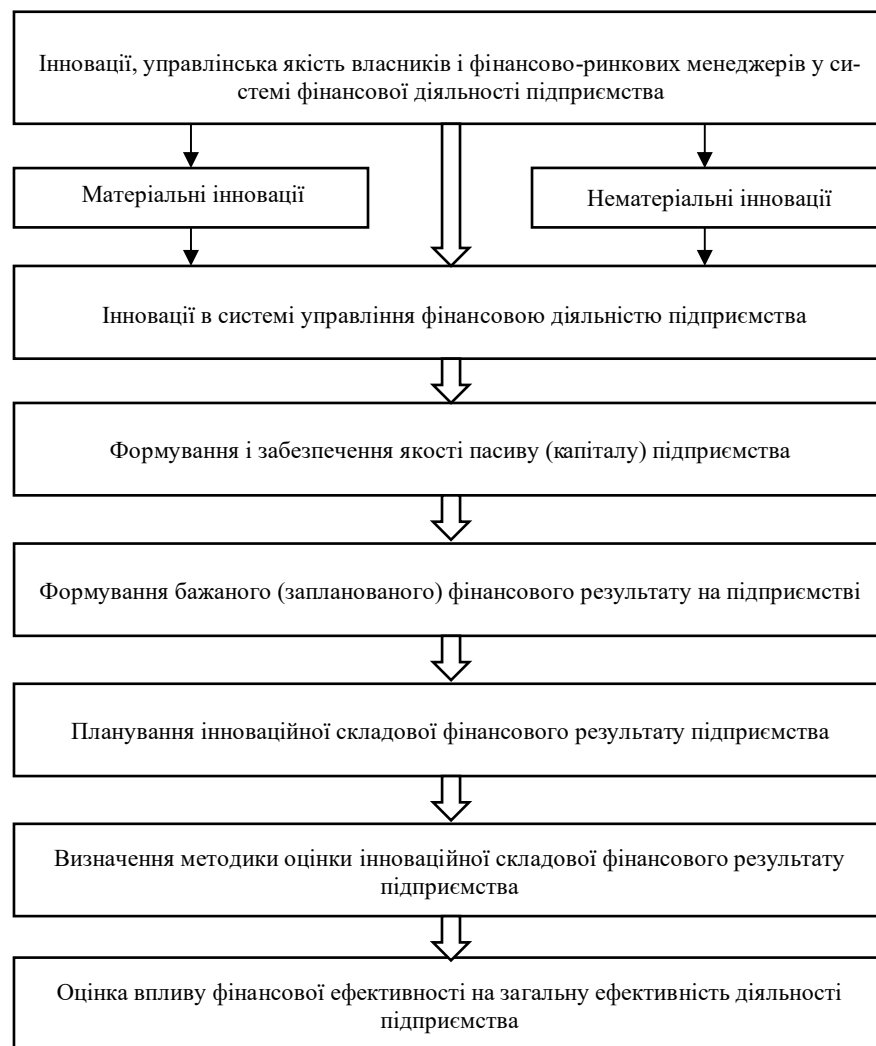


Рис. Інновації в системі фінансової діяльності підприємства

Методика оцінки величини інноваційно-якісної складової фінансового результату підприємства:

інноваційно-якісна складова фінансового результату підприємства характеризується і визначається сумісною дією інновацій і якістю власників та фінансово-ринкового менеджменту відносно формування пасиву підприємства і вартості його капіталу;

фінансова ефективність підприємства реалізується в показнику вартості капіталу підприємства;

фінансовий результат підприємства реалізується в показнику плати за капітал (плати за фінансовий ресурс) підприємства;

розраховується різниця середньозважених вартостей капіталу підприємства для двох суміжних періодів його розвитку ((t-1) і t);

показник різниці вартостей капіталу підприємства модифікується шляхом математичного перетворення в показник інноваційно-якісної складової фінансового результату підприємства (П.ФР_{ін.як})

$$\text{П.ФР}_{\text{ін.як}} = \text{Пл}_{(t-1)} - \text{Пл}_t \cdot (K_{(t-1)} / K_t),$$

де $\text{Пл}_{(t-1)}$, Пл_t – величина плати за капітал в періодах (t-1) і t; $K_{(t-1)}$, K_t – капітал підприємства в періодах (t-1) і t;

варіанти значення показника П.ФР_{ін.як} :

$\text{П.ФР}_{\text{ін.як}} > 0$, позитивний варіант фінансового розвитку підприємства;

$\text{П.ФР}_{\text{ін.як}} = 0$, нейтральний варіант фінансового розвитку підприємства;

$\text{П.ФР}_{\text{ін.як}} < 0$, негативний варіант фінансового розвитку підприємства (при інших рівних умовах).

У тих ситуаціях, коли на формування рівня вартості капіталу підприємства впливає також достатньо суттєво зовнішній, незалежний чинник, тобто коли вартість капіталу визначається не тільки в системі «підприємство-позичальник капіталу (фінансових ресурсів) – кредитор», а саме не тільки ефективністю роботи фінансових менеджерів, з одного боку, і фахівців з кредитування (інвестування), з іншого боку, а і в певні моменти часу зовнішнім, незалежним вектором впливу (різним за походженням), потрібно показник інноваційно-якісної складової фінансового результату підприємства коригувати за допомогою певного коефіцієнту (K_k), який забезпечить з допустимим рівнем об'єктивності нейтралізацію впливу зовнішнього чинника:

$$\text{П.ФР}_{\text{ін.як}} = \text{Пл}_{(t-1)} - \text{Пл}_t \cdot (K_{(t-1)} / K_t \cdot K_k).$$

Розрахуємо величину інноваційно-якісної складової фінансового результату підприємства для гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) Кривбасу (табл.).

Таблиця

Показники П.ФР_{ін.як} для ГЗК Кривбасу

Показник	Північний ГЗК			Центральний ГЗК			Південний ГЗК		
	2018	2019	2020	2018	2019	2020	2018	2019	2020
Середньозважена вартість капіталу, %	2,39	0,00	13,32	0,00	20,52	8,56	0,00	0,00	0,00
Капітал, млн грн	56367	66369	61377	15644	17604	17998	13143	14976	37489
П.ФР _{ін.як}	-2,02	2,39	-14,40	0,00	-18,24	12,15	0,00	0,00	0,00

Із даних таблиці видно, що рівень П.ФР_{ін.як} для Північного ГЗК був негативним в 2018 і 2020 роках, а для Центрального ГЗК таким роком був 2019. Для Південного ГЗК величина інноваційно-якісної складової фінансового результату для всіх трьох років взагалі дорівнювала нулю.

Така ситуація на ГЗК Кривбасу свідчить про те, що існували проблеми в системі кредитування на макрорівні, в стані й умовах загального економічного розвитку та в політиці забезпечення ефективної фінансової діяльності на підприємствах (внутрішні і зовнішні чинники).

Висновок та напрямок подальших досліджень. Таким чином, у роботі зроблено спробу розмежувати поняття фінансові й економічні результати підприємства та конкретизувати їх за змістом і методом розрахунку (за показниками); надано визначення поняттю «фінансовий результат підприємства»; ув'язано зміст поняття «фінансовий результат» зі специфікою фінансової діяльності підприємства у відповідності до національних стандартів бухгалтерського обліку; запропоновано методику розрахунку величини фінансового результату на інноваційно-якісній основі.

Список літератури

1. Турило А.М., Турило А.А., Короленко Р.В., Короленко С.М. Фінансово-економічний та інноваційно-інвестиційний потенціал в аспекті стратегії розвитку підприємства. *Вісник Криворізького національного університету*. 2022. № 55. С. 109-114.

2. Турило А.М., Адаменко М.В. Фінансовий менеджмент у схемах і таблицях: навч. посіб. Кривий Ріг: КТУ, 2012. 285 с.
3. Турило А.М., Турило А.А. Менеджмент розвитку: фінансово-економічні аспекти, ефективність, особливості оцінювання, проблеми економічного балансу: навч. посіб. Кривий Ріг: КНУ, 2023. 125 с.
4. Турило А.М., Турило А.А. Нова концепція ефективності: навч. посіб. Кривий Ріг: вид-во Р. Козлов, 2021. 132 с.
5. Турило А.М., Турило А.А. Цінність людини і людський капітал – фундаментальні чинники фінансово-економічного розвитку суб'єктів господарювання: навч. посіб. Кривий Ріг: КНУ, 2022. 140 с.
6. Турило А.М., Зінченко О.А. Аналітично – графічний підхід до вимірювання якості прибутку підприємства. *Економіка промисловості*. Донецьк, 2009. №4(47). С.171-175.
7. Турило А.М., Зінченко О.А. Якість прибутку підприємства: сутність і оцінка: моногр. Кривий Ріг: Етюд-Сервіс, 2009. 125 с.
8. Ганечко І.Г., Ситник Г.В., Андрієць В.С., Новікова Н.М. Фінансовий менеджмент: навч. посіб. К.: Київ. нац. торг.-екон. ун-т, 2015. 244 с.
9. Фінансовий менеджмент: підруч. / за заг. ред. А.М. Поддєрьогіна. К.: КНЕУ, 2017. 534 с.
10. Шелудько В.М. Фінансовий менеджмент: підруч. К.: Знання, 2013. 375 с.

УДК 658.562:622.012

Н.Ю. ШВАГЕР*, д-р техн. наук, проф., О. В. НЕСТЕРЕНКО, канд. техн. наук, доц.,
Ю. С. ПЕРЧУН, магістр, Криворізький національний університет
Н.В. БАГАШОВА, канд. геол. наук, доц., Державний університет економіки і технологій

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРОБНИЧОГО КОНТРОЛЮ НА ГІРНИЧОДОБУВНИХ ПІДПРИЄМСТВАХ

Мета. Метою даної статті є дослідження структури ризику та його вплив на ефективність виробничого контролю на гірничодобувному підприємстві для розробки організаційних методів, реалізація яких дозволить скоротити ризик травмування та підвищити результативність роботи персоналу.

Методи дослідження. У статті використано загальнонаукові методи дослідження. За основу при проведенні дослідження було покладено системний підхід. Проаналізовано показники, що характеризують ефективність заходів з охорони праці для забезпечення допустимої тяжкості праці. Структурування ризику травмування працівників гірничодобувного підприємства за даною ознакою дозволяє встановити три види ризику травмування операційного персоналу. Встановлено характерні ризики для гірничодобувних підприємств, що виникають у технічній, технологічній, організаційній, управлінській та економічній системах. Для усунення ризиків, обумовлених недоліками організаційної системи підприємства, необхідно застосовувати методи, що ґрунтуються на системних рішеннях.

Наукова новизна. Можна стверджувати, що управління ризиками вимагає диференційованого підходу, оскільки методи організації та здійснення виробничого контролю підприємства достатні для роботи з фоновим ризиком травмування та доданим індивідуальним ризиком, і недостатні для роботи з доданим ризиком.

Практична значимість. Оскільки система виробничого контролю націлена на дотримання вимог промислової безпеки та охорони праці та об'єктом її контролю є порушення вимог безпеки, то для підвищення ефективності системи виробничого контролю запропоновано класифікація ризику травмування працівників.

Результати. Проведено аналіз причин травмування операційного персоналу. Встановлено, що методи здійснення виробничого контролю достатні для роботи з фоновим ризиком травмування та доданим ризиком, зумовленим порушеннями через низьку кваліфікацію та дисципліну працівника, і недостатні для роботи з доданим ризиком, обумовленим порушеннями вимог безпеки через системні дефекти. Необхідно застосування диференційованого підходу до ризику травмування операційного персоналу для підвищення результативності системи виробничого контролю гірничодобувного підприємства.

Ключові слова: виробничий травматизм, аналіз, контроль, безпека праці, ризик, порушення, контроль.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-67-73

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами. Дослідження показують, що результати роботи фахівців гірничодобувних підприємств у галузі охорони праці та промислової безпеки не дозволяють забезпечувати необхідний рівень безпеки виробництва. Це підтверджується великою кількістю порушень вимог безпеки, що виявляються під час проведення гірничих робіт, яке на окремих підприємствах може досягати понад 1500 на місяць. Такий стан охорони праці та промислової безпеки обумовлює високий рівень виробничого ризику (до нього належать ризики травм, аварій, інцидентів, зупинок), знижує рівень безпеки, ускладнює

нарощування ефективності виробництва, оскільки кількість зупинок виробництва в компанії через порушення вимог безпеки може перевищувати 70-100 на рік.

Завдання скорочення кількості порушень вимог охорони праці було і залишається актуальним для гірничодобувних підприємств. Існуючі методики зниження виробничого ризику не передбачають дій щодо зменшення кількості порушень вимог безпеки, які значною мірою зумовлюють виробничий ризик: традиційно вважається, що вимоги безпеки повинні виконуватись безумовно. Проте сформована науково-методична база з управління ризиками, і насамперед та її частина, яка ґрунтується на організаційних способах, дозволяє розробити підходи до зменшення кількості порушень вимог безпеки. Однак результати не можуть вважатися задовільними. Однією з причин є відсутність об'єктивної оцінки результативності діяльності підприємства щодо забезпечення безпечних умов праці, яка неможлива без достовірних критеріїв. Тому, в першу чергу, керівники підприємств та виробничих ділянок потребують критеріїв, що дозволять оцінювати результативність їх роботи в цьому напрямку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання управління ризиками виникнення травм та аварій на підприємствах гірничодобувної, вугільної та інших галузей промисловості розглянуто в роботах багатьох авторів [1-3]. Вплив шкідливих факторів робочого середовища та трудового процесу зумовлює виникнення характерних для багатьох сфер діяльності професійних та професійно-обумовлених захворювань, у тому числа онкологічних та алергічних захворювань, захворювань опорно-рухового апарату [4, 5]. Гірничодобувні підрозділи ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» характеризується не лише підвищеною професійною захворюваністю, а й підвищеним травматизмом. Із загальної кількості всіх нещасних випадків 75% обумовлені типовими причинами організаційного характеру, до яких належать: незадовільна організація виконання робіт; порушення вимог техніки безпеки; недоліки у навчанні працівників; порушення трудової дисципліни (табл. 1).

Таблиця 1

Динаміка травматизму по рокам в період з 01.01.2016 р. по 01.01.2020 р

Рік	Нещасні випадки		K_c	K_m	Середньосписочна кількість працюючих, N	Кількість днів непрацездатності через нещасні випадки, D
	число, T	абсолютна кількість, S , %				
2016	10	37,04	6,1	50	1640	500
2017	6	22,22	3,61	80	1660	480
2018	4	14,82	2,56	82,5	1560	330
2019	6	22,22	3,53	50	1700	300
2020	1	3,7	0,58	12	1720	12
Всього	27	100%				

Основними причинами високої питомої ваги робочих місць, які не відповідають санітарно-гігієнічним нормам, є: планування заходів щодо охорони праці (ОП) без урахування особливостей конкретної ділянки підприємства; відсутність динамічного регулювання в управлінні ОП, що враховує специфіку та ефективність застосування заходів щодо ОП; скорочення робіт з реконструкції та технічного переозброєння виробництв; низькі рівні механізації технологічних процесів; недостатнє фінансування розробок щодо створення нової техніки, скорочення закупівель нових сучасних безпечних виробничих технологій та техніки; зменшення кількості капітальних та профілактичних ремонтів будівель, споруд, машин та механізмів; недостатня відповідальність роботодавців та керівників виробництв за стан умов та ОП, зниження рівня безпеки виконання робіт; недостатній рівень навчання та контролю знань з ОП. Високий відсоток працівників у гірничодобувній галузі з незадовільними умовами праці обумовлений: підвищеною запиленістю та загазованістю повітря робочої зони; високим відсотком ручної праці (до 50%); зносом технологічного устаткування (до 50-65%); підвищеними рівнями звуку на робочих місцях (перевищення до 10-20 дБа); з підвищеною температурою повітря (на 5-10 °С вище нормативної); низьким рівнем механізації трудомістких технологічних процесів (35-50%) [6, 7].

Оскільки приведення умов праці до нормативних рівнів вимагає значних обсягів фінансових витрат, досягнення основних цілей ОП залежить від ефективності розподілу існуючих фінансових ресурсів. Незважаючи на збільшення витрат на ОП, кількість робочих місць із незадовільними умовами праці не знизилася [8,9].

Зростання витрат на покращення умов і ОП виявилося неефективним, вони не призвели до зниження питомої ваги робочих місць із шкідливими умовами праці та, більше того, показники профзахворювань та травматизму залишилися високими. Дана ситуація відображає те, що збільшення витрат без належного обґрунтованого вибору заходів ОП (і відповідного фінансового розподілу) не призводить до зміни кількості та якості заходів щодо ОП. Баланс витрат та витрат, пов'язаних з охороною праці, говорить про нераціональне витрачання фінансових ресурсів підприємств, що веде, зрештою, до зниження продуктивності праці та великих втрат трудових ресурсів через нещасні випадки.

Спираючись на причини поганого стану ОП у гірничодобувній галузі та, зокрема, на високу тяжкість праці можна виділити основні напрямки вдосконалення:

- збільшення раціонального фінансування заходів щодо ОП;
- розробка нових шляхів модернізації, механізації та автоматизації технологічних процесів та відповідне прискорення темпів розвитку;
- підвищення ефективності управління охороною праці.

Збільшення фінансування заходів щодо ОП не дасть позитивного результату, доки не буде обґрунтованого вибору плану заходів щодо ОП, оскільки несистемна робота щодо поліпшення умов праці не приносить належних результатів.

Постановка завдання. Метою даної статті є дослідження структури ризику та його вплив на ефективність виробничого контролю на гірничодобувному підприємстві для розробки організаційних методів, реалізація яких дозволить скоротити ризик травмування та підвищити результативність роботи персоналу.

Викладення матеріалу та результати. Сучасні системи управління охороною праці засновані на проактивному підході до управління, що передбачає використання показників ризику з метою оцінки їх стану. Різноманітні показники професійного ризику відображають ті чи інші особливості взаємодії системи людина – виробниче середовище [10].

У сфері забезпечення безпеки термін ризик має два формулювання:

ризик визначається як комбінація ймовірності події та її наслідків (під подією розуміється травма, професійне захворювання, аварія і т.д.);

професійний ризик у трудовому законодавстві визначено як ймовірність пошкодження (втрати) здоров'я або смерті застрахованого, що пов'язана з виконанням ним обов'язків за трудовим договором та в інших встановлених законодавством випадках.

Кількісні показники професійного ризику розраховуються за низкою методик, що використовують математичні моделі, у своїй основі містять вихідні дані, отримані за результатами: оцінки умов праці, моделювання фізіологічних процесів в організмі людини або статистичного аналізу.

Показники професійного ризику є виразом мети охорони праці, досягнення якої відбувається під час виконання заходів певної ефективності.

Оскільки заходи щодо ОП повинні забезпечувати підтримку задовільного стану здоров'я працівників, задовільну організацію робіт та підвищення рівня технологічного розвитку підприємства, то весь комплекс заходів можна умовно розбити на організаційні, лікувально-профілактичні та технологічні заходи.

Кожному напрямку можна поставити у відповідність показник, що характеризує ефективність заходів ОП із забезпечення допустимої тяжкості праці:

- показник ефективності організаційних заходів щодо охорони праці;
- показник ефективності лікувально-профілактичних заходів;
- показник ефективності (безпеки) використовуваних технологічних рішень для підприємства.

Основною метою управління ОП гірничодобувних підприємств є організація умов праці, що відповідають нормативним вимогам У ризикорієнтованому підході до управління ОП нормативним умовам праці відповідає значення прийнятного ризику, який характеризує прийнятний для суспільства рівень ймовірності виникнення нещасних випадків та професійних захворювань під час перебігу трудового стажу. Поняття прийнятного за тяжкістю праці ризику корелюється з принципами завдання гранично допустимих рівнів, які при 8 годинному робочому дні, крім вихідних днів, (або за іншої тривалості, але не більше 40 год/тиж.) протягом всього стажу не викликають прояви професійних хвороб або відхилень у стані здоров'я [11].

Таким чином, ефективними щодо зниження тяжкості праці будуть заходи щодо ОП, що забезпечують неперевикнення прийнятного значення професійного ризику протягом виробничого стажу до досягнення пенсійного віку.

При накопиченні професійного ризику щорічне збільшення ризику має бути таким, щоб за період стажу від початку трудової діяльності працівника до виходу на пенсію накопичений ризик не перевищував прийнятного значення. На підприємстві не всі застосовувані технології можуть це забезпечити. Так як частка ручної праці висока, тяжкість праці відноситься до факторів підвищеного ризику та визначення безпечного стажу роботи в умовах підвищеної тяжкості праці особливо актуально[12].

Таким чином, за критерієм ефективності ОП можна виділити три складові: збільшення та значення прийнятного професійного ризику, та період накопичення до прийнятних значень ризику (визначається як безпечний стаж).

Ризики, що існують на підприємстві, мають різні джерела виникнення, що враховують існуючі класифікації ризиків промислових підприємств. Для гірничодобувних підприємств характерні ризики, що виникають у технічній, технологічній, організаційній, управлінській та економічній системах. Оскільки система виробничого контролю націлена на дотримання вимог промислової безпеки та охорони праці та об'єктом її контролю є порушення вимог безпеки, то для підвищення ефективності системи виробничого контролю пропонується класифікація ризику травмування працівників. Класифікаційною ознакою є наявність на підприємстві порушень вимог безпеки як джерела виникнення ризику травмування операційного персоналу. Структурування ризику травмування працівників гірничодобувного підприємства за даною ознакою дозволяє встановити три види ризику травмування операційного персоналу.

Фоновий (природний) ризик обумовлений конкретними гірничо-геологічними умовами відпрацювання родовищ, способом видобутку корисних копалин, рівнем розвитку гірничо-шахтного обладнання, технології ведення гірничих робіт, організації виробництва, а також засобів колективного та індивідуального захисту. Як правило, підприємство не може цей ризик усунути чи знизити, оскільки він відповідає економічному, техніко-технологічному, організаційному рівню розвитку суспільства загалом.

Доданий ризик обумовлений наявністю порушень (невиконанням або неналежним виконанням) вимог безпеки, що допускаються персоналом підприємства. Порушення вимог безпеки доцільно поділити на дві категорії - виниклі внаслідок низької кваліфікації та дисципліни працівників (доданий індивідуальний ризик) і внаслідок невідповідностей організаційної системи гірничодобувного підприємства зовнішнім та внутрішнім умовам його функціонування, тобто дефектів системи (доданий системний) ризик).

Джерела фоновому ризику більш різноманітні, ніж джерела доданого ризику, який обумовлений наявністю порушень вимог безпеки. Отже, кожен із видів ризику травмування потребує власних методів зниження.

Аналіз показав, що фоновий ризик обумовлює виникнення малої кількості негативних подій (травм). У порівнянних умовах, при однаковому рівні фоновому ризику вітчизняних та зарубіжних гірничодобувних підприємств, функціонування вітчизняних підприємств супроводжується великою кількістю порушень вимог безпеки. Значна кількість порушень на вітчизняних підприємствах призводить до того, що доданий індивідуальний ризик у 1,5-2,0 рази, а доданий системний ризик у 35-70 разів перевищує аналогічний показник кращих зарубіжних компаній.

Підвищений порівняно з кращими закордонними підприємствами і компаніями рівень ризику травмування працівників вітчизняних гірничодобувних підприємств пояснюється наявністю порушень, що відтворюються. Їхня частка у загальній кількості порушень підприємства становить 50-70%. Під відтворюваними розуміються порушення, які виникають повторно після їх усунення протягом невеликого періоду часу. Це явище обумовлено невідповідностями (недоліками, дефектами) в організаційній системі підприємств

Основними дефектами організаційної системи є:

ставлення до безпеки персоналу всіх рівнів управління шахтою як до необов'язкової умови виконання робіт;

низька мотивація персоналу до безпечної праці через відсутність адекватних критеріїв ефективності роботи в даній галузі та механізму стимулювання;

нераціональна організація робіт, що проявляється у зміні через нестачу робітників при укомплектованості штату, нераціональній розстановці працівників, невчасному постачанні матеріалів.

Ці системні дефекти зумовлюють підвищення рівня ризику травмування операційного персоналу підприємства.

Аналіз актів розслідування нещасних випадків та порушень, виявлених на шахтах ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», дозволив сформувати принципову схему впливу порушень підвищення рівня ризику травмування (рис. 1) [6, 11].

Порушення, що відтворюються, характеризуються високою частотою виникнення і терміном усунення, що перевищує запропонований. Тому доданий системний ризик, зумовлений цими порушеннями, існує протягом тривалого часу. Це призводить до того, що робота з порушеннями вимог безпеки стає нормою поведінки, сприймається персоналом як штатний режим роботи. Внаслідок цього зростає і частка доданого індивідуального ризику, що має поведінкову природу.

У межах роботи системи виробничого контролю вітчизняних гірничодобувних підприємств застосовуються однакові методи виявлення, контролю та усунення (зниження) ризику травмування, при цьому джерело його виникнення не враховується. Такий підхід дозволяє керувати фоновим ризиком і, менш ефективно, доданим індивідуальним ризиком.

Рис. 1. Схема формування фактичного рівня ризику травмування

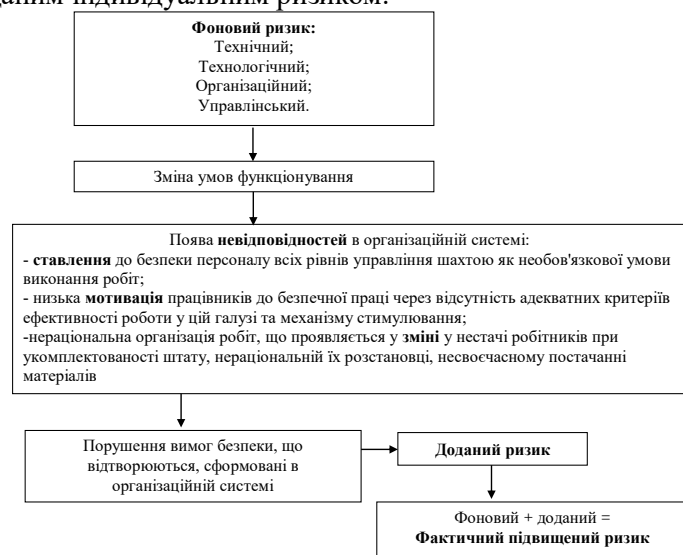
Робота з фоновим ризиком полягає у недопущенні порушень за допомогою застосування результатів науково-технічного прогресу та новітніх парадигм у галузі економіки, організації, управління в роботі підприємств та компаній. При роботі з доданим індивідуальним ризиком, зумовленим поведінкою персоналу, для усунення порушень необхідно відбудувати чітку систему їх виявлення: контроль (моніторинг), навчання персоналу стандартним прийомам безпечної праці, правилам поведінки, а також забезпечення його мотивації до безпечної праці.

Щодо доданого системного ризику слід зазначити, що з роботи з ним необхідно усунути невідповідності в організаційній системі підприємства, що призводять до виникнення безпосередніх причин порушень. Потім здійснюються вибір та обґрунтування способу усунення невідповідності в організаційній системі підприємства.

Така робота на гірничодобувних підприємствах на сьогоднішній день не ведеться. У рамках здійснення виробничого контролю методи роботи з несистемними порушеннями вимог безпеки (джерело виникнення - поведінка працівників) застосовуються і для усунення порушень, що відтворюються (формується в організаційній системі).

Тому замість усунення невідповідності в організаційній системі (дефекту) усувається власне порушення, і згодом усунене порушення відтворюється, виникає знову.

Усунення порушень є способом зниження ризику травмування працівників. Однак без зміни системи роботи підприємства (змін в організаційній системі) неможливо усунути порушення, що відтворюються. При сьогоднішньому рівні організації виробництва можливе лише недопущення порушень (наприклад, відмова працівника виконувати виробничі завдання в небезпечних умовах) або робота з порушеннями (для гарантованого виконання виробничого завдання). Тобто без системних змін кількість порушень вимог безпеки збережеться, а недопущення порушень шляхом відмов призведе до зниження продуктивності праці. Для усунення ризиків, обумовлених недоліками організаційної системи підприємства, необхідно застосовувати методи, що ґрунтуються на системних рішеннях. Однак розробка цих методів не повною мірою відповідає компетенції учасників системи виробничого контролю підприємства, що потребує відповідного науково-методичного забезпечення. Можна стверджувати, що управління ризиками вимагає



диференційованого підходу, оскільки методи організації та здійснення виробничого контролю підприємства достатні для роботи з фоновим ризиком травмування та доданим індивідуальним ризиком, і недостатні для роботи з доданим ризиком [6].

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналіз причин травмування операційного персоналу показав, що підвищений ризик травмування обумовлений високою часткою доданого системного ризику, що характеризується наявністю порушень вимог безпеки, що відтворюються, - їх частка становить 50-70% від загальної кількості виявлених порушень.

Виникнення порушень вимог безпеки, що відтворюються, закономірно, оскільки є наслідком дефектів в організації виробництва. Основними дефектами є:

ставлення до безпеки на всіх рівнях управління шахтою як до необов'язкової умови виконання робіт;

низька мотивація персоналу до безпечної праці через відсутність адекватних критеріїв ефективності роботи в даній галузі та механізму стимулювання;

нераціональна організація робіт, що виявляється у зміні через недокомплект штату, нераціональну розстановку працівників, невчасне постачання матеріалів.

Для усунення систематичних порушень потрібне усунення цих дефектів організаційної системи.

Встановлено, що методи здійснення виробничого контролю достатні для роботи з фоновим ризиком травмування та доданим ризиком, зумовленим порушеннями через низьку кваліфікацію та дисципліну працівника, і недостатні для роботи з доданим ризиком, обумовленим порушеннями вимог безпеки через системні дефекти. Необхідно застосування диференційованого підходу до ризику травмування операційного персоналу для підвищення результативності системи виробничого контролю гірничодобувного підприємства.

Його застосування забезпечить зменшення частки порушень, що відтворюються, в загальній кількості порушень вимог безпеки і тим самим підвищить ефективність системи виробничого контролю [6].

Список літератури

1. Гогунський В.Д. Управління ризиками в проектах з охорони праці як метод усунення шкідливих і небезпечних умов праці // **В.Д. Гогунський, Ю.С. Чернега** // Восточноевропейский журнал передовых технологий. – 2013. - № 1/10 (61). - С. 79 – 82.
2. **Бочковський А. П.** «Людський фактор» та ризик виникнення небезпек: випадковість чи закономірність : монографія / **А. П. Бочковський**. - Одеса : Юрид. літ., 2015. - 132 с.
3. **Кружилко О. Є.** Алгоритм вибору методів та визначення результативності оцінки ризику / **О. Є. Кружилко, О. В. Богданова** // Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Екологічна безпека. – Кременчук: КрНУ, 2016. – Вип. 2 (97), част. 1. – С. 76–81.
4. ДСТУ OHSAS 18001:2010 Системи управління гігієною і безпекою труда. Требования (OHSAS 18001:2007, IDT) http://online.budstandart.com/ru/catalog/doc-page?id_doc=27641.
5. **Нагорна А. М.** Оцінка ризику розвитку професійних захворювань у працівників металургійної, вугільної промисловості та машинобудування України / **А.М. Нагорна, П. М Вітте, М. П Соколова, І. Г Кононова, О. З Орехова, В. В Мазур** // Український журнал з проблем медицини праці. 2012. № 3(31). С. 3–13.
6. Безпека та гігієна праці у гірничодобувній галузі та вугільній промисловості в Україні / Міжнародна організація праці; Група технічної підтримки з питань гідної праці та Бюро МОП для країн Центральної та Східної Європи. – Київ: МОП, 2018 р.
7. **Швагер Н.Ю.** Аналіз професійної захворюваності на гірничодобувних підприємствах Кривбасу / **Н.Ю.Швагер, Д.В. Заїкіна** // Гірничий вісник : зб. наук. праць. – Кривий Ріг: КНУ, 2018. – Вип.46. – С.99-104
8. **Водяник А.О.** Особливості обґрунтування соціально-економічних нормативів охорони праці / **А.О. Водяник, Н. І. Данило** // Проблеми охорони праці в Україні. - 1999. - Вип. 2. - С. 28-36.
8. **Ткачук С. П.** Методи визначення загальної суми вкладень у профілактику виробничого травматизму / **С. П. Ткачук, А. О. Водяник** // Проблеми охорони праці в Україні. - 1999. - Вип. 2. - С. 12-27.
9. ДСТУ ISO 31000:2018. Менеджмент ризиків. Принципи та настанови; Введ. 2019-01-01. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. - 32с
10. **Гандзюк М. П., Желібо Є. П., Халімовський М. О.** Основи охорони праці: підручник. За ред. М. П. Гандзюка. 5-е вид. К. : Каравела, 2011. 384 с.
11. ISO 31000:2019 Risk management - Risk assessment techniques. [online] URL: <https://webstore.iec.ch/publication/59809.pdf> - P. 264.

А.М. ТУРИЛО, А.А. ТУРИЛО, доктори екон. наук, професори,
Р.В. КОРОЛЕНКО, С.М. КОРОЛЕНКО, кандидати екон. наук, доценти
Криворізький національний університет

МЕТОДОЛОГІЯ КОМПЛЕКСНОГО ОЦІНЮВАННЯ ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ І ЙОГО ФІНАНСОВО-ЕКОНОМІЧНИЙ АСПЕКТ НА ПРИКЛАДІ ПІДПРИЄМСТВ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ПРОФІЛЮ

Мета. Метою є удосконалення методології комплексного оцінювання інновацій, інноваційних заходів та інноваційного розвитку в цілому з врахуванням їх впливу на фінансово-економічні аспекти розвитку будь-якого суб'єкта господарювання (підприємства) і здійснити таку оцінку за окремими показниками на прикладі підприємств гірничо-збагачувального профілю.

Методи дослідження. Результати і наукові положення, наведені у статті отримані з використанням певних методів (різних за напрямом і масштабом охоплення предмету дослідження): узагальнення результатів попередніх досліджень, комплексного аналізу та синтезу, логіко-структурного й логіко-динамічного аналізу, науково-аналітичний, порівняння й аналогії тощо.

Наукова новизна. Виявлено недосконалість існуючих в економічній літературі підходів до оцінювання інновацій та інноваційного розвитку, як явища на рівні суб'єкта господарювання і запропоновано з цього приводу сукупність показників і критеріїв, які відрізняються комплексністю та системністю, мають пріоритетність в оцінюванні процесу інноватизації та дозволяють класифікувати інноваційний розвиток підприємств за типами.

Практична значимість. Представлена авторами методологія оцінювання інноваційного розвитку є універсальною і може бути прийнята до використання будь-яким суб'єктом господарювання.

Запропонована система показників і критеріїв оцінки інноваційного розвитку є достатньо простою, і в той же час достатньо ефективною, для практичного використання в загальній оцінці діяльності суб'єкта господарювання.

Запропонована система оцінки інноваційного розвитку суб'єкта господарювання може бути легко адаптована в систему планування й управління суб'єктом господарювання.

Результати. Визначено підходи і розроблено комплексну систему показників і критеріїв щодо комплексного оцінювання інновацій, інноваційних заходів й інноваційного розвитку будь-якого суб'єкта господарювання, які відображають головні характеристики інновацій. За критеріальний показник для класифікації типів інноваційного розвитку підприємства рекомендується показник «питома вага інноваційних чинників у розвитку підприємства».

Ключові слова: оцінка, інновації, інноваційний розвиток, показники, типи інноваційного розвитку, суб'єкти господарювання, комплексне оцінювання.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-73-78

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. У сучасних умовах розвитку суспільства інновації стають його фундаментом, чинником ефективності та прогресу. Суспільство й інновації, суб'єкт господарювання й інновації, людина й інновації аксіоматично є невід'ємними речами.

Інновації всюди і в різноманітних проявах матеріального й нематеріального характеру.

Вся історія розвитку людства пронизана інноваціями і має свою історичну хронологію і термінологію (сукупність різних термінів до появи безпосередньо терміну «інновація»).

Інновації та їх значимість для суспільного розвитку дали поштовх до трансформації терміну «інновація» в інші важливі терміни та поняття такі, як «інноваційний розвиток», «інноваційна діяльність», «інноваційний процес», «інноваційний проєкт», «інноваційний менеджмент», «інноваційний кластер», «інноватизація», «інноватика», «інноватор», «інноваційність», «інноваційний чинник», «інноваційна економіка» тощо.

Потрібно відмітити в цьому аспекті, що виключно важлива роль інновації полягає в тому, що інноваційний розвиток є об'єктивним законом; не розуміти, не враховувати, а тим більше ігнорувати його дію, це значить суттєво гальмувати розвиток і мати негативні наслідки різного масштабу для будь-якого суб'єкта господарювання.

Звідсіля важливість і об'єктивність проблеми оцінки та управління інноваційним розвитком на різних рівнях господарювання.

Аналіз досліджень і публікацій. У літературі існують певні підходи до оцінки інноваційного розвитку на рівні підприємства [1-12 та ін.].

Разом з тим, на наш погляд, існує потреба в процесі комплексного оцінювання інновацій та інноваційного розвитку підприємства.

Постановка задачі. Розробити комплексну оцінку інноваційного розвитку суб'єкта господарювання.

Викладення матеріалу та результати. Авторський підхід до оцінки інновацій та інноваційного розвитку підприємства полягає в наступному.

Інноваційний розвиток підприємства розглядаємо як перманентний і об'єктивно необхідний процес пошуку і впровадження інновацій (різних за змістом і силою впливу) в обгрунтовано визначені стадії і сфери розвитку підприємства.

Діалектичність розвитку і принципи комплексності, адекватності, обгрунтованості тощо є методологічною основою до того, що всі інновації можна розділити і класифікувати за певними критеріями.

У залежності від суб'єктивного підходу можна сформулювати різні класифікації інновацій.

У даній роботі для класифікації інновацій пропонуються такі критерії:

технічний критерій. Це означає, що в основу визначення інновації покладено тільки технічний критерій, коли та чи інша інновація оцінюється за вибраним певним технічним параметром (або групою логічно і цільно поєднаних технічних параметрів (показників)). Технічний критерій інноваційності може бути використаний з певним рівнем модифікації до будь-якого виду техніки, предмету, технології виробництва, розвитку підприємства тощо;

організаційний критерій. Це означає, що в основу визначення інновації або інноваційного розвитку покладено тільки організаційний критерій. Він стосується організаційного розвитку підприємства, сфери організації виробництва і праці – і теж при потребі може бути модифікованим;

аналогічним чином ми розглядаємо і всі інші види критеріїв стосовно класифікації інновацій та інноваційного розвитку: соціальний, економічний, управлінський, екологічний, інформаційно-комунікаційний тощо.

Критерії інновації визначаються в залежності від мети дослідження і предмета оцінки.

Кожен вид критерію може бути агрегованим і мати необхідну сукупність підвидів для того, щоб більш деталізовано і предметно дослідити і оцінити вибрану сферу діяльності.

Зрозуміло, що всі критерії стосовно визначення інновації саме інновацією важливі, бо без них не обійтись при дослідженні різних сфер і видів діяльності підприємства і вони відіграють свою важливу роль.

Для суспільства, як і для підприємства на певних етапах розвитку і за відповідних обставин пріоритетність критерію може бути різною. Все визначає значимість сфери і напряму діяльності та існування суспільства, галузі чи підприємства.

Для підприємства, як підприємницької структури, головним і визначальним критерієм інноваційності виступає економічний критерій (тут економічний критерій характеризується як всеузагальнююча категорія).

Це означає, що в ринковій економіці підприємство функціонує і розвивається по ринковим законам, і саме вони визначають економічний критерій головним при оцінці всіх видів інновацій (по одиниці і в їх єдності) в його діяльності.

Наприклад, якщо якийсь вид обладнання, технології, сировини, матеріалу тощо за технічним критерієм є інновацією, а за економічним критерієм ні (тобто така інновація приносить в підсумку підприємству певний економічний збиток), то така технічна інновація за економічним змістом фактично не є інновацією. Тобто економічний критерій – це головний критерій-контроль на підприємстві для всіх видів інновацій, окрім тих випадків, коли, наприклад, законодавчо визначено інше. Так, для гірничорудних і металургійних підприємств країни можуть бути чіткі директиви і пріоритети в питаннях екології тощо.

Далі перейдемо до класифікації і системи показників, що характеризують інновації та інноваційний розвиток. Спочатку наголосимо на тому, що термін «показник» походить від слова «показувати» (це авторське бачення):

показники, що показують кількість інновацій (всіх видів), які впроваджені на підприємстві в цілому і в окремих його підрозділах (цех, дільниця, бригада, відділ, робоче місце) на певний момент часу чи за період, який визначено для оцінки;

показники, що показують кількість інновацій (всіх видів) за видами діяльності підприємства на певний момент часу чи за період, який визначено для оцінки;

показники, що показують питому вагу інновацій в загальній кількості заходів, які плануються чи відбулись на підприємстві (структурному підрозділі) за видом діяльності на певний момент часу чи за період, який визначено для оцінки;

показники, що показують питому вагу інноваційних чинників в кінцевих економічних результатах діяльності підприємства (обсязі реалізованої продукції, загальному прибутку підприємства, чистому прибутку підприємства). Показник «питома вага інноваційних чинників у кінцевих економічних результатах підприємства» (це всі види інноваційних заходів на підприємстві матеріального і нематеріального характеру) є ідентичним показнику «питома вага інноваційних чинників у розвитку підприємства», бо, по-перше, розвиток підприємства в ринковій економіці орієнтований на його головний кінцевий економічний результат, а саме прибуток, а, по-друге, всі зміни у всіх елементах і ресурсах підприємства в процесі його розвитку прямо або опосередковано фокусуються і здійснюються в головній меті підприємства прибутку;

показник, що показує питому вагу матеріальних і нематеріальних інновацій в загальній їх кількості на підприємстві або його структурних підрозділах на певний момент часу чи за період, який визначено для оцінки;

показники, що показують вплив інновацій, інноваційних заходів на економіку підприємства, в ракурсі окремих її аспектів, елементів, напрямів, сфер діяльності підприємства тощо;

показники, що відображають загальний (інтегральний) рівень інноваційного розвитку підприємства (ІРП). Зміст цих показників визначається за вибраним критерієм (технічним, організаційним, соціальним, економічним тощо) та визначеною методикою його розрахунку. Наприклад, такі відомі показники, як загальний технічний рівень підприємства, загальний організаційний рівень підприємства, загальний організаційно-технічний рівень підприємства можуть доволі обґрунтовано відображати загальний рівень ІРП (за такими критеріями оцінки ІРП, як технічний, організаційний та організаційно-технічний).

Існує можливість оцінки загального рівня ІРП і на основі безпосередньо інноваційного критерію, розробивши відповідний метод і одиницю вимірювання такого показника. При чому таким чином, щоб показник загального рівня ІРП за інноваційним критерієм відображав головні характеристики кожної інновації (її якість, інноваційність, значимість, прогресивність) в комплексі інновацій, які впроваджені в діяльність підприємства.

Наш підхід до формування методу розрахунку показника загального рівня ІРП за інноваційним критерієм полягає саме в цьому. Вважаємо, що головним ринковим показником, що відображає в акумульованому виді вплив інновацій (інноваційних заходів) на економіку підприємства і головну мету його створення та функціонування є інтегральний (загальний) показник ефективності підприємства.

Рівень інноваційності всіх видів впроваджуваних у розвиток підприємства заходів та рівень інноваційності в системі використання впровадженої сукупності інновацій знаходять в підсумку свою єдину оцінку в інтегральному показнику ефективності підприємства, який на відміну від всіх інших показників адекватно й обґрунтовано за змістом і ринковими вимогами відповідає інтересам власників і меті діяльності підприємства та в загальному виді фокусує в собі всі зміни на підприємстві, визвані інноваціями;

загальні (інтегральні) показники ІРП, що надають статичну і динамічну характеристику розвитку підприємства. Показники, які визначаються за методом розрахунку як моментні, на певну дату, є статичними, а показники, які обчислюються за певний період, є динамічними (інтервальними). Інтервальні (динамічні) показники ІРП розраховуються як різниця двох моментних (статичних) показників ІРП. Важливість інтервального показника ІРП полягає в тому, що він відображає зміну якості підприємства в часі.

Ефективність менеджменту ІРП також підвищиться, якщо аналізувати ІРП не за одним, а за кількома інтегральними (загальними) показниками ІРП (досягається всебічність аналізу ІРП).

Так, дуже багато корисних речей надасть аналітикам, наприклад, порівняння рівня ІРП за інтегральним показником організаційно-технічного рівня підприємства та інтегральним показником ефективності підприємства (або будь-які інші варіанти співставлення різних інтегральних показників ІРП).

Важливо також відмітити, що показники, які характеризують інновації та ІРП, є також основою до визначення типів інноваційного розвитку підприємства, що важливо в цілому для аналізу, оцінки і планування розвитку підприємства.

Авторський підхід до цього наступний. За критеріальний показник для класифікації типів інноваційного розвитку підприємства рекомендується показник «питома вага інноваційних чинників у розвитку підприємства».

Далі суб'єктивно-логічно визначаються типи ІРП. В нашому випадку вони такі:

абсолютно інноваційний розвиток підприємства (ПВін.ч. = 100%);

переважно інноваційний розвиток підприємства (ПВін.ч. > 50%);

частково інноваційний розвиток підприємства (ПВін.ч. < 50%);

безінноваційний розвиток підприємства (ПВін.ч. = 0%);

деінноваційний розвиток підприємства (ПВін.ч. < 0%).

На рисунку представлено методологію щодо оцінювання інновацій та інноваційного розвитку підприємства.

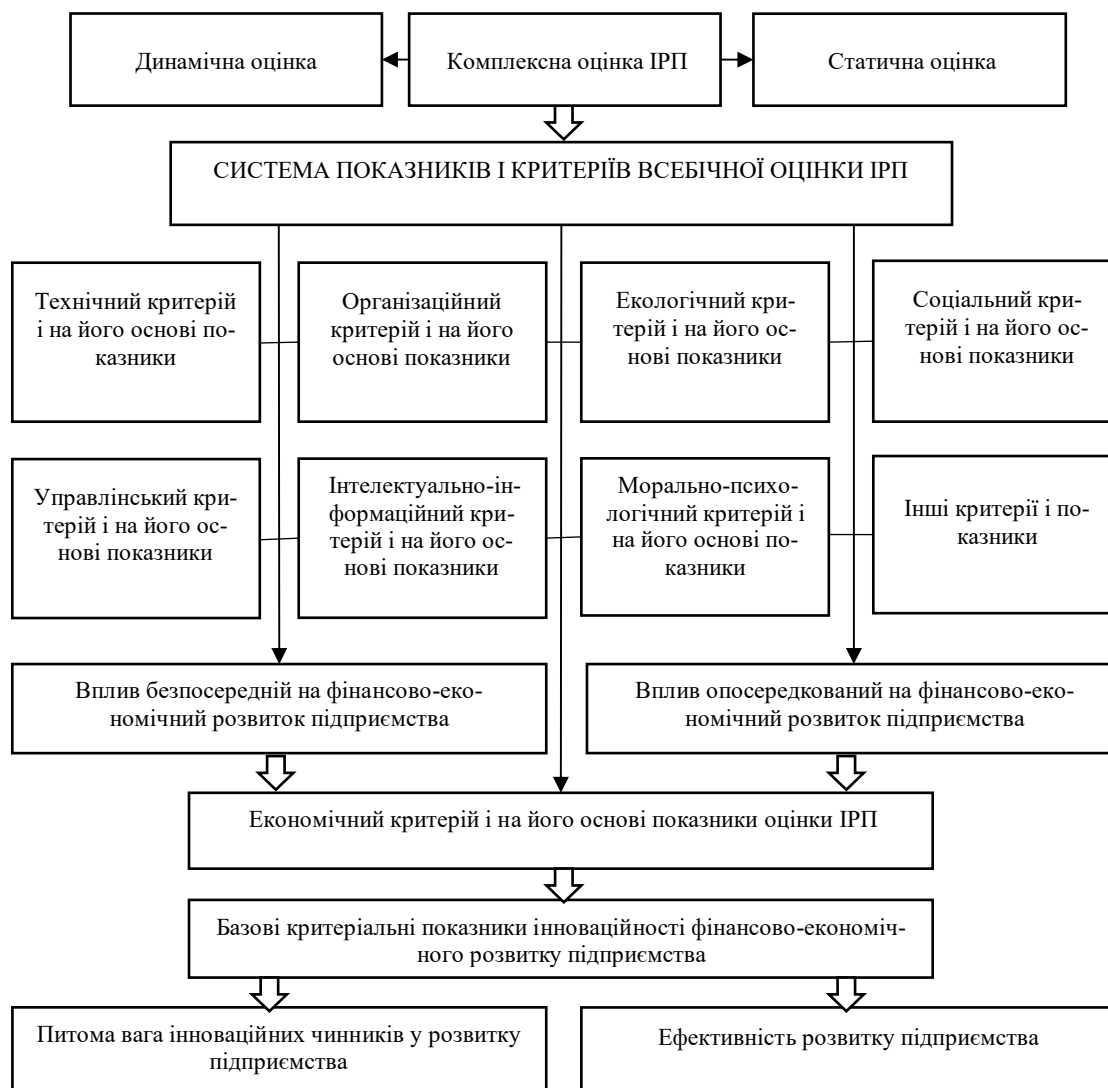


Рис. Логіка і методологія оцінювання інновацій та інноваційного розвитку підприємства

У таблиці наведено показники, що характеризують питому вагу інноваційних чинників у розвитку гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) Криворізького регіону питома вага інноваційних чинників визначається на основі показника чистого прибутку (ПВін.ч.).

Із даних таблиці видно, що єдиним підприємством де мав місце інноваційний розвиток у період 2019-2020рр. був Південний гірничо-збагачувальний комбінат (АТ «ПівдГЗК»). Питома вага інноваційних чинників у розвитку АТ «ПівдГЗК» за цей період склала 23%, що є доволі непоганим показником для тих умов господарювання, що склалися на той період. За визначеною нами класифікацією типів ІРП, такий розвиток Південного гірничо-збагачувального комбінату відноситься до частково інноваційного розвитку.

Всі інші гірничо-збагачувальні комбінати Криворізького регіону (ПРАТ «ЦГЗК», ПРАТ «ПівнГЗК», ПРАТ «ІнГЗК») мали в період 2019-2020рр. деінноваційний тип розвитку (для них питома вага інноваційних чинників має від’ємне значення). Це вказує на сукупність негативних чинників (зовнішніх і внутрішніх) в діяльності цих підприємств.

Таблиця

Питома вага інноваційних чинників у розвитку ГЗК Криворізького регіону за 2019-2020 рр.

ГЗК	Активи, млн грн		Чистий прибуток, млн грн		Відхилення чистого прибутку, млн грн	Якість прибутку, млн грн	ПВін.ч., %
	2019	2020	2019	2020			
ПРАТ «ЦГЗК»	17605	17998	1601	1473	-128	-164	-11,13
ПРАТ «ПівнГЗК»	66369	61377	7995	4341	-3654	-3053	-70,33
ПРАТ «ІнГЗК»	54329	50894	6077	1500	-4577	-4193	-279,53
АТ «ПівдГЗК»	14976	37489	8961	18237	9276	4195	23,00

Висновок та напрямок подальших досліджень. Запропонований в даній роботі підхід щодо удосконалення методології комплексного оцінювання інноваційного розвитку суб’єкта господарювання (підприємства) є оригінальним, має наукову новизну і може широко використовуватися в практичній діяльності підприємства різних галузей економіки.

Напрямом подальшого дослідження є питання деталізації запропонованої методології в аспекті технічної, організаційної, економічної, управлінської тощо оцінки інноваційного розвитку суб’єкта господарювання.

Список літератури

1. Турило А.М., Турило А.А., Короленко Р.В., Короленко С.М. Фінансово-економічний та інноваційно-інвестиційний потенціал в аспекті стратегії розвитку підприємства. *Вісник Криворізького національного університету*. 2022. № 55. С. 109-114.
2. Турило А.М., Турило А.А., Короленко Р.В. Удосконалення системи і класифікації фінансово-економічних показників, як чинник забезпечення ефективного менеджменту, обґрунтованої оцінки потенціалу та якісного розвитку підприємства. *Вісник Криворізького національного університету*. 2022. № 54. С. 16-22.
3. Турило А.А. Основи управління інноваційним розвитком підприємства : моногр. Кривий Ріг: КНУ, 2017. 307 с.
4. Турило А.М., Турило А.А. Менеджмент розвитку: фінансово-економічні аспекти, ефективність, особливості оцінювання, проблеми економічного балансу: навч. посіб. Кривий Ріг: КНУ, 2023. 125 с.
5. Турило А.М., Турило А.А. Цінність людини і людський капітал – фундаментальні чинники фінансово-економічного розвитку суб’єктів господарювання: навч. посіб. Кривий Ріг: КНУ, 2022. 140 с.
6. Турило А.М., Зінченко О.А., Нусінов В.Я. Економічна оцінка інноватизації залізничного виробництва: моногр. Кривий Ріг: КТУ, 2006. 200 с.
7. Турило А.М., Зінченко О.А. Якість прибутку підприємства: сутність і оцінка: моногр. Кривий Ріг: Етюд-Сервіс, 2009. 125 с.
8. Турило А.М., Турило А.А., Короленко Р.В. Суб’єктна інноваційність в аспекті фінансово-економічної стратегії розвитку підприємства. *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука». Економічні науки*. 2021. № 4(48). С. 97-104. <https://www.inter-nauka.com/issues/economic2021/4/7110>.
9. Гук З.Б., Лебідь Т.В., Самуляк В.Ю. Фактори і напрями інноваційного розвитку підприємств. *Вісник «Проблеми економіки управління» Національного ун-ту «Львівська політехніка»*. 2010. № 683. С. 223-228.
10. Інноваційна економіка та менеджмент інноваційно-інвестиційної діяльності : навч. посіб. / за заг. ред. В.Г. Дюжева, С.В. Суслікова. Харків : Планета-Принт, 2018. 440 с.
11. Інноваційна економіка: теоретичні та практичні аспекти: моногр. / за заг. ред. К.В. Ковтуненко, Є.І. Масленнікової. Херсон: Гринь Д.С., 2017. 906 с.
12. Микитюк П.П. Аналіз впливу інвестицій та інновацій на ефективність господарської діяльності підприємства: моногр. Тернопіль: Економічна думка, 2007. 296 с.

В. С. МОРКУН, Н. В. МОРКУН, доктори техн. наук, професори,
А. А. ГАПОНЕНКО, Є. Ю. БОБРОВ, аспіранти
Криворізький національний університет

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ГІРНИЧОГО ВИРОБНИЦТВА ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК АКУСТИЧНОЇ ЕМІСІЇ ЕНЕРГОЄМНОЇ КОНТАКТНОЇ ВЗАЄМОДІЇ

Метою дослідження є моделювання процесів гірничого виробництва, як контактної взаємодії породоруйнівного органу з середовищем, на прикладі буріння свердловин із застосуванням енергетичних характеристик технологічних агрегатів та параметрів акустичної емісії.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного моделювання та кепстрального аналізу, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні застосування кепстральної технології обробки енергетичного спектру акустичної емісії енергоємної контактної взаємодії для визначення фізико-механічних властивостей гірської породи в процесі буріння свердловин.

Практичне значення полягає у формуванні та аналізі комбінації інформативних характеристик процесу буріння свердловин для підвищення якості його моделювання та керування.

Результати. Проблема підвищення якості моделей та ефективності процесу буріння свердловин пов'язана з дослідженням методу оперативного визначення чи уточнення (бажано безпосередньо в процесі буріння) фізико-механічних властивостей гірських порід, що складають родовище, яке розробляється. Метою моделювання процесу буріння є встановлення залежності режимних параметрів бурової установки та характеристик гірської породи, які б дозволили сформувати оптимальну з точки зору витрат швидкість проходки. Важливим етапом вирішення цієї задачі є вибір і аналіз інформативних параметрів, що характеризують процес. Для моделювання енергоємної контактної взаємодії породоруйнівного органу з гірською породою при бурінні свердловин використано комплекс енергетичних характеристик процесу та акустичної емісії. Для кількісної оцінки характеристики акустичної емісії застосовується технологія кепстрального аналізу, яка базується на результатах побудови дискретних значень часового ряду вимірювань амплітуди коливань. Розрахунково-аналітична модель забезпечує визначення обмеженої кількості результуючих сплесків енергії, рознесених по осі кепстрального часу. Отриманий результат не залежить від форми акустичного сигналу, його фази та напрямів поширення у досліджуваному середовищі. Модель реалізована за допомогою адаптивної нейро-нечіткої структури ANFIS, що навчається. Наведений метод може бути використаний також для оцінки стану бурового обладнання.

Ключові слова: контактна взаємодія, буріння свердловин, енергетичні характеристики, акустична емісія, кепстр.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-78-86

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Оптимізація буріння в режимі реального часу полягає у виборі робочих параметрів, що максимізують продуктивність буріння. Зусилля оптимізації буріння часто спрямовані на підвищення швидкості буріння, зазвичай званої швидкістю проходки (ROP). Три робочі параметри буріння можуть постійно регулюватися на поверхні, щоб впливати на ROP: навантаження на долото (WOB), швидкість обертання бурильної колони (RPM) та параметр, що характеризує процес видалення продуктів руйнування [1]. У традиційному аналітичному підході до моделювання ROP негнучкі рівняння пов'язують навантаження на долото, кількість обертів за хвилину, та/або інші вимірювані параметри буріння з ROP, а коефіцієнти емпіричної моделі розраховуються для кожного шару гірської породи, щоб найкраще відповідати польовим даним [2, 3]. За останнє десятиліття вдосконалена технологія збору даних та поширена дешева обчислювальна потужність призвели до різкого збільшення застосування методів машинного навчання (ML) для прогнозування ROP. Алгоритми машинного навчання використовують статистику для виявлення взаємозв'язків між вказаними вхідними даними (ознаками/предикторами) і вихідною величиною (відгуком). Найбільшою перевагою алгоритмів ML порівняно з аналітичними моделями є їхня гнучкість у формі моделі. Без заданого рівняння моделі машинного навчання дозволяють сегментувати простір робочих параметрів буріння. Однак підвищена складність моделі знижує інтерпретованість того, як коригування вхідних даних вплине на результат. Не існує єдиної моделі ROP, яка застосовується у всіх ситуаціях [3].

Аналіз досліджень і публікацій. Фундаментальною проблемою при веденні гірничих робіт є відрив від поверхні суцільного гірського масиву окремих його фрагментів [4]. Оскільки цей процес руйнує тверду породу на шматки різних розмірів, його можна розглядати як дроблення. Тому, як і у процесах дроблення загалом, цікавить співвідношення енергії та обсягу виконаної роботи. "Питома енергія", що визначається як енергія, необхідна для вилучення одиниці об'єму породи, є корисним параметром у цьому контексті і може також розглядатися як показник механічної ефективності процесу обробки породи. У роботі [4], посилаючись на низку джерел, визначається, що значення цього показника, «мабуть, дуже приблизно корелює з міцністю на роздавлювання забурюваного середовища при обертальному, ударно-обертовому і шарошечному бурінні».

Для визначення питомої енергоємності буріння достатньо реєструвати енергію, що споживається двигуном обертача. Облік цієї енергії у певні проміжки години та на заданій глибині характеризують загальну енергоємність буріння та дозволяє судити про властивості масиву гірських порід. Повна енергоємність буріння включає витрати енергії, пов'язані з руйнуванням породи під шарошечним долотом та з подоланням теплових та механічних втрат [5].

Уточнення інформації про міцнісні та структурні особливості гірських масивів, що підлягають вибуховому руйнуванню, можливе у процесі буріння вибухових свердловин. Уточнені при бурінні дані про стан порід дозволяють підвищити достовірність інформації та забезпечити точність розрахунків при проектуванні технологічних вибухів, і, отже, раціональніше управляти витратою матеріальних ресурсів [6].

На теперішній час існує багато загальних моделей швидкості проникнення в бурінні [7-11] та ін. Модель Maurer [7] була розроблена на основі теоретичного рівняння проникнення для шарошечного долота як функції WOB , RPM , розміра долота та міцності гірської породи. Розроблене рівняння базується на таких спостереженнях, як величина углублення, яке може створити різець із врахуванням міцності породи.

Galle and Woods [8] досліджували ефект від обрання співвідношення WOB та RPM . Розроблено графіки для найкращого вибору комбінації параметрів буріння. У своїх роботах вони довели, що витрати на буріння зменшуються у разі використання їх методу.

Модель, запропонована Bourgoyne and Youngs [9], вважається однією з найбільш повних математичних моделей буріння, що застосовується в промисловості для шарошечних долот. Рівняння (1) визначає загальну лінійну швидкість проникнення, яка є функцією як керованих, так і некерованих змінних буріння

$$\frac{dF}{dt} = \exp(a_1 + \sum_{j=2}^8 a_j x_j) . \quad (1)$$

Константи, наведені в рівнянні (1) $a_1 - a_8$, визначаються за результатами множинної регресії на основі даних буріння. Вони представляють характеристики міцності пласта, ефекту ущільнення, перепадів тиску, ваги на долото, швидкості обертання, зносу зубів та гідравлічного показника [10].

Загальним недоліком існуючих моделей процесу буріння є те, що для їх застосування у виробничих умовах необхідно попередньо визначити фізико-механічні характеристики гірських порід та стан бурового обладнання (знос породоруйнівного органу та ін.) [10,11].

Таким чином, проблема підвищення якості моделей та ефективності процесу буріння свердловин пов'язана з дослідженням методу оперативного визначення (бажано безпосередньо в процесі буріння) чи уточнення фізико-механічних властивостей гірських порід, які складають родовище, яке розробляється.

Постановка завдання: моделювання процесів гірничого виробництва, як контактної взаємодії робочого органу з середовищем, на прикладі буріння свердловин із застосуванням енергетичних характеристик технологічних агрегатів та параметрів акустичної емісії.

Викладення матеріалу і результати. Метою моделювання процесу буріння є встановлення залежності режимних параметрів бурової установки та характеристик гірської породи, які б дозволили сформулювати оптимальну з погляду витрат швидкість проходки. Важливим етапом вирішення цього завдання є вибір та аналіз інформативних параметрів, що характеризують процес.

В силу того, що в процесі взаємодії породоруйнівного органу (ПРО) бурової установки з гірською породою (ГП) режимні параметри не можуть зберігати постійні значення навіть у разі збереження значень її властивостей міцності по глибині свердловини, процес буріння не є

стаціонарним і може розглядатися тільки як квазістаціонарний з присутністю елементів динаміки та перехідних процесів, обумовлених як конструктивними особливостями самої установки, так і змінами структурних та фізико-механічних властивостей порід, що визначають навантаження на ПРО [12].

При обертальному способі буріння має місце реалізація декількох механізмів взаємодії ПРО установки з ГП [13,14]:

- вдавлювання інструменту (залежить від величини межі міцності породи на стиск σ_c , МПа);
- зріз шару породи (залежить від показника міцності на зріз τ_{cp} , МПа);
- тертя інструменту об стінки свердловини (визначається величиною глибини буріння Z , м);
- видалення бурової дрібниці із вибою (нелінійно залежить від глибини свердловини L , м) та ін.

Аналіз результатів випробувань зразків гірської маси із кар'єрів Північного ГЗК показує тісний зв'язок між питомою роботою руйнування a та коефіцієнтом міцності руди f [15]:

$$a = 0,87 f - 0,0035. \quad (2)$$

Природним підходом для оцінки міцності гірської породи, як однієї з характеристичних її властивостей, за допомогою визначення енергії руйнування, є використання для цих цілей енерговитрат на технологічну операцію, яка для цього використовується. У наведеному вище прикладі для цього використовувалася операція товчення, що виконується в лабораторних умовах [15].

У роботі [16] пропонується математична модель буріння, що базується на законі збереження енергії. Використовуючи основні закономірності механічної взаємодії зубків шарошечного долота з тріщинуватою гірською породою, отримана залежність швидкості буріння за формулою

$$v_6 = \frac{\pi^2 P_{oc} n N_3 d_3^2}{2 \left[\frac{\sigma_p^2}{8E} \left(\frac{1-\nu}{\nu} \right)^2 \Phi d_e \pi d_d^2 - M \right]}, \quad (3)$$

де P_{oc} – осьове зусилля; n – частота обертання бурового ставу; d_d – діаметр долота; N_3 – число зубків шарошечного долота, що одночасно контактують із гірською породою; d_3 – діаметр зубка; σ_p – межа міцності гірської породи на розрив; ν – коефіцієнт Пуассона; E – модуль пружності породи; Φ – показник тріщинуватості гірського масиву; d_e – розмір природної окремості.

Фізико-механічні властивості гірських порід мають високу варіацію і їх досить складно визначити у виробничих умовах. Тому у роботі [17] встановлено зв'язок фізико-механічних властивостей з коефіцієнтом міцності за шкалою М.М. Протод'яконова. Чисельний аналіз зміненої з урахуванням коефіцієнта міцності формули (3) та порівняння з практичними даними швидкості шарошечного буріння дозволили подати її у вигляді

$$v_6 = \frac{5 P_{oc} n d_3^2}{1000 f \Phi d_e d_d^2 - M}. \quad (4)$$

На відміну від низки досліджень [18-20] у формулі (4) враховується параметр тріщинуватості гірського масиву Φ . Цей параметр визначається розміром окремості, величиною розкриття тріщин та кількістю систем тріщин [21].

На рис. 1 наведено розрахункові, відповідно до формули (4), та нормативні залежності швидкості буріння v_6 від коефіцієнта міцності f [16].

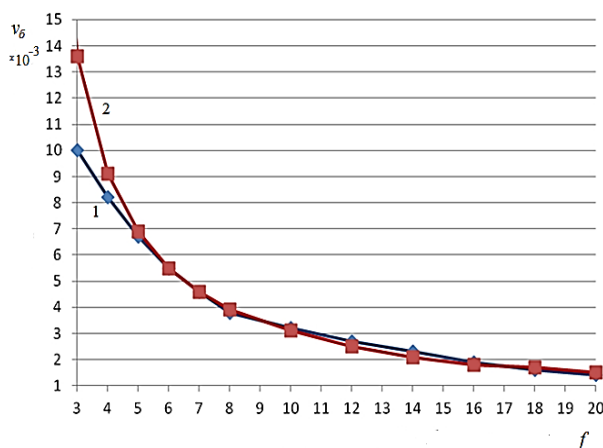


Рис. 1. Залежність швидкості буріння $v_6 \times 10^{-3}$, м/с від коефіцієнта міцності f : 1 – нормативна, 2 – розрахункова

Вважається, що стан гірських порід у природному заляганні найбільш точно характеризується енергоємністю процесу буріння, яка визначається потужністю обертача і швидкістю проходки свердловини [22].

В роботі [5] розрахунок середньої енергоємності по блоку, по свердловині або штанзі в процесі буріння виконується відповідно до виразу

$$e_{cp} = \frac{E}{L_t}, \quad (5)$$

де $e_{\text{ср}}$ - середня енергоємність блоку, кВт-год/м; E – витрати енергії на обурення блоку за лічильником, кВт-год; L_i - сумарна глибина збурених свердловин на блоці, глибина свердловини або довжина бурової штанги, м.

Відповідно до наведеного виразу існуюча шкала ЦБПНТ трансформована зі швидкості буріння на питому енергоємність буріння (табл. 1) [5].

Таблиця 1

Шкала буримості гірських порід за показниками механічної швидкості та питомої енергоємності шарошечного буріння

Категорії міцності порід	Основний час буріння, год/м	Питома енергоємність буріння, кВт-год/м
VI	0,020 - 0,023	0,5 - 0,7
VII	0,024 - 0,030	0,7 - 0,9
VIII	0,031 - 0,036	0,9 - 1,1
IX	0,037 - 0,043	1,1 - 1,3
X	0,044 - 0,049	1,3 - 1,5
XI	0,050 - 0,056	1,5 - 1,8
XII	0,057 - 0,066	1,8 - 2,1
XIII	0,067 - 0,083	2,1 - 2,5
XIV	0,084 - 0,097	2,5 - 2,9
XV	0,098 - 0,118	2,9 - 3,5
XVI	0,119 - 0,138	3,5 - 4,2
XVII	0,139 - 0,166	4,2 - 5,0
XVIII	0,167 - 0,193	5,0 - 5,9
XIX	0,194 - 0,225	5,9 - 6,9
XX	0,226 - 0,270	6,9 - 8,1

Наведені вище залежності свідчать про те, що виражені в тому чи іншому вигляді енерговитрати є універсальною характеристикою енергоємної контактної взаємодії, однак лише одного цього параметра недостатньо для ідентифікації такої складної гетерогенної структури, як гірська порода [23].

У роботі [16] стверджується, що згідно із законом збереження енергії кінетична енергія (E_k) зубців, що впроваджуються, шарошки з урахуванням осьового зусилля і крутного моменту (M) витрачається на пружно-пластичні деформації та руйнування гірського масиву ($E_{\text{уп}}$)

$$E_k + M = E_{\text{уп}}. \quad (6)$$

Однак цей процес супроводжується й іншими енерговитратними проявами: тертя, акустична та електромагнітна емісія, вібрація та ін. І ці супутні процеси можуть бути ефективно використані для визначення характеристичних властивостей гірської породи.

Важливим елементом енергоємної контактної взаємодії є акустична емісія. Це хвилі тиску, що утворюються в матеріалі енергією, що виділяється в результаті деформації або різних типів руйнування [24]. У міру того, як ці хвилі тиску поширюються через матеріал, вони можуть бути зафіксовані датчиками і проаналізовані, щоб отримати уявлення про властивості матеріалу [25]. Широко використовуються з цією метою ультразвукові датчики різних типів.

Акустичні хвилі можуть виникати та поширюватися в одному, двох або трьох вимірах. Важливими характеристиками цих хвиль є амплітуда, довжина хвилі, частота, фаза, хвильова енергія, інтенсивність звуку та звуковий тиск. При ретельному вимірі та аналізі кожна з цих характеристик може надати цінну інформацію про джерело хвиль та середовище поширення. З спектра акустичного сигналу можна виділити широкий діапазон параметрів. Акустичні сигнали можна аналізувати у двох областях: у часі та за частотою. Важливі параметри, які можна отримати в часовій області, включають пік, середній спектр та середньоквадратичне значення спектра. Найбільш важливим параметром, який можна отримати в частотній ділянці, є базова частота [26].

Одним із можливих способів визначення типу (класу) фактично пробуреної породи є аналіз акустичної емісії, створюваної в процесі буріння свердловин. Намір полягає в тому, щоб ідентифікувати конкретну акустичну сигнатуру кожного типу вибуреної породи або принаймні класу породи.

Під час обертального буріння шум утворюється від декількох джерел. Основними є двигун бурової установки, та результат контактної взаємодії бура з породою. Попередні аналізи [27] показали, що релевантний сигнал, який передає акустичну сигнатуру породи, можна визначити у частотному діапазоні 5000 - 8000 Гц. Нижня половина спектру сигналу представляє в основному шум бурового двигуна та інших джерел.

У роботі [28] наводяться характеристики відгуку електромагнітного випромінювання (EMR) та акустичної емісії (АЕ) у процесі руйнування під механічним навантаженням камнеподібного матеріалу з використанням системи реєстрації АЕ-EMR, що складається із системи навантаження, системи збору даних та системи екранування. Резонансна частота датчика акустичної емісії, що використовувався в експерименті, становила 42,3 кГц.

Щоб унеможливити вплив дисперсії однорідності зразка, для імітації зразків гірських порід використовувалися спеціальні зразки бетону (камнеподібні матеріали), а також вивчалися характеристики АЕ при стисканні зразків різного розміру. Кількісна оцінка акустичної емісії проводилася підрахунком імпульсів виміряного сигналу акустичної емісії, рівень яких перевищує тестове граничне значення.

На рис. 2 наведені результати вимірювань акустичної емісії двох зразків при одновісному навантаженні, які свідчать про те, що цей параметр є акустичним образом конкретного досліджуваного зразка, який відрізняється яскраво вираженими індивідуальними особливостями [28].

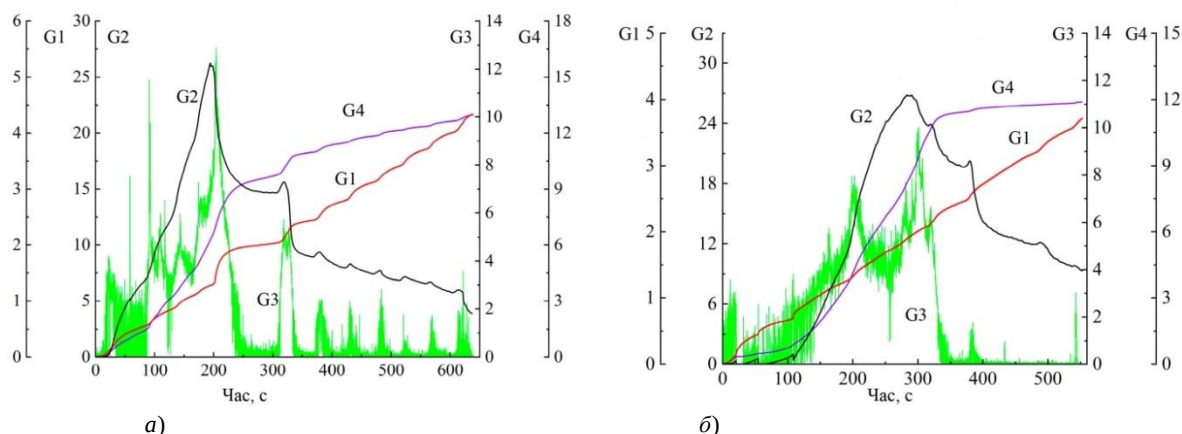


Рис. 2. Результати випробувань досліджуваних зразків: G1 – деформація ($\times 10^{-2}$); G2 – напруження (МПа); G3 – акустична емісія ($\times 10^3$); G4 – кумулятивна величина акустичної емісії ($\times 10^6$)

З рис.3 видно, що при одновісному стисненні зразка акустична емісія має різні характеристики на різних стадіях деформації [28]:

на початковому етапі навантаження зразка присутній певний сигнал акустичної емісії, який пов'язаний з тим, що в міру поступового збільшення навантаження крихітні отвори у зразку поступово ущільнюються, що призводить до певної міри мікротріщинуватості;

у період середнього навантаження мікротріщини динамічні, активність акустичної емісії зростає і швидко досягає рахункового піку. З часом активність акустичної емісії поступово слабшає, що пов'язано з досягненням певного рівня щільності мікротріщин у матеріалі. У цей час накопиченої всередині матеріалу енергії недостатньо для того, щоб мікротріщини проникли крізь матеріал і утворили макротріщини;

після періоду стабільного розвитку, через те, що енергія, накопичена всередині матеріалу, досягає межі, яку він може сприйняти, мікротріщини швидко проникають крізь матеріал і утворюють макротріщини, а величина акустичної емісії швидко збільшується до максимального рівня;

після основного руйнування зразка активність акустичної емісії після короткочасного підвищення поступово знижується, що пов'язано з сильним тертям всередині матеріалу.

Таким чином, АЕ формується зародженням та розповсюдженням мікротріщин, а також тертям їх поверхонь у процесі деформування та руйнування зразків. Поширення тріщини залежить від того, чи досягає інтенсивність напруження граничної в'язкості руйнації відповідного матеріалу.

З викладеного випливає, що акустична емісія, що виникає в процесі енергоємної контактної взаємодії породоруйнівного органу та гірської породи при бурінні свердловин, несе інформацію, яка може бути використана для розпізнавання геологічної структури родовища та формування оптимальних режимних параметрів бурової установки [29,30].

Нехай обертально-поступальний рух ПРО спрямований нормально до вільної поверхні напівпростору (гірської породи) $Z > 0$ і вздовж своєї осі симетрії. Передбачається, що порода має ізо- або ортотропну будову, а зміна її фізико-механічних властивостей по висоті (координаті Z) можна описати шматково-безперервною функцією з кінцевим числом точок розриву 1-го роду з відповідними координатами z_n , $n = 1, 2, \dots, N$; де N - число шарів породи. Між точками розриву передбачається монотонна зміна властивостей породи, що описуються її параметрами міцності σ, τ, f (межа міцності на стиск, показник міцності на зріз і коефіцієнт міцності породи за шкалою М.М. Протод'яконова [13]). Результируюча сила $F(z(t))$ процесу взаємодії ПРО з ГП визначається в інтегральному вигляді зусиллям подачі та має вигляд інтегрального рівняння [13,23]

$$C_F \int_0^{z_0-z(t)} K_F(\zeta(t)) \sigma(z_0 - \zeta(t)) d\zeta = \varphi_F(z(t)); \quad z \geq z_0 - h(t), \quad (7)$$

де

$$C_F = \frac{1}{(h \cdot \operatorname{tg} \varphi_0)}; \quad K_F = \beta_0 + \beta h(t(\zeta));$$

$$\varphi_F(z) = \tilde{F}(t(z)) - C_F f_0 (\beta_0 + \beta h_0) [h_* - z_0 + z] / 2; \quad h_* \leq h(t).$$

Результиуюча моменту обертання $M(z(t))$ процесу взаємодії, що розвивається на ПРО також має вигляд інтегрального рівняння

$$C_M \int_0^{z_0-z(t)} K_M(\zeta(t)) \tau_{cp}(z_0 - \zeta(t)) d\zeta = \varphi_M(z(t)); \quad z \geq z_0 - h(t), \quad (8)$$

де

$$C_M = \frac{1}{(h \cdot \operatorname{tg} \varphi_0)}; \quad K_M = \alpha h(t(\zeta));$$

$$\varphi_M(z) = \tilde{F}(t(z)) - C_M f_0 \alpha h_0 [h_* - z_0 + z] / 2; \quad h_* \leq h(t),$$

а величини параметрів α, β_0, β - обчислюються у процесі розв'язання задачі.

Інтегральні рівняння (7), (8) описують процес взаємодії ПРО з середовищем, що характеризується властивостями міцності, геометрія якого, в загальному випадку не має обмежень за винятком обмежень, диктованих практичними міркуваннями. Математична модель процесу включає як опис статичного, так і динамічного режимів взаємодії, а з погляду класу формалізації є системою інтегральних рівнянь Вольтерра 1-го роду [13]. Наведена модель енергоємного процесу взаємодії є по суті багатовимірною моделлю, оскільки фізичний процес взаємодії сам собою реалізується у просторі (хоча у спрощених випадках його доцільно моделювати як одномірний). Наведений конкретний процес моделюється як процес, що має дві незалежні просторові координати та одну змінну за часом. Математична модель допускає моделювання багатовимірного, ID ≥ 3 , динамічного процесу, у якого в ролі змінних можуть розглядатися узагальнені координати.

Наведені залежності (7), (8) дозволяють моделювати перехідні процеси режимів взаємодії ПРО з ГП, що виникають при переході породоруйнівного інструменту з одного шару породи до іншого з відмінними від попереднього властивостями міцності. Ці процеси обумовлені як характеристиками ПРО, так і властивостями ГП.

Обчислені за допомогою виразів (7), (8) значення $F(z(t))$ та $M(z(t))$, а також значення швидкості обертання ПРО, питомої енергоємності та характеристики акустичної емісії використані для моделювання швидкості проходження свердловини ROP. З цією метою використано обчислювальний алгоритм на основі адаптивної нейро-нечіткої структури ANFIS, реалізованої у середовищі MATLAB 2017 [31]. Для характеристичної оцінки акустичної емісії процесу буріння застосовувалась технологія кепстрального аналізу [32].

Кепстр (Cepstrum) – це зворотне перетворення Фур'є від натурального логарифму квадрата спектральної щільності випадкового процесу, вираженого функцією $C(q)$ на осі кепстрального часу q [33]. Для аналізу процесу буріння сформовано бібліотеку кепстральних образів, що відповідають різним гірським породам.

Аналіз експериментально отриманих кепстральних образів дозволяє побудувати процедуру ідентифікації та розпізнавання основних мінералого-технологічних типів гірських порід родовища, що розробляється, в ході буріння свердловин.

Реальні енергоємні процеси контактної взаємодії вираженої періодичністю і стаціонарністю можуть не мати. Як показано в роботах [33,34] $X(t)$ - вихідний коливальний процес допускає полігармонічну апроксимацію за допомогою адитивних комбінацій наборів синусоїдальних функцій

$$X(t) = X_1(t) + X_2(t) + \dots X_n(t) + \dots, \quad (9)$$

де $X_n(t) = A_n \sin(2\pi f_n t + \varphi_n)$ - акустична емісія, представлена у вигляді гармонійних складових з амплітудами A_n , частотами f_{n-i} і фазами φ_{n-i} .

Параметр q (сачтота) має розмірність часу, його застосування в кепстральному аналізі забезпечує рознесення результируючих енергетичних сплесків акустичної емісії по осі кепстрального часу. Як правило, енергетичні сплески в реальних акустичних процесах розміщуються вздовж осі сачтот q з віддаленням від нульової позначки, у той час як сплески перешкодових процесів розташовуються в безпосередній близькості до нуля.

Для формування та практичного використання бібліотек кепстральних образів використано наступне вираження [34]

$$C(q) = (2\pi)^{-1} \sum_{n=0}^{\infty} \{\ln|X(jnw_1)|^2\} \exp(jnw_1 q) \Delta w \approx T_H^{-1} \sum_{n=0}^{LF-1} \{\ln[T_H^2[A_n^2(nw_1)]/4]\} \exp(j2\pi nq/T_H), \quad (10)$$

де $A_n(nw_1)$ – компоненти амплітудно-частотного лінійчастого спектру.

Значення кепструму визначається як невід'ємна функція кепстрального часу у вигляді квадрата модуля $C(q)$ [33,34]

$$|C(q)|^2 = A^2(q) + B^2(q); \quad (11)$$

$$A^2(q) = T_H^{-1} \sum_{n=0}^{LF-1} \{\ln[T_H^2[A_n^2(nw_1)]/4]\} \cos(2\pi nq/T_H); \quad (12)$$

$$B^2(q) = T_H^{-1} \sum_{n=0}^{LF-1} \{\ln[T_H^2[A_n^2(nw_1)]/4]\} \sin(2\pi nq/T_H). \quad (13)$$

При заданій роздільній здатності R , яка має розмірність Гц/ліній, верхній f_B і нижній f_H граничних частотах спектра сигналу кількість ліній LF спектра (вкладених смуг частоти) визначається співвідношенням [34]

$$LF = Ant[(f_B - f_H)R^{-1} + 1], \quad (14)$$

де Ant – функція Антьє.

Для сигналу з рівномірним суцільним спектром сукупність значень кепстру в околиці точки кепстрального часу $q = 0$ формою близька до дельта-функції. Якщо у розкладанні сигналу є значні неоднорідності у деяких частот f_k , то поблизу значень $q_k = 1/f_k$ спостерігатимуться сплески кепстра [34].

При моделюванні процесу буріння свердловин для кепстрального аналізу акустичної емісії крок дискретизації був обраний рівним 10^{-4} , значення частотних параметрів: $f_H = 4500$ Гц; $f_B = 9500$ Гц.

На рис. 3 наведено результати моделювання процесу буріння свердловини в гірському масиві, представленому декількома шарами, що характеризуються різними фізико-механічними властивостями: f_1 - III→VI; f_2 – VI; f_3 – VIII; f_4 – XVIII; f_5 – XII; f_6 – XVII; f_7 – XVI.

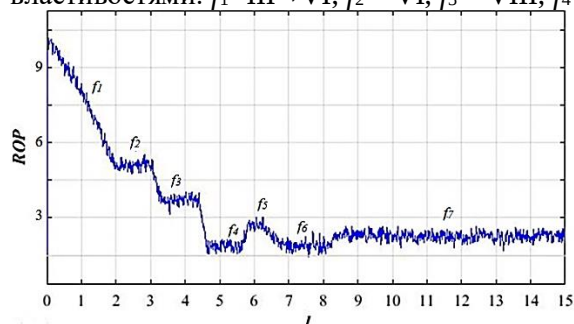


Рис. 3. Залежність швидкості проходки ROP (м/с $\times 10^3$) від глибини свердловини l (м); пронумеровані ділянки відповідають міцності гірської породи: f_1 - III→VI; f_2 – VI; f_3 – VIII; f_4 – XVIII; f_5 – XII; f_6 – XVII; f_7 – XVI

Отримані результати свідчать про перспективність дослідженого підходу для моделювання та управління бурінням свердловин, який дозволяє отримувати інформацію про фізико-механічні

характеристики гірської породи безпосередньо в процесі буріння і використовувати її для коригування режимних параметрів бурової установки.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Для моделювання енергоємної контактної взаємодії породоруйнівного органу з гірською породою при бурінні свердловин використано комплекс енергетичних характеристик процесу та акустичної емісії. Для кількісної оцінки характеристики акустичної емісії застосовується технологія кепстрального аналізу, яка базується на результатах побудови дискретних вимірів часового ряду амплітуди коливань. Кепстр розглядається як зворотне перетворення Фур'є від натурального логарифму квадрата спектральної щільності випадкового процесу. Розрахунково-аналітична модель забезпечує визначення обмеженої кількості результуючих сплесків енергії, рознесених по осі кепстрального часу. Модель реалізована за допомогою адаптивної нейро-нечіткої структури ANFIS, що навчається, в програмному пакеті MATLAB 2017. Використаний метод може бути застосований також для оцінки стану бурового обладнання.

Напрямок подальших досліджень є апробація запропонованої моделі на зразках гірської породи із залізрудних родовищ, оцінка ефективності різних комбінацій вимірюваних параметрів та обчислювальних алгоритмів на основі нейромереж глибокого навчання, розробка алгоритму оптимізації процесу буріння.

Список літератури

1. **M. Anemangely, A. Ramezanzadeh, B. Tokhmechi.** Determination of constant coefficients of Bourgoyne and Young drilling rate model using a novel evolutionary algorithm. - SPE Comput. Appl., 8 (4) (2017), pp. 693-702.
2. **H.R. Ansari, M.J. Hosseini, M. Amirpour.** Drilling rate of penetration prediction through committee support vector regression based on imperialist competitive algorithm. - Carbonates Evaporites, 32 (2016), pp. 205-213.
3. **Cesar Soares, Kenneth Gray.** Real-time predictive capabilities of analytical and machine learning rate of penetration (ROP) models. - Journal of Petroleum Science and Engineering, Volume 172, (2019), pp. 934-959. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.08.083>.
4. **Robert Teale.** The concept of specific energy in rock drilling. - International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 2 (1) (1965), pp. 57-73
5. **Угольніков В.К., Сімаков Д.Б., Угольніков Н.В.** Визначення енергоємності руйнування гірських порід при шарошечному бурінні. - Гірничий інформаційно-аналітичний бюлетень (науково-технічний журнал), 10, 2004, С. 78-81. <https://cyberleninka.ru/article/n/opredelenie-energoemnosti-razrusheniya-gornyh-porod-pri-sharoshechnom-bureni>.
6. **Сухов Р.І., Рєгунцов А.С.** Результати досліджень властивостей міцності локальних масивів у процесі буріння із застосуванням програмно-апаратного комплексу - Проблеми надрокористування, №4, 2016 р. DOI: 10.18454/2313-1586.2016.04.12.
7. **Maurer W.C.** The 'Perfect-Cleaning' Theory of Rotary Drilling. - Journal of Pet. Tech, 1962.
8. **Galle E.M and Woods A.B.** Best Constant Weight and Rotary Speed for Rotary Rock Bits. - Drill. And Prod. Prac., API 1963, pp 48-73.
9. **Bourgoyne A.T. Jr., Young F.S.** - A Multiple Regression Approach to Optimal Drilling and Abnormal Pressure Detection", SPE 4238,1974.
10. **Eren T., Ozbayoglu E.** Real Time Optimization of Drilling Parameters During Drilling Operations. SPE Paper 129126, SPE Oil and Gas India Conference and Exhibition, Mumbai, India, 2010.
11. **Garnier A.J. and van Lingen N.H.** Phenomena Affecting Drilling Rates at Depth - SPE 1097-G, Annual Fall Meeting of SPE, Houston, TX, May 1959.
12. **Моркун В.С., Цокуренко О.О., Барський С.М.** Адаптивне управління процесами енергоємної контактної взаємодії // Удосконалення процесів гірничого виробництва при видобутку залізних і марганцевих руд / Сб. наук. пр. ДНДГРІ. – 2004. – С. 190-200.
13. **Цокуренко О.О.** Інформаційно-обчислювальний комплекс та обернені завдання. - Київ: Наукова думка, 1998. - 281 с.
14. **Моркун В.С., Цокуренко О.О.** Основні принципи адаптації управління буровим роботом-інформатором у зовнішніх екстремальних умовах // Розроб. руд. родовищ. – Кривий Ріг: КТУ. - Вип. 82. – 2003. – С. 109-121.
15. **Аналіз впливу вибухових робіт з використанням емоніту на якість підготовки залізняку для переробки на рудозбагачувальній фабриці. //Звіт з НДР. Криворізький технічний університет / Наук. кер. В.В. Перегудов/ Кривий Ріг, 2007,119 с.**
16. **Тюпін В.М., Ігнатенко І.М., Крючков І.С., Ушаков Д.К.** Встановлення швидкості шарошечного буріння вибухових свердловин і показника буримості тріщинуватих масивів гірських порід. <https://2cad.ru/blog/science/ustanovlenie-skorosti-sharoshechnogo-bureniya>.
17. **Кутузов Б.М., Тюпін В.М.** Спрощений розрахунок параметрів масового вибуху на кар'єрах // Вісті ВНЗ. Гірничий журнал. - 1985, №7. С.66-67.
18. **Кутузов Б.М.** Вибухова та механічна руйнація гірських порід. - Надра, 1973. 311с.
19. **Мосінець В.М., Пашков А.Д., Латишев В.А.** Руйнування гірських порід. - Надра, 1975. 216 с.
20. **Тангасв І.А.** Енергоємність процесів видобутку та переробки корисних копалин. - Надра, 1986. 231с.
21. **Тюпін В.М.** Вибухові та геомеханічні процеси в тріщинуватих напружених гірських масивах. - БДУ, 2017. 192 с.

22. Zharikov S. N. Drilling and blasting resource-saving technology development. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Gornyi zhurnal = News of the Higher Institutions. Mining Journal*. 2019; 1: 21–32.
23. Моркун В.С., Цокуренко О.О., Луценко І.А. Адаптивні системи оптимального керування технологічними процесами. - Кривий Ріг: Мінерал, 2005. - 261 с.
24. Khoshouei, M., and Bagherpour, R. (2019): Application of Acoustic Emission (AE) in mining and earth sciences: a review. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining Geological-Petroleum Engineering Bulletin)*, 34,4, 19-32.
25. Hopwood, T., and McGogney, C. (1987): Acoustic emission applications in civil engineering, *Nondestructive testing handbook*, College of Engineering University of Kentucky Lexington, Kentucky, 325-345.
26. Mehrbod Khoshouei, Raheb Bagherpour, Mohammad Hossein Jalalian, Mojtaba Yari. Investigating the acoustic signs of different rock types based on the values of acoustic signal RMS. - *Rudarsko-geološko-naftni zbornik (The Mining-Geology-Petroleum Engineering Bulletin)*, 2020, pp. 29-38. DOI: 10.17794/rgn.2020.3.3
27. Zborovjan M.: Identification of minerals during drilling process via acoustic signal. *Metallurgy and foundry* 4/2001, Vol. 26. Krakow, Poland, 2001.
28. Li, Z.; Lei, Y.; Wang, E.; Frid, V.; Li, D.; Liu, X.; Ren, X. Characteristics of Electromagnetic Radiation and the Acoustic Emission Response of Multi-Scale Rock-like Material Failure and Their Application. *Foundations* 2022, 2, 763-780. <https://doi.org/10.3390/foundations2030052>.
29. Bastari, A., Cristalli, C., Morlacchi, R., and Pomponi, E. (2011): Acoustic emissions for particle sizing of powder through signal processing techniques. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 25,3, 901-916.
30. Yamaguchi, T. J., Soma, M., Ishida, M., Watanabe, T. Ohmi, T. (2000). Extraction of peak-to-peak and RMS sinusoidal jitter using an analytic signal method: 18th IEEE VLSI Test Symposium, 395-402.
31. Моркун В. С., Моркун Н. В., Тронь В. В., Гапоненко А. А., Гапоненко І. А., Паранюк Д. І. Методи оптимізації процесу буріння свердловин, – Кривий Ріг: Гірничий вісник. 2020. Вип. 107. С. 96-101.
32. A. M. Noll. Cepstrum pitch determination. *Journal of the Acoustical society of America* , 41:293-309, 1967.
33. A.V. Oppenheim, R.W. Schaffer. *Digital signal processing*. Prentice-Hall, 1975.
34. Гулай, А. В., Зайцев, В. М. Інтелектуальна технологія кепстрального аналізу коливальних процесів. – БНТУ, 2020, 80-88 с.

УДК 331.56; 656.13

В.А. ЦОПА, д-р техн. наук, проф., Міжнародний інститут менеджменту, Київ
С.І. ЧЕБЕРЯЧКО, д-р техн. наук, проф., О.В. ДЕРЮГІН, канд. техн. наук, доц.,
НТУ «Дніпровська політехніка»

О.В. ПИЩИКОВА, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ РИЗИКУ ДОРОЖНЬО-ТРАНСПОРТНОЇ ПРИГОДИ ПРИ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

Мета. Розробка методу для оцінки ризиків дорожньо-транспортної пригоди при виконанні автомобільних перевезень.

Методи дослідження. Використано методом "Краватка-Метелик", який дозволяє врахувати на появу небезпечної події всі зовнішні та внутрішні небезпечні (безпечні) чинники, які можуть як збільшити, так і зменшити вірогідність небезпечної події. Для ранжування небезпечних чинників застосовано метод "Decision Making Trial and Evaluation" (далі - Dematel), який базується на парних інструментах порівняння та прийняття рішень на основі теорії графів.

Наукова новизна. Запропоновано механізм для визначення найвпливовіших небезпечних чинників, який встановлюється за умови, що рівень впливу небезпечного чинника, який отримується виходячи з розрахунку матриці кінцевого впливу методом Dematel є більшим за 20 % встановленого максимального значення.

Практична значимість. Запропоновано восьми кроковий алгоритм з розрахунку ризику настання дорожньо-транспортної пригоди.

Результати. Розроблений реєстр небезпечних чинників, які включають шість типів факторів: людський, організаційний, технічний, операційний, соціальний, ергономічний та збільшують вірогідність настання небезпечної події дорожньо-транспортної пригоди. Запропоновано алгоритм для оцінки професійних ризиків водіїв автомобіля, який складається з восьми основних кроків, перші три присвячені процедурі ідентифікації небезпек, небезпечних чинників та ранжуванню останніх для виявлення чинників, які є причинами настання небезпечної події й тих, які будуть наслідками перших. Проведено оцінку професійних ризиків водія автомобіля, в якій виявлено, що основними небезпечними чинниками, які впливають на настання дорожньої пригоди є брак навичок розуміння системи та навичок прийняття рішення, недбалість дотримання перевірок безпеки на різних етапах роботи маніпулятора, відсутність ефективного контролю за безпекою праці та відсутність належного передрейсового медичного контролю стану здоров'я водія, усунення яких значно зменшить рівень ризику під час перевезення.

Ключові слова: водій, безпека, професійний ризик, метод DEMATEL
doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-86-95

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Безпека дорожнього руху - це доволі складна багаторівнева задача, яка на жаль, не має простого вирішення. Щороку в Європі більше мільйона людей потрапляють у дорожньо-транспортні пригоди (далі - ДТП), більша половина з них – це аварії з виробничим вантажним автомобільним транспортом [1]. Така ситуація вимагає розробки відповідних безпекових програм для зменшення фінансових збитків та збереження життя та здоров'я водіїв. Основою є оцінка ризиків для обґрунтування відповідного інструментарію з підвищення рівня безпеки. Зокрема, традиційних кваліфікації учасників дорожнього руху, покращення стану транспортних засобів, забезпечення відповідного контролю за виконанням правил дорожнього руху (перерв, заборони на розмови по телефону, розкладу та інше). Однак на процес оцінки ризиків, доволі сильно впливає суб'єктивна думка експерта [2]. Когорта різних когнітивних упереджень доволі часто призводить до невірних оцінок – нехтування очевидними фактами. В той же час опрацювання великої кількості небезпечних чинників (далі - НЧ) призводить до значного збільшення розмірів карт професійних ризиків (далі - ПР), складності їх розуміння і читання, а головне виділення найбільш суттєвих причин інцидентів. Тому дослідження, які направлені на вдосконалення даної процедури, зменшенню впливу суб'єктивних факторів є досить актуальними завданням.

Аналіз досліджень і публікацій. Проведений аналіз свідчить про те, що дослідження питань, пов'язаних із особливостями оцінки ризиків в системах управління безпекою праці та здоров'я працівників дістала відображення в порівняно невеликій кількості наукових праць і в основному присвячена узагальненим поняттям ризику. Можна виділити таких науковців, як О.І. Запорожець, О.Є. Кружилко, В.В. Майстренко, О.І. Полукаров, А.О. Водяник, К.Н. Ткачук, А.П. Бочковський, М. Муртонен та ін. Для оцінки ризиків використовуються різні методики та математичні методи.

Існує значна кількість наукових досліджень, які направлені на визначення впливу суб'єктивного ставлення щодо оцінки ПР [3-8]. На початковому етапі, найбільший інтерес був проявлений до визначення міжкультурних відмінностей у сприйнятті ризикованих видів професійної діяльності, які становлять загрозу здоров'ю та безпеці, що викликано процесами глобалізації [3, 4]. Це пов'язано з тим, що люди по-різному сприймають ПР через власний досвід, освіту, переконання, ставлення колег та культуру [5, 6]. В свою чергу, для забезпечення безпеки та формування відповідної культури праці необхідно виявити залежності між сприйняттям ПР працівниками та причинно-наслідковим зв'язком виникнення небезпеки, варіантами розвитку небезпечних подій (далі - НП), які відображаються на індивідуальному та культурному рівнях [7, 8]. Також дослідники наголошують на необхідності врахування різних соціальних та інституційних факторів на оцінку ПР, які в кінцевому підсумку поєднуються людськими судженнями стосовно ймовірності виникнення небезпечних ситуацій [9, 10].

Класичною з позиції оцінювання факторів ризику ДТП є Матриця Хеддона [17], в якій критеріями оцінювання вибрано 3 фази ДТП (до, в процесі та після ДТП) і фактори, що впливають на виникнення ДТП (індивідуальні характеристики людини як учасника дорожнього руху, характеристики транспортного засобу, а також характеристики впливу навколишнього середовища на виникнення ДТП). Матриця Хеддона дозволяє систематизувати фактори ризику та заходи щодо їх обмеження в залежності від фази ДТП, але не враховує цілу низку небезпечних чинників, які можуть призвести до небезпечної події.

Результати проведеного аналізу показують необхідність у розробці чи вдосконаленні процесу ідентифікації НЧ, які збільшують вірогідність настання НП для зменшення суб'єктивності проведення процедури керування ПР при здійсненні вантажних автомобільних перевезень.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є розробка методу для оцінки ПР виникнення ДТП при здійсненні вантажних автомобільних перевезень.

Викладання матеріалу і результати. Для побудови процесу керування ризиками в системах управління безпекою праці та здоров'я працівників, скористаємось моделлю "Краватка-Метелик", яка дозволяє врахувати на появу НП всі зовнішні та внутрішні небезпечні (безпечні) чинники, які можуть як збільшити, так і зменшити вірогідність НП під час автомобільних перевезень (рис. 1).

Вибір даної моделі зумовлений також, можливістю оцінки сукупного впливу небезпечних чинників від різних систем діяльності підприємства на настання НП як добутку між сумарним коефіцієнтом важкості наслідків НП та сумарним коефіцієнтом ймовірності виникнення НП [11]. При цьому враховується, що величина ризику більше 100 балів є не прийнятною, від 50 до 100

балів - прийнятна з наглядом, й менше 50 балів - прийнятна. Внаслідок цього даний підхід забезпечує зменшення невизначеності при розрахунку ризику; підвищення обґрунтованості запобіжних заходів для зменшення ймовірності настання НП; підвищення результативності процесу керування ризиками за рахунок всебічного розгляду всіх небезпечних зовнішніх і внутрішніх чинників чи небезпечних дій.



Рис.1. Модель керування ПР при зміні чинників зовнішнього та внутрішнього середовища організації

Для визначення професійних ризиків використано алгоритм з восьми кроків (рис. 2) в якому передбачено перші три саме для ідентифікації небезпек і небезпечних чинників, які можуть підвищити вірогідність настання НП. При цьому, для аналізу останніх створюється каталог з шести типів факторів: людського, організаційного, технічного, операційного, ергономічного, соціального, який аналізується для встановлення причинних небезпечних чинників і їх похідних – наслідків, що дозволить більш досконало дослідити вплив перших на виникнення НП.

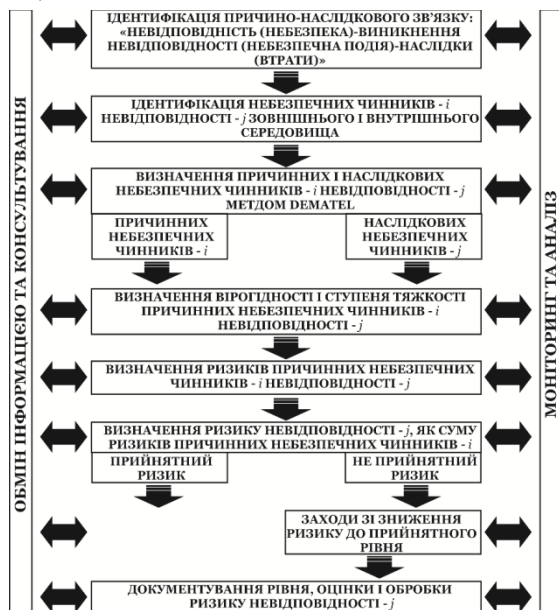


Рис. 2. Процес керування ПР

Таблиця 1

Словесні фрази та відповідні нечіткі числа [13]

Остаточний еквівалент	Опис	Нечіткий еквівалент
Дуже високий вплив (ВВ)	0	0,75 1 1
Високий вплив (В)	1	0,5 0,75 1
Низький вплив (Н)	2	0,25 0,5 0,75
Дуже низький вплив (ДНВ)	3	0 0,25 0,5
Ніякого впливу (НВ)	4	0 0 0,25

Дану процедуру будуть проводити декілька визнаних експертів, які представляють керівництво, менеджмент, працівників, не менше 5 осіб. Для опрацювання взаємодії небезпечних чинників скористаємось методом Dematel, який базується на парних інструментах порівняння та прийняття рішень на основі теорії графів [12,13], що дозволить провести перетворення причинно-наслідкових зв'язків у структурно-візуальних моделях та ідентифікувати й зрозуміти взаємозалежності між різними небезпечними чинниками, що призведуть до негативних наслідків. Взаємозв'язки між факторами впливу проводиться на основі парного порівняння. Для оцінки ступіню впливу використовувався критерій із п'ятирівневою шкалою, що складається зі словесних виразів і відповідних нечітких чисел (табл. 1).

Так, враховуючи, взаємозв'язки між різними НЧ, які збільшують вірогідність настання НП за допомогою методу Dematel можна провести їх ранжування для встановлення їх взаємозалежності і виявлення найбільш впливових. Взаємозв'язки між факторами впливу проводиться на основі парного порівняння.

Матриця $n \times n$ оцінки факторів впливу, формується відповідно до думок експертів. Змінна H – кількість експертів; n – кількість розглянутих критеріїв. Порівняння між двома факторами впливу i і j k -м експертом позначається

відповідно до теорії нечіткості (табл. 1), значення словесного виразу «ніякого впливу» дорівнює - 0. Відповідно словесні вирази: «дуже низький вплив» - 1, «низький вплив» - 2, «високий вплив» - 3, а «дуже високий вплив» - 4. На підставі виставлених оцінок факторів впливу, кожним експертом формується матриця за допомогою рівняння (1)

$$(1 \leq k \leq H) B^{(k)} = [b_{ij}^k]_{n \times n}. \quad (1)$$

Середня матриця $A = [a_{ij}]_{n \times n}$ є прямий вплив, матрицю та середнє значення експертних оцінок можна розрахувати згідно з рівнянням (2). Ця матриця представляє прямий вплив кожного критерію на інші критерії

$$a_{ij} = \frac{1}{H} \sum_{k=1}^H b_{ij}^{(k)}. \quad (2)$$

Матрицю D можна розрахувати за рівняннями (3) і (4)

$$D = [d_{ij}]_{n \times n} = \frac{A}{S}; \quad (3)$$

$$S = \left(\max_{1 \leq i < j \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}, \max_{1 \leq j < i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij} \right). \quad (4)$$

Матрицю T_c можна розрахувати згідно з рівнянням (5).

У цьому рівнянні I є одиничною матрицею. Кожен елемент матриці T_c може бути сформований відносно нечіткого числа $\bar{t}_{ij} = (l_{ij}^t, m_{ij}^t, u_{ij}^t)$. Враховуючи рівняння (5)-(8)

$$T_c = D(I - D)^{-1}; \quad (5)$$

$$[l_{ij}^t] = D_l(I - D)^{-1}; \quad (6)$$

$$[m_{ij}^t] = D_m(I - D_m)^{-1}; \quad (7)$$

$$[u_{ij}^t] = D_u(I - D_u)^{-1}. \quad (8)$$

де D_l, D_m, D_u – кожна є матрицею $n \times n$.

Щоб визначити ефект і релевантність критеріїв, спочатку матриця T_c повинна бути нечіткою. Щоб не було нечітких матриці T_c буде використано рівняння (9).

Визначаємо дію та релевантність критеріїв за допомогою значення r і c . Значення рівнянь (10) і (11) можна розрахувати

$$B = \frac{l_1 + m_3 + 2u_2}{4}; \quad (9)$$

$$r = [r_i]_{n \times 1} = \left[\sum_{j=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1}; \quad (10)$$

$$c = [c_j]_{n \times 1} = \left[\sum_{i=1}^n t_{ij} \right]_{n \times 1}, \quad (11)$$

де r - сума рядка i , c - сума стовпця j матриці T_c , r показує загальний ефект прямого і непрямого впливу i на інші критерії, c показує прямий і непрямий загальний вплив фактору j на інші фактори.

У результаті $r + c$ вказує на важливість критерію i в системі, $r - c$ показує дію критерію i в системі. Якщо $r - c$ додатне, дія критерію i належить до групи причин, а якщо $r - c$ від'ємне, ефект критерію, який належить до групи «залежних».

Наступним кроком процедури оцінки ПР є визначення його рівня як суму добутку вірогідності НП (B) і тяжкості наслідків (T) від усіх попередньо встановлених найбільш впливових НЧ

$$P_{\text{ризик}} = \sum (B_i \times T_i), \quad (12)$$

де P - ризик НП від небезпеки з урахуванням НЧ - i ; B_i – вірогідність настання НП від небезпеки під впливом НЧ - i , який впливає на вірогідність настання НП; T_i - ступень тяжкості наслідків від НП від небезпеки під впливом НЧ - i , який впливає на ступень тяжкості стану здоров'я травмованого від НП.

У випадку отримання від'ємних значень, рівень ПР приймається рівним нулю і вважається низьким. Градації рівнів впливу означених величин приводяться в таблицях 2-4.

Таблиця 2

Приклад форми для первинної оцінки ПР від НЧ

Ідентифікація			Ідентифікація НЧ, небезпечних дій та бездій	Первинний аналіз – визначення рівня ПР за кожним НЧ та загального ПР небезпеки		
небезпека	НП	негативні наслідки	вплив на вірогідність настання НП та/або на тяжкість наслідків НП від НЧ	вірогідність настання НП від НЧ - i	ступень тяжкості від настання НП від НЧ - i	рівень ПР від НЧ - i
автомобіль, що рухається	ДТП	інвалідність, смерть	НЧ ₁	Вп _{j1}	Тп _{j1}	Рп _{j1}
			НЧ ₂	Вп _{j2}	Тп _{j2}	Рп _{j2}
			НЧ ₃	Вп _{j3}	Тп _{j3}	Рп _{j3}
			НЧ ₄	Вп _{j4}	Тп _{j4}	Рп _{j4}
			НЧ ₅	Вп _{j5}	Тп _{j5}	Рп _{j5}
			...	...	...	...
			НЧ _i	Вп _{ji}	Тп _{ji}	Рп _{ji}
			...	...	...	...
			НЧ _n	Вп _{jn}	Тп _{jn}	Рп _{jn}
Загальний первинний негативний ПР небезпеки від всіх n НЧ						Рпi=Рпi1+ ... + Рпin

Таблиця 3

Рівні вірогідності (B) НП

Градація рівня впливу	Рівень імовірності НП	Характеристика (опис)
1	Неможливий	Імовірність близька до нуля
2	Практично неможливий	Надзвичайно малоімовірно, що подія відбудеться протягом строку
3	Малоімовірний	Малоімовірно, але може раз відбутися протягом строку
4	Рідкий	Відбувається принаймні один раз протягом строку
5	Імовірний	Відбувається кілька разів протягом строку
6	Високо ймовірний	НП відбувається часто протягом розгляданого строку

Таблиця 4

Рівні тяжкості наслідків (T) НП

Градація рівня впливу	Рівень тяжкості наслідків	Характеристика наслідків для гігієни і безпеки праці
1	Незначний	Незначні ушкодження в одній людині, незначне нездужання в одній людині, майже відсутня, несуттєва шкода системи або навколишнього середовища
2	Низький	Травма легкого ступеня тяжкості в одній людині, незначні ушкодження у групі людей, професійне захворювання легкого ступеня тяжкості в одній людині, незначне нездужання у групі людей, завдання незначної шкоди системі або навколишньому середовищу
3	Помірний	Травми середньої тяжкості в одній людині, легкі травми у групі людей, професійне захворювання середньої тяжкості в одній людині, професійне захворювання легкого ступеня тяжкості у групі людей, завдання несуттєвої шкоди системі
4	Значний	Тяжкі травми в одній людині, травми середньої тяжкості у групі людей, тяжке професійне захворювання в одній людині, професійне захворювання середньої тяжкості у групі людей, значна шкода, завдана одному елементу системи
5	Високий	Загибель однієї людини, групові тяжкі травми, групові тяжкі професійні захворювання, руйнування системи
6	Катастрофічний	Групова загибель людей, руйнування системи, завдання великої шкоди навколишньому середовищу

Після визначення рівня ПР пропонуються рішення щодо запобіжних дій для його зниження. За результатами визначення рівня ризику його може бути віднесено до однієї з груп ризику (табл. 3, 4):

I, II – потрібні заходи щодо зниження ризику;

III – не потрібні заходи щодо зниження ризику, але потрібен контроль за безпекою;

IV – не потрібні заходи щодо зниження ризику і не потрібен контроль за безпекою.

Дуже часто вжиті захисні заходи зменшують імовірність ризику, але не усувають небезпеку. У цих випадках знижується ймовірність ризику, але його тяжкість залишається без зміни. Потрібно також розглядати запобіжні дії, спрямовані на зниження ступеня тяжкості наслідків. При

рівні ризику категорично неприйнятний та неприйнятний розуміємо, що роботи виконувати забороняється без зміни в умовах та без розробки і впровадження заходів щодо зниження ризиків. Першочергово мають бути виконані упереджувальні та захисні заходи для унеможливлення реалізації небезпеки в НП та/або зниження наслідків НП. Встановлюється контроль за заборону проведення робіт.

Першим кроком під час процесу ідентифікації небезпек є складання реєстрів небезпек і НЧ, які впливають на вантажні автомобільні перевезення. Реєстр небезпек, які призводять до ДТП, який складений на основі звітів з розслідування різних інцидентів наведено в табл. 5.

Таблиця 5

Реєстр небезпек, які діють на водія автомобільного транспорту

Небезпека	НП	НЧ небезпеки	
		що впливають на вірогідність	що впливають на ступень тяжкості
Автомобіль, що рухається	ДТП	Організаційні – розділена полоса з зустрічною; стан водія; технічний стан автомобіля; швидкість автомобіля; швидкість зустрічного автомобіля	стан водія; швидкість автомобіля; швидкість зустрічного автомобіля, аптечка, компетентність до медичної допомоги
Працюючий двигун автомобіля	Пожежа	Технічний стан автомобіля, не якісний ремонт	наявність і технічний стан вогнегасника
Працюючий двигун автомобіля в якому накопичились пари пального	Вибух	Технічний стан автомобіля; відсутність контролю появи парів пального; не якісний ремонт	технічний стан автомобіля, аптечка, компетентність до медичної допомоги

Відповідно до вимог стандарту ISO 45001 та враховуючи гігієнічну класифікацію умов праці в кожній із зазначених груп факторів на основі ретельного аналізу виробничого процесу, було підібрано низку різних як зовнішніх так і внутрішніх небезпечних чинників, які наведені в табл. 6.

Таблиця 6

Приклад реєстру НЧ водія автомобіля

Людський фактор	A1	Відсутність спеціальних знань
	A2	Відсутність практичного застосування спеціальних знань
	A3	Брак навичок розуміння системи та навичок прийняття рішення
	A4	Фізичний стан здоров'я і психофізіологічний стан водія
	A5	Відсутність регулярного та періодичного навчання підвищення навичок професійної майстерності
Технічний	A6	Відсутність якості та кількості зарядки АКБ
	A7	Невідповідність вантажопідйомності транспортного засобу кількості вантажу, що перевозиться
	A8	Експлуатація технічно несправного автомобіля та обладнання
	A9	Не якісні запчастини та несвочасна поставка і заміна агрегатів та вузлів
	A10	Експлуатація обладнання після гарантійного строку експлуатації
	A11	Не вчасно замінені гідравлічні шланги після розподільника
	A12	Недбалість дотримання перевірок технічного стану систем безпеки автомобіля
	A13	Експлуатація несправного гідравлічного обладнання
Організаційні	A14	Відсутність нагляду та технічної перевірки
	A15	Зіткнення з зустрічним транспортним засобом
	A16	Втома, погіршення уваги, уповільнення реакції
	A17	Відсутність ефективного контролю за безпекою праці
	A18	Відсутність ефективних засобів кріплення вантажу
Операційні	A19	Робота на відкритій місцевості в природних умовах
	A20	М'яка (рихла) поверхня ґрунту
	A21	Складні погодні умови
	A22	Відсутність належного передрейсового медичного контролю стану здоров'я водія
	A23	Туман, дощ, сніг/ нічна пора доби - погана видимість
Соціальні	A24	Відсутність фінансової підтримки у скрутному становищі
	A25	Низька заробітна плата
	A26	Відсутність грошових доплат за складність виконання професійних функцій
	A27	Відволікання за кермом; дзвінки, реакція
Ергономічні	A28	Відсутність підлокітників в сидінні на робочому місці
	A29	Відсутність достатньої оглядовості на робочому місці
	A30	Відсутність регулювання керма

Далі проводиться їх ранжування за допомогою методу DEMATEL, де спочатку експерти проводять попарні порівняння визначених небезпечних чинників (рис. 3). Розміри матриці визначаються кількістю небезпечних чинників (A30), які впливають на появу конкретної небезпечної ситуації. Експерти складають матрицю виходячи зі суб'єктивної оцінки найбільшої взаємодії з іншими показниками. В даному випадку судження, як правило, базується на підході контролю ПР. Вважається, що всі НЧ з кожної групи призведуть до НП і, загалом, завдають загрозу життю людини. Крім того при складанні матриці, експертам пропонується враховувати можливість контролю за величиною кожного чинника.

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21	A22	A23	A24	A25	A26	A27	A28	A29	A30	
A1	1	BB	BB	B	B	HB	HB	HB	BB	HB	HB	HB	HB	B	HB	BB	BB	H	BB	H	B	B	BB	B	B	B	B	H	BB	BB	
A2	BB	1	BB	BB	HB	HB	HB	HB	BB	HB	HB	HB	HB	B	HB	BB	BB	HB	HB	HB	B	B	BB	B	B	B	B	B	H	BB	BB
A3	BB	BB	1	BB	BB	HB	HB	BB	BB	HB	HB	HB	HB	B	HB	BB	BB	HB	HB	HB	B	B	BB	BB	BB	BB	B	B	H	BB	BB
A4	B	BB	BB	1	BB	BB	HB	HB	BB	HB	BB	BB	BB	BB	BB	BB	BB	BB	BB	HB	BB	BB	BB	BB	B	B	BB	BB	BB	BB	BB
A5	B	HB	BB	BB	1	HB	HB	HB	BB	HB	HB	HB	HB	HB	BB	BB	BB	B	HB	BB	B	B	B	HB	BB	BB	BB	BB	HB	HB	HB
A6	HB	HB	HB	BB	HB	1	BB	BB	B	B	BB	BB	BB	BB	BB	B	B	B	BB	BB	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A7	HB	HB	HB	HB	HB	BB	1	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	B	HB	HB	HB	HB	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A8	HB	HB	BB	HB	HB	BB	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A9	BB	BB	BB	BB	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	B	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A10	HB	HB	HB	HB	HB	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A11	HB	HB	HB	BB	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A12	HB	HB	HB	BB	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A13	HB	HB	HB	BB	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A14	B	B	B	днв	днв	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A15	HB	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A16	BB	днв	днв	днв	днв	B	днв	днв	B	днв	днв	B	днв	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A17	днв	днв	днв	днв	днв	B	днв	днв	B	днв	днв	B	днв	B	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A18	H	днв	днв	днв	B	B	днв	днв	днв	B	днв	B	днв	B	днв	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A19	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A20	H	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A21	B	B	B	днв	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A22	B	B	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A23	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A24	B	B	днв	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A25	B	B	днв	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A26	B	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A27	B	B	B	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A28	H	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A29	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв
A30	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв	днв

Рис. 3. Приклад матриці попарних порівнянь, яку заповнюють експерти (фрагмент)

Далі проводиться опрацювання їх результатів, що дозволяє отримати пріоритизацію НЧ (табл. 7), що дозволяє провести детальний аналіз з визначення впливу тих чи інших НЧ. Так, у наведеному прикладі найбільший показники зафіксовано у НЧ під номером A3, A8, A15, A16, A21, A27. При цьому від'ємний знак у колонці рівень впливу вказує, що вони більше вплинуть на величину наслідків від виникнення НП.

Таблиця 7
Пріоритизація НЧ на основі ступеня важливості ($r + c$) та рівня впливу ($r - c$) (фрагмент)

НЧ	Розрахункові дані		Ступінь важливості $r + c$	Рівень впливу $r - c$
	r	c		
A3	28,77	21,63	50,40	7,14
A8	28,66	22,20	50,86	6,46
A15	28,69	22,74	51,42	5,95
A16	28,28	22,62	50,90	5,66
A21	28,72	23,14	51,86	5,58
A27	27,97	24,35	52,32	3,62

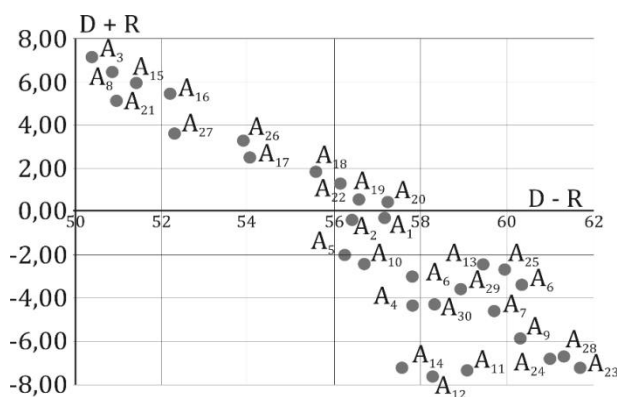


Рис. 4. Приклад карти зв'язку між вимірами НЧ

Побудована пріоритизація НЧ сумісно з їх ранжуванням дозволяє отримати карту зв'язків між вимірами НЧ (рис. 4), з якої вибираємо найбільш значущі для подальшої оцінки ПР. Для цього скористаємось наступною умовою $\max(D-R) \geq (D_i - R_i) > 0,2 \max(D-R)$, де коефіцієнт 0,2 вказує, що в подальших розрахунках будемо враховувати тільки ті НЧ, рівень впливу яких не менше 50% від максимального. В даному випадку ця величина буде складати 1,1, тобто враховуємо всі чинники, які мають рівень впливу більше 1,1.

В табл. 8 наведена оцінка ризику настання дорожньо-транспортної пригоди при впливі декількох визначених небезпечних чинників (A3, A8, A15, A16, A21, A27).

Таблиця 8

Приклад оцінки ПР від НЧ водія вантажного автомобіля

Ідентифікація			Ідентифікація НЧ, небезпечних дій та бездій	Первинний аналіз – визначення рівня ПР за кожним НЧ та загального ПР безпеки		
безпека	НП	негативні наслідки	вплив на вірогідність настання НП та/або на тяжкість наслідків НП від НЧ	вірогідність на- стання НП від НЧ - <i>i</i>	ступень тяжкості від настання НП від НЧ - <i>i</i>	рівень ПР від НЧ - <i>i</i>
автомобіль, що рухається	ДТП	інвалідність, смерть	A3. Брак навичок розуміння системи та навичок прийняття рішення	3	6	18
			A8 Експлуатація технічно несправ- ного автомобіля та обладнання	4	6	24
			A15 Зіткнення з зустрічним транспортним засобом	4	6	24
			A16 Втома, погіршення уваги, упові- льнення реакції	6	4	24
			A21 Складні погодні умови	6	3	18
			A27 Понаднормований графік роботи	6	4	24
			Загальний первинний негативний ПР безпеки <i>i</i> від всіх <i>n</i> НЧ			

Отриманий результат величини ризику перевищує 100 балів, що говорить, в даному випадку, про неприйнятність результату. Це вимагає у детальному аналізі НЧ (табл. 8) розробки пропозицій (табл. 9) щодо зменшення їх впливу з послідовним аналізом залишкового рівня ПР.

Таблиця 9

Рекомендації щодо зменшення впливу НЧ на вірогідність настання НП – ДТП

НЧ	Рекомендації щодо зменшення ПР
A3. Брак навичок розуміння системи та навичок прийняття рішення	Періодично необхідно оцінювати водіїв, перевіряти їх компетентність та виявляти прогалини у навичках водіїв, забезпечити необхідну підготовку водіїв, розробити та впровадити процедури безпечного водіння.
A8 Експлуатація технічно несправного автомобіля та обладнання	Розробити графіки планових ТО, оснастити автомобіль засобами контролю за технічним станом, які унеможливають його рух без відповідного обслуговування.
A15 Зіткнення з зустрічним транспортним засобом	Необхідно організувати навчання водіїв щодо запобігання зіткненням, запровадити політику вибору транспортних засобів, яка унеможливає, принаймні зменшує вірогідність зіткнення транспортних засобів.
A16 Втома, погіршення уваги, уповільнення реакції	Періодично необхідно проводити оцінку навичок водіння, а також забезпечити навчання чи наставництво для розвитку необхідних навичок, розмістити системи контролю за фізичним станом водіїв, розробляти і періодично переглядати графіки роботи водіїв, забезпечити контроль роботи водіїв в нічний час.
A21 Складні погодні умови	Запровадити інформування водіїв про погодні умови на маршруті, створити можливості для швидкої заміни маршрутів при виникненні складних погодних умов, забезпечити контроль за станом автомобіля, який виїжджає на маршрут при відомих складних погодних умовах, забезпечити навчання водінню в складних погодних умовах.
A27 Понаднормований графік роботи	Розробити та впровадити політику та процедури, які унеможливають понаднормовий графік роботи водіїв

Висновки та напрямки подальших досліджень. Процес ідентифікації НЧ передбачає визначення причини та джерел ризику, а також події та ситуації, які може мати загальні результати щодо цілей і характеру ПР. В сукупності – це є фундаментом для проведення обґрунтування дієвих запобіжних і захисних заходів. З даного прикладу виявлено шість основних НЧ, які мають найбільший вплив як на вірогідність настання інциденту, так і на важкість наслідків, що дозволяє в подальшому ретельніше провести дослідження саме цих факторів. Для цього слід звернути увагу вже на розвиток НП, оцінити дієвість всіх існуючих засобів контролю, наприклад,

специфікації конструкції, своєчасність надання домедичної допомоги та запропонувати саме ті, які дозволять значно знизити рівень ризику. Слід зазначити, що більшість відповідних НЧ взаємозалежні, що також потрібно враховувати при визначенні критеріїв вірогідності та тяжкості. Чим більше буде встановлено взаємозв'язків, тим вища повинна бути оцінка у порівнянні з іншими НЧ.

В даному дослідженні значення та масштаби критеріїв з оцінки ПР дозволили оцінити безпеку водія вантажного автомобіля при виконанні транспортної роботи. Використовуючи метод Dematel було проведено аналіз кожного НЧ за критеріями інших рівнів (однаковий, вищий і нижчий рівні) впливають на кожен із них. У цьому випадку виявлення найбільш ефективних і найбільш уражених критеріїв і розміри ризику виконуються з більшою точністю. Тому для виявлення та контролю усіх НЧ запропоновано два сприятливих результати зменшення шкоди, завданої небажаними наслідками.

Висновки та напрямки подальших досліджень:

розроблений реєстр НЧ, які включають шість типів факторів: людський, організаційний, технічний, операційний, соціальний, ергономічний та збільшують вірогідність настання НП ДТП;

запропоновано алгоритм для оцінки ПР водіїв автомобіля, який складається з восьми основних кроків, перші три присвячені процедурі ідентифікації небезпек, НЧ та ранжуванню останніх для виявлення чинників, які є причинами настання НП й тих, які будуть наслідками перших;

проведено оцінку ПР водія автомобіля, в якій виявлено, що основними НЧ, які впливають на настання ДТП є брак навичок розуміння системи та навичок прийняття рішення, недбалість дотримання перевірок безпеки на різних етапах виконання транспортної роботи, відсутність ефективного контролю за безпекою праці та відсутність належного передрейсового медичного контролю стану здоров'я водія, усунення яких значно зменшить рівень ПР під час виконання транспортної роботи вантажних автомобільних перевезень.

Список літератури

1. **World Health Organization. Road traffic injuries 2021.** Available at: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries#>.
2. **Official website of the European Union.** Road safety: 4 000 fewer people lost their lives on EU roads in 2020 as death rate falls to all time low. Available at: https://ec.europa.eu/transport/modes/road/news/2021-04-20-road-safety_en.
3. **Sayt patrol'noyi politsiyi Ukrainy.** Statystyka. Statystyka dorozhn'o-transportnykh pryhod za period 01.01.2020 po 31.12.2020 [Site of the patrol police of Ukraine. Statistics. Statistics of road accidents in Ukraine for the period from 01.01.2020 to 31.12.2020]. Available at: <http://patrol.police.gov.ua/statystyka/>. (In Ukraine).
4. **Kairatkyzy G., Karsybaev E.E., Abzhapbarova A.Z., Deryugin O.V., Bas I.K.** (2022). Improving the efficiency of trucking in the conditions of a mining enterprise, *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 3, 131-136. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-3/125>.
5. **Van de Vijver, F.J., Leung, K.** (2001). Personality in cultural context: methodological issues. *Journal of Personality*, 69(6), 1007-1031. <https://doi.org/10.1111/1467-6494.696173>.
6. **Osei, E.K., Amoh, G.E.A., Schandorf, C.** (1997). Risk ranking by perception. *Health Physics*, 72(2), 195-203. <https://doi.org/10.1097/00004032-199702000-00003/>.
7. **Tsopa V., Cheberiyachko S., Yavorska O., Deryugin O., Bas I.** (2022). Increasing the safety of the transport process by minimizing the professional risk of a dump truck driver. *Mining of mineral deposits*, 16(3), 101-108. <https://doi.org/10.33271/mining16.03.101>.
8. **Tsopa, V.A., Cheberiyachko, S.I., Yavorska, O.O., Deryugin, O.V. & Aleksiev, A.A.** (2022). Improvement of the safe work system. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, 6, 104-111. <https://doi.org/10.33271/nvngu/2022-6/104>.
9. **Di Cicco-Bloom, B., Crabtree, B.F.** (2006). The qualitative research interviews. *Medical Education*, 40(4), 314-321. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2929.2006.02418.x>.
10. **Gibbs, L., Kealy, M., Willis, K., Green, J., Welch, N., Daly, J.** (2007). What have sampling and data collection got to do with good qualitative research? *Australian and New Zealand Journal of Public Health*, 31(6), 540-544. <https://doi.org/10.1111/j.1753-6405.2007.00140.x>.
11. **Bazaluk, O., Koriashkina, L., Cheberiyachko, S., Deryugin, O., Odnoval, M., Lozynskyi, V. and Nesterova, O.** (2022). Methodology for assessing the risk of incidents during passenger road transportation using the functional resonance analysis method. *Heliyon*, 8(75), e11814. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e11814>.
12. **Li, C.W., & Tzeng, G.H.** (2009). Identification of a threshold value for the DEMATEL method using the maximum mean deentropy algorithm to find critical services provided by a semiconductor intellectual property mall. *International Journal of Expert Systems with Applications*, 36(1), 9891-9899. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.01.073>.
13. **Vujanovic, D., Momcilovic, V., Bojovic, N., & Papic, V.** (2012). Evaluation of vehicle fleet maintenance management indicators by application of DEMATEL and ANP. *Expert Systems with Applications*, 39(12), 10552-10563. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.159>

14. Saaty, T.L. (1996). The analytic network process. Arlington, United State: RWS Publications, Expert Choice, Inc.
15. Kuan, M.J., & Chen, Y.M. (2014). A hybrid MCDM framework combined with DEMATEL-based ANP to evaluate enterprise technological innovation capabilities assessment. Decision Science Letters, 3(4), 491-502. <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2014.6.003>
16. Гільперт В.В. Навчання ризик-менеджменту як інструмент для вдосконалення СУОП // В.В. Гільперт // Охорона праці. - 2019. - № 8. – С. 14-16.
17. Коноваленко Ю. Джерела та фактори транспортного ризику при здійсненні вантажних перевезень автомобільним транспортом / Ю. Коноваленко // Галицький економічний вісник. 2013. №2 (41). С. 1020.

УДК 621.316.925

А.В. ПИРОЖЕНКО, канд. техн. наук, доц., Е.О. МОДЛО, канд. пед. наук, доц.
Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій
Ю.В. ШЕРСТНЬОВ, аспірант
Криворізький національний університет

МІНІМІЗАЦІЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ КОРПУСУ КАР'ЄРНОГО ЕКСКАВАТОРА ПРИ ПОЗАШТАТНОМУ ТОРКАННІ ЙОГО КОВШЕМ КОНТАКТНОГО ДРОТУ

Мета. У статті розглянуто стан, необхідність та пропонуємо авторське рішення щодо способу зменшення електричного потенціалу корпусу екскаватора, котрий грузить видобуту гірничу масу в думпкарі при торканні його ковшем контактного дроту кар'єрної тягової електромережі з напругою живлення 10 кВ змінного струму.

Методи дослідження. В основі способу зменшення потенціалу запропоновано пристрій багаторазової дії з безконтактним тиристорним ключем.

Наукова новизна. Для захисту тиристорного ключа, з метою збільшення його стійкості від можливих амплітудних імпульсів перенапруги, запропоновано структурне включення в схему пристрою конденсатора, ємкість якого вибирається за умови, що за час включення тиристора напруга на ньому не повинна перевищувати максимально допустимий рівень за умови пробою тиристора, тобто повинна бути менше імпульса перенапруги.

Практична значимість. З метою недопущення негативного впливу конденсатора на процес відключення живлення при контакті і ковш екскаватора-контактна мережа запропоновано метод вибору відповідного рівня ємкості, що, в свою чергу, дозволяє визначити мінімально необхідне його значення, котре не буде впливати на швидкодію пристрою. Згідно необхідності дотримання відповідних пунктів правил безпеки в якості критерія відповідності взято той факт, що пристрій повинен витримувати струм короткого замикання, котрий потенційно може протікати через корпус екскаватора під час несанкціонованого торкання його ковшем контактного дроту на протязі часу спрацювання на відключення вимикача фідера тягової підстанції котра живить дану ділянку тягової мережі. Для цього, а також з метою запобігання виходу з ладу силових комутуючих тиристорів відповідного ключа від струмів коротких замикань, пропонується паралельне включення двох тиристорів в кожному його плечі з максимально допустимим значенням середнього струму не менше 1 кА.

Результати. Пропонуємо схемотехнічне рішення дозволяє пристрою захисту забезпечити необхідний рівень швидкодії – до $30 \cdot 10^{-6}$ с., що відповідає нормам електробезпеки.

Ключові слова: електробезпека, екскаватор, тягова електрична мережа, пристрій, захист, кар'єр.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-95-99

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. На відкритих гірничих роботах (кар'єри, рудники) України крім електрифікованого залізничного транспорту постійного струму з напругою живлення контактної мережі 1,65 та 3,3 кВ застосовується напруга 10 кВ змінного струму. Водночас саме контактні мережі нерідко являють собою джерело електротравматизму працюючих гірників.

Одним з найбільш одіозних джерел електротравматизму на відкритих гірничих роботах є екскаваторні забої, де здійснюється навантаження гірничої маси в думпкарі електрифікованого залізничного транспорту. Під час виконання вказаних робіт доволі часто трапляються торкання ковшем екскаватора контактного проводу. При цьому струм обмежений опором кола корпус екскаватора – рейки та опором заземлювального кола екскаватора і менше за уставку спрацювання максимально – струмового захисту фідера тягової підстанції. Небезпеку ураження електричним струмом обслуговуючого персоналу екскаватора представляють напруга доторкання до корпусу

екскаватора, що знаходиться під напругою контактної мережі, і крокова напруга, яка обумовлена розтіканням струму з екскаватора до рейок. Крім того високий потенціал виноситься на гірниче обладнання кар'єру, що зв'язане контуром заземлення з екскаватором, який торкнувся ковшем контактного проводу. Тривале існування аварійного струму під час торкання ковшем контактного проводу у разі не спрацювання максимально – струмового захисту фідера тягової підстанції приводить до перегорання заземлювальної жили живильного кабелю екскаватора, оскільки струм, що протікає через неї, на кілька порядків перевищує допустимий.

Таким чином, критичний стан безпеки під час навантаження гірничої маси в думпкарі електрифікованого залізничного транспорту підтверджує необхідність якнайшвидшого його вирішення.

Аналіз досліджень та публікацій. Відомі засоби зниження потенціалу корпусу екскаватора під час торкання ковшем контактного проводу [1-3] можна класифікувати на пристрої, що включають можливість торкання ковшем контактного проводу, який знаходиться під напругою; що вимикають контактну мережу з високою швидкістю під час аварійної ситуації; що знижують величину напруги доторкання до безпечного значення та обмежують її розповсюдження по загальній мережі заземлення.

По першому напрямку відомий пристрій, який дозволяє управління вимикачем фідера тягової підстанції з кабіни екскаватора по радіоканалу [1]. Часте вимикання електровозу від контактної мережі приводить до значного збільшення часу навантаження, і, крім того, суттєво збільшує знос його електрообладнання (компресора і т.д.). Крім того, складність та висока вартість пристрою не сприяли його широкому розповсюдженню.

По другому напрямку складність розробки пристроїв, що вимикають контактну мережу під час торкання ковшем контактного проводу полягає у тому, що струм при віддалені точки торкання від тягової підстанції на відстань більше 700 – 800 метрів сумірний з тяговими струмами, що не дозволяє будувати пристрої на амплітудному принципі [2]. Пристрої на фазному принципі схильні до хибних спрацювань під час перехідних процесів в контактній мережі (пуск електровозу, відрив його пантографу і т.д.) [3]. Складність розроблення пристроїв на накладеному оперативному струмі пов'язана з необхідністю побудови загороджувача, що перешкоджає проходженню оперативного сигналу через коло двигунів електровозу [4].

По третьому напрямку найбільш ефективний спосіб зниження небезпечних напруг доторкання – застосування захисного з'єднання корпусу аварійного екскаватора з рейками залізничної колії в момент торкання ковшем контактного проводу. Це дозволяє знизити потенціал корпусу екскаватора відносно землі до безпечного значення за час спрацювання вимикача на фідері тягової підстанції, який спрацьовує від сигналу максимально-струмового захисту, так як з'єднання корпусу екскаватора з рейками створює шлях струму короткого замикання. Необхідною умовою ефективності такої системи є забезпечення високої швидкодії спрацювання.

Реалізація такого захисного з'єднання для контактних мереж постійного струму напругою 1,65 та 3,3 кВ не представляє складнощів, оскільки може бути виконано на базі силового діода (або кількох паралельно вимкнених діодів) відповідного класу, катод якого підключають до рейок, а анод – до корпусу екскаватора [5].

Відомий пристрій для контактних мереж напругою 10 кВ змінного струму на базі серійного іскрового проміжку типу ІПМ-62 [6]. Однак це пристрій одноразової дії і після кожного торкання ковшем контактного проводу необхідно міняти іскровий проміжок, що викликає значні простої екскаватора та рухомого складу. Крім того, мають місце підривання іскрового проміжку, оскільки останній не розрахований на потужності короткого замикання.

Постановка задачі. Розроблення пристрою зниження потенціалу корпусу екскаватора під час торкання ковшем контактного проводу напругою 10 кВ змінного струму з необхідною швидкістю та застосуванням силового тиристорного ключа без послідовного включення тиристорів на напругу контактної мережі, стороннього джерела живлення та перетворювача напруги.

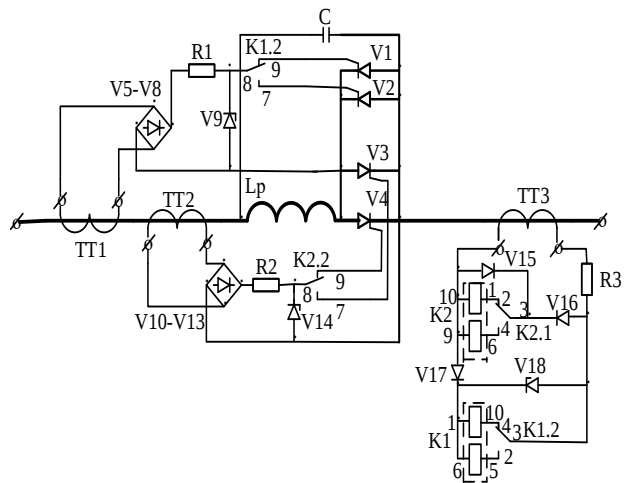
Викладання матеріалу та результати. Розроблений безконтактний пристрій багаторазової дії зниження потенціалу корпусу екскаватора під час торкання ковшем контактного проводу 10 кВ змінного струму типу ПЗПК-10, принципова схема якого наведена на рис. 1. Додатковими вигодами, що пред'являються до пристрою, є його мінімальні вагові показники та відсутність джерела живлення.

Під час торкання ковшем контактної мережі в момент амплітудного значення живлячої напруги ($U_m = 14\text{кВ}$), вона буде прикладена до тиристорного ключа пристрою. Для виключення виходу з ладу тиристорів вони повинні витримувати пряму напругу на протязі часу їх відкриття (30 мкс). Послідовне включення тиристорів на амплітудну напругу призводить до збільшення габаритів та вагових показників пристрою. Так, навіть при використанні тиристорів максимального класу за напругою (наприклад, 40-го класу) необхідно послідовне включення чотирьох вентилів у кожному плечі, а в цілому для ключа, враховуючі їх паралельне з'єднання, необхідно застосування 16 вентилів.

В запропонованому пристрої для виключення необхідності послідовного включення тиристорів паралельно тиристорному ключу V1-V4 включена ємність С. Ємність конденсатора С вибирається за умови, що за час включення тиристора напруга на ньому U_c не повинна перевищувати максимально допустиму за умови пробію тиристора, тобто повинна бути менше імпульсної напруги, що не повторюється, яка прикладається до тиристора в закритому стані (U_{nm}).

Рис.1. Схема електрична принципова пристрою

Оскільки тривалість періоду живлячої напруги контактної мережі на кілька порядків перевищує тривалість перехідного процесу включення тиристорів, то можна вважати, що їх включення відбувається при постійній напрузі, яка дорівнює амплітудному значенню напруги U_m контактної мережі. Крім того, правомочним припущенням є нехтування індуктивністю контактної мережі через її дециди у порівнянні з ємністю конденсатора С. Таким чином, умова не перевищення напруги на конденсаторі U_c граничного значення U_{nm} може бути записана нерівністю [7]



$$U_{nm} \leq U_m (1 - e^{-\frac{t_g}{R_n l_e C}}), \quad (1)$$

де R_n – питомий опір контактної мережі, Ом/км; l_e – відстань від тягової підстанції до місця знаходження екскаватора, км; C – ємність конденсатора, що ввімкнений паралельно тиристорному ключу, Ф; t_g – час включення тиристора, с.

Для того, щоб ввімкнення конденсатора С між екскаватором та рейками не погіршувало умови безпеки, його ємнісний опір повинен бути на порядок вищим за опір кола екскаватор - рейки, тому ємність конденсатора С, що вибирається за умови (1), повинна бути мінімально необхідною.

Вирішуючи нерівність (1) відносно С та вводячи коефіцієнт запасу k_3 , отримаємо умову для вибору ємності конденсатора [8]

$$C = \frac{k_3 t_g}{R_n l_e \ln \frac{U_m}{U_m - U_{nm}}}, \quad (2)$$

де k_3 – коефіцієнт запасу.

Як показали дослідження, достатнім значенням коефіцієнту запасу є $k_3 = 1,1$.

Величина ємності, згідно проведених досліджень, повинна бути 20-25 мкФ, а її максимальна допустима напруга – не нижче класу тиристорів. Наявність ємності дозволяє обмежити швидкість наростання напруги на тиристорах до допустимих величин (менше 200 В/с). Крім того, включення ємності паралельно ключу дозволяє сформувати випереджуючий сигнал управління тиристорами від трансформаторів струму в момент кидку ємнісного струму при торканні ковшем контактної мережі, що, у свою чергу, дозволяє форсувати включення тиристорів.

Пристрій повинен витримувати струм короткого замикання через корпус екскаватора під час торкання ковшем контактної мережі на протязі часу спрацювання вимикача фідера тягової підстанції (максимальне значення має масляний вимикач - 0,2 с). Для цього, як показали

дослідження, необхідно паралельне включення двох тиристорів у кожному плечі ключа з максимально допустимим середнім струмом у відкритому стані не менше 1000 А. Для рівномірного розподілення струмів під час паралельної роботи тиристорів необхідно застосування зрівняльних реакторів, що призводить до збільшення вагових та габаритних показників пристрою. Крім того, зрівняльні реактори збільшують сумарний опір силового кола пристрою та допускають значний перерозподіл струмів у паралельно включених транзисторах [9]. Оптимальним рішенням є поєднання включення тиристорів у кожен напівхвилю робочої напруги, що реалізовано переключенням їх керуючих електродів поляризованими реле типу РПС (К1 та К2), що живляться від трансформатора струму ТТЗ.

Швидкість наростання струму під час короткого замикання, враховуючи величину розподіленої індуктивності контактної мережі, менше за гранично допустиму. Однак при наближенні місця короткого замикання до тягової підстанції, ця величина може перевищувати гранично допустиму. Крім того, необхідно обмежити швидкість наростання струму розряду конденсатора, оскільки він розряджається на коротко через тиристори. З цією метою послідовно з тиристорами у коло розряду ємності включена індуктивність (реактор) L_p . Як показали дослідження, індуктивність реактора повинна складати не менше 0,6 мГ та практично реалізована намоткою 20 витків жили екскаваторного кабелю на металевий трубчастий корпус пристрою діаметром 250 мм.

Пристрій працює наступним чином. Під час торкання ковшем контактної мережі в момент амплітудного значення живлячої напруги контактної мережі (U_{kc} , рис.2), що є найбільш важким режимом включення пристрою, через розряджений конденсатор С (нульові початкові умови) відбувається стрибок ємнісного струму по колу екскаватор – рейки, який викликає практично миттєве формування одиничного імпульсу на виході трансформаторів струму (U_{tt} рис.2). Сформований імпульс через випрямні мости V5-V8, V10-V13 та струмообмежуючі резистори R1,R2 поступає на керуючі електроди тиристорів V1-V4, паралельно яким для обмеження напруги імпульсу керування включені стабілітрони V9,V14 (U_{v9} , U_{v14} , рис.2). Таким чином, відбувається випереджаюче формування імпульсу керування тиристорами, тобто імпульс керування виявляється сформованим практично при нульовому значенні напруги на тиристорному ключі, що забезпечує відкривання одного з тиристорів тиристорного ключа до досягнення на ньому напруги пробою, а це, у свою чергу, дозволяє уникнути послідовного включення тиристорів на напругу контактної мережі. У подальшому відбувається заряд конденсатора С, і, отже, експоненціальне наростання напруги на тиристорному ключі до моменту його відкривання ($U_{вк}$ рис.2).

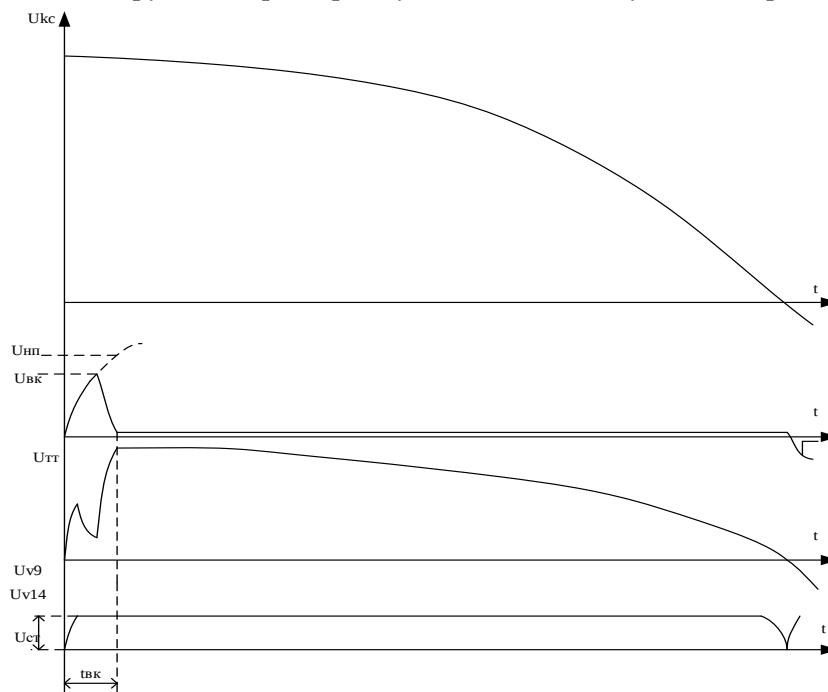


Рис.2. Часові діаграми роботи пристрою

Технічні характеристики пристрою

Номінальна напруга змінного струму, кВ.....10

Максимальний струм короткого замикання, що встановився, кА.....	10
Час існування струму короткого замикання, не більше, с.....	0,2
Напруга спрацювання, В.....	200-300
Максимальний час спрацювання, с.....	$30 \cdot 10^{-6}$

Висновки та напрямки подальших досліджень. Прийняті рішення під час розроблення пристрою дозволяють уникнути необхідності послідовного включення тиристорів на напругу контактної мережі, а також використання стороннього джерела живлення та перетворювача напруги у поєднанні з високою швидкодією, яка не перевищує $30 \cdot 10^{-6}$ с. Подальші дослідження доцільно направити на безконтактне переключення керуючих електродів тиристорного ключа кожні півперіоду живлячої напруги.

Список літератури

1. Бурьяноватый А.И., Кондаков А.Д., Мизинцев А.В. Защита электротяговых сетей переменного тока на основе интеллектуальных терминалов / – СПб.– ПГУПС, 2003.– 111 с.
2. Баженов В. Н. Релейная защита элементов электроэнергетической системы: пособие для практических расчетов / Х.: ПланетаПринт, 2018. – 92 с.
3. Пироженко А.В. Метод расчета изменений фазового угла переменной составляющей выпрямленного тока при переходных процессах в контактных сетях. В кн.: Безопасность труда в горнорудной промышленности. – М., Недра, 1987. С.13-15. (Всесоюз. науч.-исслед. ин-т безопасности труда в горнорудной пром-сти).
4. Серов В.И. Методы и средства борьбы с замыканиями на землю в высоковольтных системах горных предприятий. М.: 1985.- 97 с.
5. Щуцкий В.И. Защитное шунтирование однофазных повреждений электроустановок. М.: Энергоатомиздат, 1986.-124 с.
6. Проміжок іскровий ПІМ-62. Сімферопольський електротехнічний завод. ТУ 3185-005-00184939-2014.
7. Пироженко А.В., Ликаренко А.Г.,Новиков И.А.,Ющенко С.И. Устройство для снижения потенциала корпуса экскаватора при касании ковшом контактного провода. А.С. 1614064 СССР, МКИ Н02Н3/14. - №444794/24-07. Заявлено 04.04.88. Опубл.15.12.90. Бюл. № 46.
8. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике для научных работников и инженеров: Пер. с англ. - М.:Наука, 1973. - 831с.
9. Пироженко А.В., Ликаренко А.Г. Устройство для поочередного управления параллельно включенными тиристорными ключами. А.С. 1525831 СССР, МКИ Н02М1/08. - №422706/24-07. Заявлено 13.04.87. Опубл.30.11.89. Бюл. № 44.
10. В.М.Кутін Параметри контактних тягових мереж змінного струму залізничних кар'єрів. /В.М.Кутін – Warsak: iScience Sp.2.0.0-2020.-251с.

УДК 622.34: 658.38

О. Є. ЛАПШИН, д-р техн. наук, проф., С.Л. КОВАЛЕНКО, магістр
Криворізький національний університет

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ПРИ ОБСЛУГОВУВАННІ МАЙДАНЧИКА ВИВАНТАЖЕННЯ РУДИ ТА РЕМОНТІ КОНУСНИХ ДРОБОРОК В КАР'ЄРІ

Мета. Зниження впливу шкідливих та небезпечних виробничих факторів на робочих місцях ремонтно-технологічного персоналу, підвищення безпеки праці під час ремонту конусних дробарок в кар'єрі.

Методи дослідження. Наукове узагальнення і аналіз літературних джерел, промислові дослідження, використання прийнятих законодавчих актів, настанов і виконання регламентованих положень з безпеки праці в гірництві.

Наукова новизна. Наведено наукове обґрунтування параметрів системи коагуляції рудникового пилу гідродисперсним аерозолем у вигляді туману та способу механізованого очищення приймального бункера з використанням пневмогідравлічної щітки.

Практичне значення полягає в розробці куполоподібного укриття, обладнаного системою утворення гідродисперсного аерозолу над приймальним бункером дробарки для запобігання виділення пилу та механізованого способу очищення приймального бункера конусної дробарки за допомогою пневмогідравлічної щітки. В проєкті організації робіт розроблені заходи, що дозволяють зменшити забруднення повітря, поліпшити умови праці і підвищити рівень безпеки на промисловому майданчику вивантаження гірської маси в кар'єрі.

Економічна доцільність від впровадження розроблених комплексних заходів полягає у зменшенні грошових витрат, пов'язаних з простоем основного виробничого обладнання.

Технічний результат від використання запропонованих заходів полягає в поліпшенні умов праці на території промислового майданчику вивантаження гірської маси та підвищення безпеки при ремонті конусних дробарок в кар'єрі.

Результати. Розроблено проект куполоподібного укриття, обладнаного системою утворення гідродисперсного аерозолю над приймальним бункером дробарки.

Розроблено механізований метод очищення приймального бункеру конусної дробарки від шару налиплої гірничої маси з використанням пневмогідролічної щитки.

Розроблено проект організації робіт, який містить опис технології виконання робіт та комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на поліпшення умов праці та підвищення безпеки під час виконання робіт з ремонту конусних дробарок в кар'єрі.

Визначена економічна доцільність впровадження розроблених заходів у виробництво.

Ключові слова: безпека, майданчик, конусна дробарка, приймальний бункер, забруднення повітря.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-99-104

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Циклічно-поточна технологія на гірничо-збагачувальних комбінатах до теперішнього часу передбачає при подрібненні гірської маси в кар'єрі застосування дробарок конусного типу крупного дроблення з діаметром конуса 900 мм і більше. Гірська маса потрапляє в приймальний бункер дробарки безпосередньо з залізничних вагонів або спеціальних автосамоскидів з наявністю великої кількості негабариту і пилових фракцій. Процес вивантаження у приймальний бункер дробарки руди супроводжується виділенням в атмосферу рудникового пилу, який є полідисперсний. Під час вивантаження руди з самоскидів спостерігається виділення пилу у великій кількості. В результаті цього, на поверхні майданчика вивантаження гірничої маси та приймального бункеру дробарки спостерігається забруднення повітря, при цьому концентрація пилу перевищує допустимі значення. Крім цього, відбувається налипання гірської маси з утворенням щільного шару товщиною понад 50-100 мм у верхній частині приймального бункера дробарки. Налиплий шар гірської маси унеможливує безпечно здійснювати ремонтні роботи, які полягають в заміні футерувальних плит, чаші та поверхні дробильного конусу дробарки.

Видалення налиплого шару гірської маси з поверхні приймального бункера дробарки здійснюється без використання засобів механізації, при цьому працюючі використовують запобіжні пояси і страховочні канати, перебуваючи тривалий час в безопорному просторі. Для забезпечення сталої роботи конусних дробарок складається та затверджується у встановленому порядку графік планово-попереджувальних ремонтів.

Виходячи з таких обставин вирішення питання поліпшення умов праці та підвищення безпеки на території промислового майданчика вивантаження гірської маси та ремонту конусної дробарки є актуальним науковим і практичним завданням.

Вирішення цих питань пропонується шляхом розроблення ремонтно-технологічної документації виконання ремонтних робіт з додержанням заходів безпеки та знепилення повітря шляхом утворення куполоподібного укриття, обладнаного системою утворення гідродисперсного аерозолю у вигляді туману над приймальним бункером дробарки, а очищення поверхні приймального конуса дробарки від налиплого шару гірської маси здійснювати із застосуванням гідропневматичної форсунки та використанням для працівника підвісної робочої площадки з дистанційним управлінням.

Згідно ремонтно-технологічної документації, першим етапом по підготовці конусної дробарки до виконання ремонтних робіт з заміни основних вузлів та агрегатів є очищення верхньої частини приймального бункера дробарки від налиплого шару гірської маси.

Аналіз досліджень і публікацій. Станом на сьогоднішній день, очищення майданчика вивантаження гірничої маси та приймального бункера дробарки від налиплого шару гірської маси виконується вручну, бригадою ремонтно-технологічного персоналу [1].

Персонал, за допомогою страховального канату, з застосуванням лямкового поясу спускається до приймального бункеру дробарки. Роботи виконуються за допомогою ручного інструменту.

Існуючий спосіб супроводжується ризиками високого рівня, а саме: можливості падіння робітника з висоти, травмування ручним інструментом ударної дії, потрапляння сторонніх предметів в середину дробарки.

Очищення приймального бункера дробарки існуючим способом допускає знаходження працівників в умовах впливу рудникового пилу та фізичного навантаження, що перевищує нормативні показники [2].

Результати аналізу досліджень існуючих умов праці на промисловому майданчику вивантаження гірничої маси в приймальний бункер конусної дробарки свідчать про високу запиленість повітря та небезпеку під час очищення верхньої частини бункера без засобів механізації [3].

Відомі способи боротьби з пилом в рудникових кар'єрах, які передбачають зрошення гірської маси перед початком її завантаження в самоскиди [2].

Недоліком відомого способу є те, що він технічно недосконалий. По-перше, відбувається зрошення лише верхнього шару відбитої гірської маси, а по-друге, виникає питання перезволоження руди, що не дозволяється технічними умовами збиту товарної продукції.

Найбільш близьким до вирішення існуючого питання є обладнання аспіраційної системи знепилення приймальних бункерів дробарок з використанням відсмоктувальних трубопроводів і потужних вентиляторів [3].

Недоліком цього способу є те, що він потребує утворення у приймальному бункері дробарки високого розрідження, яке можливо лише за ретельною герметизацією бункера. Оскільки бункер під час розвантаження самоскидів залишається відкритим, то спостерігається викид забрудненого повітря шляхом витискання його падаючою гірською масою.

Відомий спосіб очищення поверхні каменя, скла металевих виробів шляхом руйнування поверхні піском або іншим абразивним порошком, який розпиляється струменем повітря [8].

Недоліком відомого способу є те, що він потребує використання абразивного матеріалу розміром 0,2-1,0 мм, який транспортується стислим повітрям на невелику відстань, випускний елемент необхідно тримати постійно в руках, він не управляється дистанційно.

В основу запропонованого способу очищення налиплого шару гірської маси на поверхню приймального бункера конусної дробарки в кар'єрі поставлена задача вдосконалення існуючого способу шляхом руйнування налиплого шару струменем водопровідної суміші, утвореної гідропневматичною форсункою [7].

Постановка задачі. Метою цього дослідження є розробка заходів поліпшення умов праці та підвищення безпеки на майданчику вивантаження руди та ремонті конусних дробарок в кар'єрі.

Викладання матеріалу та результати. Згідно ремонтно-технологічної документації, першим етапом з підготовки конусної дробарки до виконання ремонтних робіт з заміни основних вузлів та агрегатів є очищення верхньої частини приймального бункера дробарки від налиплого шару гірської маси. Вміст пилу, разом з вмістом вільного диоксиду кремнію від 10% до 70%, в повітрі робочої зони в 4, 8 разів перевищує ГДК - 2,0 мг/м³.

Очищення налиплою гірської маси, яке здійснюється без засобів механізації, характеризується важкістю праці. Так, величина статичного навантаження за зміну при утриманні вантажу двома руками становить 70920 кг/с, при нормі 70000 кг/с; нахили тулуба (вимушені), більше 30° до 135 разів за зміну при допустимих 51-100 разів; періодичне перебування у незручній робочій 31,4% зоні при допустимому до 25% (згідно з вимогами Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу», затверджених наказом МОЗ України від 08.04.2014 №248). У разі виникнення нещасного випадку на майданчику вивантаження гірничої маси, на період надання екстреної, невідкладної медичної допомоги потерпілому, допускається зупинення основного виробничого обладнання [9-12].

Проведений аналіз ремонтно - технологічної документації засвідчив, що роботи виконуються з порушенням «Правил охорони праці під час дроблення і сортування, збагачення корисних копалин і огрудування руд та концентратів», а саме: відсутній опис покрокового виконання робіт з чітким розподіленням ролі та обов'язків виконавців робіт; відсутній методичний контроль виконання робіт на висоті; відсутні додаткові елементи захисту від падіння з висоти; відсутній опис виконання вантажно-розвантажувальних робіт та вимоги до їх виконання; відсутні графічні зображення схем стропування вантажів; відсутні вимоги з електробезпеки, пожежної безпеки та виробничої санітарії; відсутні дії персоналу у разі виникнення аварійної ситуації.

Усунення виявлених недоліків та ризиків високого рівня під час виконання очищення майданчика вивантаження гірничої маси та приймальної ворони конусної дробарки стало головною

метою розробки комплексних заходів, спрямованих на поліпшення умов праці та підвищення безпеки при обслуговуванні майданчика вивантаження гірської маси та ремонті конусних дробарок в кар'єрі.

Першим заходом, направленим на підвищення безпеки праці під час обслуговування майданчика вивантаження гірничої маси та ремонті конусних дробарок в кар'єрі є розробка проекту виконання робіт з очищення майданчика вивантаження гірничої маси та приймального бункера конусної дробарки від налиплого шару гірської маси.

Проект організації робіт далі ПОР містить методичні матеріали для ремонтно-технологічного персоналу при організації, підготовці та виконанні робіт з очищення майданчика вивантаження гірничої маси та приймальної вирви конусної дробарки ККД 1500/180 від шару налиплої гірничої маси.

ПОР розроблений на підставі аналізу існуючих умов праці та оцінки ризиків, визначних в ході проведення цільового аудиту безпеки місця проведення робіт.

В цьому проекті розроблені заходи щодо усунення виявлених недоліків та порушень вимог охорони праці, промислової та екологічної безпеки, а саме: порядок послідовного виконання робіт з покроковим описанням дій осіб, відповідальних за безпечне проведення робіт; заходи безпеки під час виконання вантажно – розвантажувальних робіт, схеми стропування та складування вантажів; заходи безпеки під час виконання робіт на висоті та інструкція з охорони праці для безпечного спуску та підйому працівників по похилим поверхням укосів приймального бункера конусної дробарки ККД 1500/180 з застосуванням затискача типу «жумар»; заходи з електробезпеки; порядок очищення майданчика вивантаження гірничої маси та приймального бункера дробарки від шару налиплої гірської маси механізованим способом з використанням пневмогідравлічної щитки та мостового вантажопідйомного крану.

Порядок очищення майданчика вивантаження гірничої маси та приймального бункера дробарки від шару налиплої гірської маси механізованим способом передбачає виконання робіт без спуску ремонтно-технологічного персоналу в приймальний бункер дробарки, тим самим повністю виключаються ризики падіння персоналу з висоти.

Роботи виконуються у наступному порядку:

стропальник виконує стропування робочої площадки підвісної типу ЛПІ-3-500 згідно схеми стропування вантажів;

в робочу площадку поміщується працівник (виконавець робіт). Карабін страхувального канату якого, кріпиться до відповідної скоби, розташованої на площадці;

до площадки кріпляться дві відтяжки відповідного розміру;

працівник (виконавець робіт) бере з собою гідропневматичну щитку та подає команду машиністу крана на переміщення площадки в зону виконання робіт;

машиніст крану попередньо піднімає площадку на висоту від 200 мм до 300 мм для перевірки правильності стропування та надійності дії гальма;

за умовним сигналом машиніст крану переміщає площадку в місце проведення робіт;

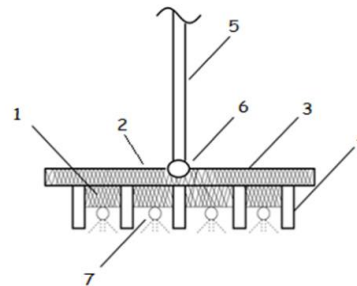
під час переміщення до місця робіт, виконавець робіт, що знаходиться в площадці слідкує за натяжкою гнучкого трубопроводу гідропневматичної щитки;

виконавець робіт, за допомогою телескопічної труби, на кінці якої розташована гідропневматична щитка, встановлює щитку на місце зосередження шару налиплої гірської маси;

виконавець робіт відкриває падаючий вентиль, розташований на гнучкому трубопроводі, та починає виконувати очистку укосів щіткою, яка здійснює руйнування налиплого шару гірської маси струменем водоповітряної суміші.

Механізований метод очищення майданчика вивантаження гірничої маси та приймальної вирви дробарки від шару налиплої гірської маси передбачає виключення важких і небезпечних умов праці під час ремонту дробарок, зниженню дії впливу рудникового пилу та фізичного навантаження, що перевищує нормативні показники. Зовнішній вигляд гідропневматичної щітки наведений на рис 1.

Рис 1. Зовнішній вигляд гідропневматичної щітки: 1 – футляр; 2 – запобіжна кришка; 3 – наскрізні отвори; 4 – рівновеликі відрізки металевго дроту Π – подібні форми; 5 – телескопічна труба $\varnothing = 32$ мм з легко сплавного матеріалу; 6 – шарнірне з'єднання; 7 – форсунки



Для здійснення ефективного методичного контролю виконання робіт на висоті в ПОР визначена обов'язкова присутність представника спеціалізованої об'єктової аварійно-рятувальної служби (далі СОАРС) та спеціального автомобіля, укомплектованого необхідним аварійно-рятувальним спорядженням.

Представник СОАРС перед початком та у процесі виконання робіт здійснює методичний контроль виконання робіт на висоті, навчає та демонструє виконавцям робіт безпечні прийоми виконання робіт на висоті, контролює їх виконання.

Керівник робіт перед початком та в ході їх виконання перевіряє достатність заходів безпеки на робочих місцях, дотримання виконавцями робіт інструкцій з охорони праці, внутрішніх стандартів підприємства та справжнього ПОР.

Інженер з охорони праці (лінійний контроль) здійснює загальний контроль дотримання вимог охорони праці, промислової та екологічної безпеки під час виконання робіт.

Технічні рішення в ПВР, розроблені відповідно до вимог охорони праці, промислової та екологічної безпеки.

Другим заходом, направленим на підвищення безпеки праці під час обслуговування майданчика вивантаження гірничої маси та ремонті конусних дробарок в кар'єрі є розробка концепції попередження нещасних випадків на виробництві.

За минулі періоди роботи гірничо – збагачувальних підприємств простежується тенденція, що причиною всіх нещасних випадків є неякісно та не в повному обсязі проведена оцінка ризиків перед початком виконання робіт.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Вивантаження гірської маси з самоскидів в приймальний бункер дробарки супроводжується виділенням пилу, який розповсюджується по території майданчика і кар'єру.

Для запобігання викиду забрудненого повітря в атмосферу приймального майданчика запропоновано гідрозахисний купол над бункером конусної дробарки, що дозволяє зменшити надходження шкідливого пилу в кар'єрний простір.

Запропоновано проект організації робіт (ПОР) при здійсненні ремонту конусної дробарки в кар'єрі, впровадження якого дозволить уникнути травмування працюючих, поліпшити умови праці та підвищити культуру виробництва в кар'єрі.

Запропоновано конструкцію гідропневматичної щітки, застосування якої дозволить зменшити виділення пилу при руйнуванні налиплиго шару гірської маси та поліпшити умови праці на приймальному майданчику вивантаження руди в бункер дробарки.

Список літератури

1. Лапшин О.Є., Лапшин О.О., Лапшина Д.О. Охорона праці в гірництві. - Кривий Ріг. «КНУ» 2018.- 274 с.
2. Лапшин О.Є., Лапшин О.О., Лапшина Д.О. Охорона рудникового повітря. - Кривий Ріг. «КНУ» 2017. - 196 с.
3. Лапшин О.Є., Лапшин О.О. та ін. Вентиляція промислових приміщень. - Кривий Ріг. «КНУ» 2022. - 262 с.
4. Лапшин, О.О., Лапшин О.В., Пищикова О.В. та ін. Збірник лабораторних і практичних робіт з охорони праці та цивільної безпеки - Кривий Ріг. «КНУ» 2021. - 225 с.
5. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. – К.: Мінрегіонбуд України. – 2011.–127 с.
6. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування. – К.: Мінрегіонбуд України. – 2013. – 240 с.
7. Лапшин О.Є., Коваленко С.Л. Пат. на корисну модель 152013 Україна МПК В02С 23/00. Спосіб очищення зовнішнього конуса дробарки в кар'єрі від налиплої гірської маси - заявник і патентовласник Криворізький національний університет. Опубл. 12.10. 2022. Бюл. № 41.
8. Никольський Б.П. Справочник химика. – Л.: Химия, 1971. – С. 368.
9. Закон України Про охорону праці: Закон України від 14.10.92 № 2695-ХІІ // Відомості Верховної Ради України. – 1992. № 49. – Ст. 668.
10. Загальнодержавна соціальна програма поліпшення стану безпеки, гігієни праці та виробничого середовища на 2014-2018 роки: Закон України від 04.04.2013 № 178-VII // Відомості Верховної Ради України. – 2014. № 10. – Ст. 112.
11. Системи управління гігієною та безпекою праці: Національний стандарт України ДСТУ ОHSAS 18001:2010 від 27 грудня 2010 р. № 594 // ДЕРЖСПОЖИВСТАНДАРТ України. – 2011. – Ст. 20.

УДК 628.8

В.В. САВІН, асистент, П.С. КІРІЧЕНКО, канд. техн. наук, доц.
Криворізький національний університет

РЕКУПЕРАТОРИ ЯК ШЛЯХ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ МЕХАНІЧНОЇ ВЕНТИЛЯЦІЇ В ПИТАННІ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ БУДИНКІВ

Мета. Стаття присвячена вивченню рекуператорів у ролі забезпечення ефективності системи вентиляції в будинках з погляду енергозбереження. Метою є представлення результатів технічного огляду деяких видів рекуперативних припливно-витяжних систем механічної вентиляції, відповідно до концепції та класифікації на основі будови рекуператора і напрямку руху потоку повітря, які допомагають зменшити споживання енергії *та*, з точки зору санітарно-гігієнічних норм, повністю забезпечують баланс тепла і холоду, вуглекислого газу та кисню в будинку під час опалювального сезону.

Методи. Результати, наведені у статті, отримані з використанням методів, різних за напрямом і масштабом охоплення предмету дослідження: узагальнення результатів попередніх досліджень, комплексного аналізу, логіко-структурного аналізу, науково-аналітичного аналізу тощо.

Наукова новизна. Огляд типів рекуператорів тепла, їх переваг та недоліків, дозволяє систематизувати наявні дані та тенденції застосування у використанні рекуператорів у вентиляційних системах будинків, дає можливість фахівцям швидко ознайомитися з можливими варіантами в одному джерелі та допоможе дослідникам розширити основні типи рекуператорів.

Практична значимість. Представлена стаття виступає значним методичним підґрунтям при виборі найбільш ефективних рекуператорів тепла для припливно-витяжних систем вентиляції та надає змогу зрозуміти, який рекуператор краще підходить для конкретного типу будинку або приміщення залежно від особливостей, умов використання, вимог до якості повітря та енергоефективності. Викладена інформація допоможе визначитися з оптимальним типом рекуператора для будинку з вимогами до якості повітря та енергоефективності, що дозволить забезпечити максимально комфортні умови для проживання, та з формуванням порівняльної бази для розроблюваних конструкцій рекуператорів тепла вентиляційного повітря.

Результати. Наведено основні переваги та недоліки найбільш популярних на ринку України рекуператорів теплоти, що дозволяє підібрати оптимальний варіант для конкретної ситуації. Стаття буде корисною для будівельників, проектувальників, інженерів та всіх, хто цікавиться ефективним використанням енергії та зменшенням витрат на опалення та кондиціювання приміщень.

Ключові слова: вентиляція, рекуператор, тепло, теплообмінник, енергоощадність, енергоефективність.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-104-109

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Будь-якому закритому приміщенню необхідне щоденне провітрювання, але часто його не вистачає для забезпечення необхідного мікроклімату та комфорту. Особливо це стосується холодної пори року, коли звичайне провітрювання призводить до швидкої втрати тепла в будинку та зайвих енерговитрат на відновлення необхідної температури

Однією з основних характеристик енергетичної ефективності будівель прийнято вважати питому витрату енергії на опалення та вентиляцію 1 м² приміщень на рік. Ми значно відстаємо від більшості європейських країн за цим показником. На жаль, темпи зниження питомої витрати тепла на опалення недостатньо високі. У цього є багато причин, але однією з основних є недостатнє використання в масовому будівництві сучасних енергозберігаючих технологій та висока вартість нових розробок порівняно з тими, що вже використовуються. Очевидну необхідність підвищення енергетичної ефективності вітчизняної будівельної галузі вкотре підтверджує досвід енергозбереження, накопичений у Європі та США.

Метою всіх нових розробок є використання меншої кількості енергії для забезпечення того самого рівня енергопостачання будівель. Проблема енергозбереження актуальна для системи вентиляції. Разом з видаленим повітрям втрачається велика кількість тепла, що не бажано. Це

завдання легко вирішується за рахунок встановлення рекуператорів тепла у системі вентиляції, які підігрівають холодне припливне повітря за рахунок теплого витяжного повітря.

Аналіз досліджень і публікацій. Виходячи з розглянутої літератури можна сказати, що велика кількість енергії втрачається через опалення, кондиціювання повітря та вентиляцію, тому дуже важливо відновити цю енергію шляхом впровадження системи рекуперації тепла для будинків. Крім того, ця технологія пропонує оптимальне рішення: свіже повітря, кращий клімат-контроль та енергоефективність. Термін "рекуперація" (від латинського "recuperare" - відновлювати, повертати) в галузі техніки та інженерії був введений у вжиток у XIX столітті і визначається як процес передачі енергії від високотемпературного потоку до низькотемпературного потоку, що є ефективним і економічним у експлуатації. Рекуперація тепла в будівництві набуває широкого застосування в деяких європейських країнах, особливо у високоширотних країнах, таких як Німеччина та Швеція [6]. Енергоефективність будівлі можна підвищити за рахунок підвищення її герметичності, вимірювання якої різними методами може мати різні похибки [7]. Збільшення герметичності призводить до значної економії енергії [8], і чим краще теплоізоляція будівлі, тим більше економія енергії. Необхідність здорових умов у приміщенні, енергетична криза та екологічні проблеми роблять системи вентиляції будівель дуже важливими сьогодні. Елементи систем вентиляції для зниження енергоємності постійно є предметом багатьох наукових досліджень. Дуже популярним рішенням для рекуперації тепла є використання пластинчастого теплообмінника, енергетичні ефекти якого проаналізовано, наприклад, у [9]. Проблема конденсації водяної пари в такому теплообміннику експериментально досліджена в [10]. Автори [11] розглянули мембранні теплообмінники, їх конструкцію та ефективність роботи за різних умов. Іншим способом рекуперації тепла з відпрацьованого повітря є використання акумулюючого роторного теплообмінника, для якого автори [12] відзначають, що його ефективність знижується поздовжньою теплопровідністю.

Дуже цікавим і комплексним способом рекуперації тепла з відпрацьованого повітря є система [13], технологія якої заснована на використанні припливної установки з високоефективним рекуператором тепла, системи охолодження фотопанелей і попереднього підігріву свіжого повітря за допомогою вентиляційного повітря. Додатковим ефектом є підвищення ефективності фотоелектричних панелей і збільшення виробництва електроенергії. Системи вентиляції з так званним «забірником теплого повітря», де свіже повітря втягується через закнений елемент, який отримує сонячне тепло, описано в статті [14]. Повний огляд різних типів технологій рекуперації тепла відпрацьованого повітря опубліковано в [15]. Особливу увагу автори приділяють проблемі обмерзання приладів у холодному кліматі. У [16] представлена система рекуперації тепла, об'єднана з тепловою трубою з контуром, що керується насосом, і тепловим насосом. У роботі [17] представлена типова система рекуперації тепла внутрішнього повітря на основі компресорного теплового насоса, встановленого всередині вентиляційної установки.

Постановка задачі. Враховуючи актуальність питання зменшення споживання електричної енергії метою роботи є технічний огляд найбільш популярних на ринку України рекуператорів теплоти.

Викладення матеріалу та результати. Сьогодні акцент при проектуванні сучасних будівель приділяється не тільки технічно функціональним, але й енергоефективним будівлям. Проблема енергозбереження актуальна для систем, які використовуються в будівлі. Ціни на енергоносії у світі високі, тому ідея енергозбереження проникла у всі сфери будівництва, в тому числі в проектування та створення систем вентиляції. Фінансова економія контролюється шляхом оптимізації споживання ресурсів. Комфортний мікроклімат в приміщенні є однією з важливих складових життєзабезпечення всієї будівлі. Саме сприятливий мікроклімат сприяє підтриманню нормального теплового стану організму людини, забезпечує тепловий комфорт і створює передумови для високого рівня працездатності. Фахівці стверджують, що розрахований запас енергії для обігрівачів і вентиляторів в системах механічної вентиляції старих будинків значно перевищує електроенергію для освітлення. Енергозберігаючі заходи в системах вентиляції сьогодні є перспективним завданням. Економія коштів при експлуатації - актуальна проблема. Створення економічно ефективних і енергоефективних систем вимагають абсолютно нових підходів і знань від професіонали дизайну.

Один із пристроїв, що є популярним останнім часом - рекуператор повітря. Як відомо, під час провітрювання приміщення відбуваються великі втрати тепла, а завдяки роботі цього

приспособлення їх можна уникнути, тим самим зменшити навантаження під час опалювального процесу. Головне завдання такого апарату полягає у поверненні теплової енергії, втраченої через систему вентиляції, а основною функцією- отримання корисної енергії від повітря, що видаляється з приміщення, за умовою, що потоки не повинні змішуватися, тобто припливне повітря не повинно хоч скільки-небудь значно забруднюватися відпрацьованим витяжним повітрям.

За напрямком руху повітряних потоків рекуператори розрізняють:

перехреснотечійні рекуператори, потік рухається спрямовано перпендикулярно один одному;

протитечійні рекуператори, потік рухається протилежно відносно один одного;

прямотечійні рекуператори, потік рухається паралельно та односпрямовано.

Залежно від температури теплоносія рекуператори розрізняють:

високотемпературні (температура теплоносія від 600 °C і вище);

середньотемпературні (температура теплоносія від 300 °C до 600 °C);

низькотемпературні (температура теплоносія до 300 °C).

Необхідність виробництва таких рекуператорів викликана тим, що в умовах деяких виробничих процесів температура теплоносія може бути різною, і діапазон її значень досить великий.

За типом матеріалу теплообмінника:

керамічний; ефективно акумулює тепло, має тривалу тепловіддачу, не боїться вологи;

мідний; швидко реагують на зміну температури - охолоджуються і нагріваються, але також швидко конденсують у вологому середовищі;

алюмінієвий; ознаки такі ж, як і у мідного;

пластиковий; застосовується не так давно і досить рідко;

целюлозний; працює за умов низької та середньої вологості, і завдяки цьому підтримує її рівень в приміщенні, не сушить повітря, чутливий до вологи, замерзає при температурі близько -5 °C.

Класифікація рекуператорів за будовою та теплоносієм - найбільш розповсюджена, при цьому комплексна та всеохопна. Саме конструктивне рішення та тип теплоносія, як правило, визначають основні властивості та принцип роботи приладу. Розглянемо найпоширеніші види рекуператорів.

Роторні рекуператори- мають одні з найвищих показників ефективності, який сягає 70-85%, і являють собою велике колесо (ротор), вісь обертання якого збігається з лініями руху повітря, а розташована вона між потоками таким чином, що половина ротора знаходиться у зоні витяжного повітря, а друга половина - у зоні припливного повітря. Повільно обертаючись, деяка частина ротора спочатку контактує з витяжним повітрям, яке її нагріває. Через деякий час ця частина ротора переходить у зону припливного повітря, де нагріває його, віддаючи накопичене раніше тепло. Відразу після цього вона знову переходить у зону витяжного повітря та нагрівається. Цикл замикається.

Переваги: висока ефективність відновлення тепла 60-85%, що дозволяє знизити витрати на опалення та охолодження будівлі; висока продуктивність і здатність обробляти більші об'єми повітря, що робить роторний рекуператор хорошим вибором для великих будівель; може відповісти системам з високими вимогами до якості повітря, так як дозволяє ефективно фільтрувати повітря; дозволяє повертати не лише тепло, а й вологість, що важливо для приміщень, де рівень вологості постійно підвищений або знижений; регулюючи швидкість обертання ротора можна регулювати загальну ефективність рекуператора. Недоліки: висока вартість в порівнянні з іншими типами рекуператорів; забруднене повітря частково переноситься в приплив, у зв'язку з чим є потреба у встановленні додаткових фільтрів на приплив та на витяжку; наявність рухомих частини, що викликає потребу в регулярному обслуговуванні, в тому числі чистка і заміна фільтрів; виникнення проблем із замерзанням ротору в холодні місяці року, що може призвести до пошкодження рекуператору.

Пластинчасті рекуператори найпоширеніший вид рекуператорів, на базі пластинчастого теплообмінника, каналами якого рухається припливний та витяжний потоки повітря. Ці канали чергуються. Таким чином, кожен потік витяжного повітря у спеціальному пластинчастому теплообміннику через стінки контактує із двома потоками припливного повітря, а кожен потік припливного - із двома потоками витяжного, але через різницю температур на поверхні пластин теплообмінника може осідати конденсат.

Переваги: висока ефективність теплообміну завдяки наявності великої поверхні теплообміну; компактність та легкість установки, що дозволяє використовувати рекуператори в обмежених просторах; відсутність рухомих деталей; відсутність перетікання повітря між витяжним потоком та припливним за рахунок використання пластин з ущільненням, що забезпечує високу ефективність теплообміну та запобігає забрудненню повітря; висока механічна міцність та вічність пластин, що дозволяє використовувати рекуператори в промислових умовах. Недоліки: потреба в регулярній очистці пластин від забруднення та нальоту, що може відбуватися при низькій якості повітря; обмеження робочих температур та вологості повітря; відносно висока вартість у порівнянні з іншими типами рекуператорів; можливе обмерзання у зимовий період, що призводить до зменшення ККД.

Рекуператори із проміжним теплоносієм - це системи із двох теплообмінників. Один встановлюють у припливній, інший - у витяжній схемі вентиляції. Вони з'єднуються за допомогою трубопроводів. Це не зовсім побутовий тип, проте у великих будинках рекуператори із проміжними теплоносіями можуть використовуватись. Суть роботи в наступному: у холодну пору року повітря нагрівається за допомогою теплоносія. Він передається в припливний контур, нагріває свіже повітря та повертається у витяжну частину системи. Обмежень на відстані, на які може переміщуватись теплоносій, практично немає.

Переваги: витяжний та припливний потоки ніколи не перемішуються; дозволяють реалізувати принципи рекуперації для розділених і навіть віддалених один від одного припливних та витяжних установок; мають можливість регулювання температури: залежно від теплоносія та технології, можна налаштувати роботу системи та встановити бажану температуру повітря; теплоносієм виступає безпечна рідина - вода чи розчини гліколей; ними можуть бути доповнені існуючі системи вентиляції, які спочатку не передбачали рекуперацію тепла. Недоліки: потреба в водяному насосі та додаткових пристроях, які відповідають за правильність роботи даної системи; витрата електроенергії на роботу системи циркуляції води та тепловтрати теплоносія; мають складнішу конструкцію та високу вартість, на відміну від інших типів рекуператорів; вимагають використання додаткових матеріалів, що призводить до підвищення вартості виробництва та монтажу; вимагають обслуговування та очищення; в залежності від типу теплоносія можуть вимагати стабільного тиску, що може призвести до проблеми в експлуатації та при обслуговуванні системи; недоцільні для використання в малих приміщеннях; здатність лише до теплообміну.

Камерні рекуператори - це закритий короб, розділений усередині рухомою заслінкою, якою регулюється рух повітря. Витяжний потік проходить через половину камери і нагріває її, а припливний рухається по іншій, забираючи тепло. Обертання заслінки забезпечує циклічність процесу обміну теплом.

Переваги: забезпечує ефективну рекуперацію тепла при максимальному відновленні енергії; можливість регулювання температури вихідного повітря, що робить його більш гнучким для використання в різних умовах; низький рівень шуму при роботі, що робить його більш зручним для використання в житлових приміщеннях; менша кількість рухомих деталей, ніж у інших типів рекуператорів, тому його менше потрібно обслуговувати. Недоліки: великий розмір, що ускладнює установку в деяких приміщеннях; велика вага, що ускладнює монтаж і вимагає додаткових витрат на установку і підключення до системи вентиляції; висока ймовірність змішування потоків повітря через наявність рухомих елементів в конструкції, що призводить до потрапляння в припливне запахів витяжного повітря. Для скорочення підмішування система комплектується фільтром і повітря стає чистіше, але ефективність рекуператора падає.

Фреонові рекуператори. У таких рекуператорах реалізовано принцип роботи, що базується на двох фізичних явищах. Йдеться про зміну агрегатного стану різних за щільністю речовин та їх взаємодію. Найпростіший приклад – рідкий холодильний агент та повітря. Працюють таким чином: між потоками повітря розташовані спеціальні трубки кільцеподібного виду, в яких міститься рідина, що охолоджує (холодильний агент). Потік повітря, що виходить, повинен бути нижче, ніж потік припливного, взаємодіяти при цьому з нижньою частиною трубок. У них є рідкий холодильний агент. Він остиджує тепло витяжного потоку, закипає, піднімаючись у ділянку припливу. Там агент обмінюється теплом із повітрям, а в результаті конденсації повертається у нижні частини трубок.

Переваги: висока ефективність теплообміну, що дозволяє досягти великої економії енергії; фреон як теплоносіє має високу теплопровідність і низьку в'язкість, що дозволяє знизити опір теплопередачі і забезпечити більш точний контроль над температурою повітря; легкий монтаж і обслуговування, що знижує витрати на їх підтримання в робочому стані. Недоліки: використання фреону може призводити до шкідливого впливу на навколишнє середовище в разі витоку; висока вартість фреону; можуть створювати проблеми з викидами парникових газів.

Рекуператори із тепловими трубками за принципом роботи схожі на рекуператори із проміжним теплоносієм. Різниця лише в тому, що в потоки повітря поміщають теплові труби чи точніше термосифони. Трубчастий теплообмінник являє собою пучок мідних герметичних труб з алюмінієвим оребрінням заповнених холодоагентом, без рухомих частин. Теплообмін здійснюється завдяки випаровуванню холодоагенту в середовищі, що віддає теплоту, та конденсації холодоагенту в середовищі, що приймає теплоту. Труби розташовуються вертикально, оскільки принцип роботи залежить від сили тяжіння. Одна сторона трубки омивається потоком з високою температурою, інша сторона-потоком з більш низькою температурою. Хладагент, що сконденсувався в цій зоні, у вигляді рідини переміщується із зони конденсації в зону випаровування, де знову перетворюється на пару.

Переваги: мають високу теплову ефективність, що дозволяє їм економити значну кількість енергії; не вимагають спеціального обслуговування, що зменшує їх вартість експлуатації; мають довгий термін служби; повністю виключено взаємне змішування потоків, їх забруднення та передача запахів. Недоліки: вартість зазвичай вища, ніж у інших типів рекуператорів; монтаж може бути складним; можуть мати обмежену ефективність при дуже високій вологості або температурі.

Рекуператори дахові призначені для обробки великих об'ємів повітря. Принцип роботи дуже схожий на пластинчасті, проте розміри конструкції в кілька разів більші. Універсальна дахова припливно-витяжна установка з рекуператором чудово підходить для великих приватних будинків, котеджів, особняків, магазинів та інших великих площ. Особливості місця встановлення виключають шумовий фактор, що є особливо цінним у житлових районах.

Переваги: дають можливість зекономити простір в будинку; використання відновлювальної енергії вентиляційного потоку дозволяє ефективно використовувати тепло і зменшувати енергоспоживання; розташування дозволяє уникнути будівельних робіт у внутрішній частині будинку. Недоліки: висока вартість може стати перешкодою для їх встановлення; монтаж вимагає додаткових робіт, що підвищує складність встановлення та може збільшити час виконання; потребують регулярного технічного обслуговування для забезпечення ефективної роботи; зниження ефективності в холодних погодних умовах, коли температура повітря на вулиці сильно падає.

Висновки та напрямок подальших досліджень. У сучасних умовах зростання цін на енергоресурси та підвищення уваги до екологічних питань рекуператори можуть стати ключовим інструментом для забезпечення ефективного та екологічно чистого вентиляційного обладнання в будівлях. Їх використання дозволяє досягти наступних результатів: знизити витрати енергії, які йдуть на нагрівання; обрати генератор тепла мінімальної потужності; знизити влітку кількість енергії, що йде на охолодження; використати охолоджувальні установки меншої потужності, що, у свою чергу, дає зменшення вартості цих установок та витрат на їх експлуатацію; значно покращити якість повітря в приміщенні за рахунок збільшення витрати припливного повітря; з погляду санітарно-гігієнічних норм повністю забезпечує баланс тепла та холоду, вуглекислого газу та кисню у будинку.

Представлений у роботі матеріал систематизує існуючі типи рекуператорів та може бути корисним будівельникам, проектувальникам, інженерам та науковцям, які займаються проектуванням, виготовленням та встановленням вентиляційних систем у будинках. А велика кількість проведених аналізів і досліджень з тематики енергоефективності свідчить про те, що це питання все ще є проблемним.

Список літератури

1. Рекупераційні системи вентиляції / **О.В. Васильєва, А. М. Косік, А. Г. Плакшін** та ін.; за заг. ред. В. І. Боровика. – К.: Видавничий дім «Прспект», - 2018. – 262 с.
2. **Кравченко С. В., Голубков А. В.** Аналіз рекупераційних систем вентиляції в житлових будівлях // Енергетика та електрифікація. Київ, - 2015.-№ 1. С.- 64-67.
3. **Кравченко С. В., Шубін В. О.** Рекупераційні системи вентиляції з повітряними теплообмінниками // Енергетика та електрифікація. Київ, - 2016.-№ 2.- С. 56-60.
4. **Скульський В. С., Вакалюк Ю. В., Дзюндзя М. І.** Теплообмінники рекупераційних систем вентиляції // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Львів, - 2008.

5. **Aanowicz L., Ratajczak K., Dudkiewicz E.** Recent Advancements in Ventilation Systems Used to Decrease Energy Consumption in Buildings- Literature Review. *Energies* 2023, 16, 853.
6. **Fehrm M, Reiners W, Ungemach M.** Exhaust air heat recovery in buildings. *International Journal of Refrigeration* 2002;(25):439–49.
7. **Royuela-del-Val A., Padilla-Marcos M.Áand etc.** Air Infiltration Monitoring Using Thermography and Neural Networks. *Energy Build.* 2019, 191, 187–199.
8. **Bhandari M., Hun D., Shrestha S., Pallin S., Lapsa M.** A Simplified Methodology to Estimate Energy Savings in Commercial Buildings from Improvements in Airtightness. *Energies* 2018, 11, 3322.
9. **Michalak P.** Annual Energy Performance of an Air Handling Unit with a Cross-Flow Heat Exchanger. *Energies* 2021, 14, 1519.
10. **Sakhri N., Menni Y., Ameer H.** Experimental Investigation of the Performance of Earth-to-Air Heat Exchangers in Arid Environments. *J. Arid Environ.* 2020, 180, 104215.
11. **Li J., Shao S., Wang Z., Xie G. and etc.** Review of Air-to-Air Membrane Energy Recovery Technology for Building Ventilation. *Energy Build.* 2022, 265, 112097.
12. **Liu P., Justo Alonso M., Mathisen H.M., Halfvardsson A.** Development and Optimization of Highly Efficient Heat Recoveries for Low Carbon Residential Buildings. *Energy Build.* 2022, 268, 112236.
13. **Tang Y., Ji J., Wang C., Xie H., Ke W.** Performance Prediction of a Novel Double-Glazing PV Curtain Wall System Combined with an Air Handling Unit Using Exhaust Cooling and Heat Recovery Technology. *Energy Convers. Manag.* 2022, 265, 115774.
14. **Gainza-Barrencua J., Odriozola-Maritorena M. and etc.** Use of Sunspaces to Obtain Energy Savings by Preheating the Intake Air of the Ventilation System: Analysis of Its Main Characteristics in the Different Spanish Climate Zones. *J. Build. Eng.* 2022, 62, 105331.
15. **Bai H.Y., Liu P., Justo Alonso, M., Mathisen H.M.** A Review of Heat Recovery Technologies and Their Frost Control for Residential Building Ventilation in Cold Climate Regions. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2022, 162, 112417.
16. **Liu S., Ma G., Xu S., Jia X., Wu G.** Experimental Study of Ventilation System with Heat Recovery Integrated by Pump-Driven Loop Heat Pipe and Heat Pump. *J. Build. Eng.* 2022, 52, 104404.
17. **Jia X.; Ma G.; Zhou F.; Liu S.; Wu G.; Sui Q.** The Applicability and Energy Consumption of a Parallel-Loop Exhaust Air Heat Pump for Environment Control in Ultra-Low Energy Building. *Appl. Therm. Eng.* 2022, 210, 118292.

УДК 621.311.214: 622.5

О.Ю. МИХАЙЛЕНКО, І.О. СІНЧУК, кандидати техн. наук, доценти,
К.В. БУДНІКОВ, д-р філософії, Г.В. КОЛОМІЦ, ст. викладач
Криворізький національний університет

ДО ПРОБЛЕМИ ДОЦІЛЬНОСТІ СТВОРЕННЯ НА БАЗІ ГОЛОВНИХ ВОДОВІДЛИВНИХ КОМПЛЕКСІВ ШАХТ ПІКОВИХ ГІДРОАКУМУЛЮЮЧИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Мета. Мета роботи полягає в аналізі доцільності створення на базі головних водовідливних комплексів шахт пікових гідроакumuлюючих електростанцій (ПГАЕС) шляхом визначення рівня виробництва електроенергії гідротурбінами для різних витрат води через неї, обчислення собівартості генерації та встановлення умов, коли використання ПГАЕС буде виправданим з економічної точки зору, залежно від тарифу на електроенергію, що встановлює оператор розподілу, та поточного рівня енергоспоживання електроприймачами шахти.

Методи дослідження. Для проведення даного дослідження були використані такі методи: аналіз, систематизація, узагальнення – з метою вивчення та узагальнення досвіду побудови гідроакumuлюючих електростанцій з використанням водозбірників головних водовідливних комплексів шахт; синтез – для розробки моделі системи розосередженої генерації з гідроакumuлюючими електростанціями; комп'ютерне моделювання для визначення чисельних значень економічних показників роботи промислової енергосистеми при впровадженні у її структуру гідроакumuлюючих електростанцій.

Наукова новизна. Розроблено систему розосередженої генерації електроенергії в структурі енергосистем шахт, що використовує елементи головного водовідливної комплексу для побудови локальних пікових гідроакumuлюючих електростанцій.

Практична значимість. Результати можуть бути використані для покращення енергоефективності роботи наявних систем електропостачання гірничорудних підприємств, що видобувають залізрудну сировину.

Результати. Виконано аналіз доцільності створення на базі головних водовідливних комплексів шахт пікових гідроакumuлюючих електростанцій. При цьому розглядалися три різні конфігурації ПГАЕС у складі водовідливу шахти «Криворізька» АТ «Кривбасзалізрудком»: зі встановленням однієї гідротурбіни на горизонті 500 м, двох гідротурбін на тому ж горизонті 500 м, а також встановлення чотирьох гідротурбін – окремо по дві на горизонтах 500 м і 940 м, відповідно. З точки зору вартості електроенергії найсприятливішими умовами для впровадження системи розподіленої генерації продемонстрував випадок зі встановленням однієї гідротурбіни на горизонті 500 метрів. У такому випадку приведена вартість електроенергії перевищувала діючий тариф практично для всіх розглянутих умов

функціонування, окрім випадків з дуже малими витратами води через гідроагрегат. Це зумовлюється оптимальним співвідношенням між, з одного боку, капіталовкладеннями на придбання обладнання ПГАЕС та вартістю його обслуговування і планово-попереджувальних ремонтів, з іншого – рівнем покриття потреб споживачів згенерованою електроенергією.

Ключові слова: гірничорудне підприємство, енергосистема, розосереджена генерація, головний водовідливний комплекс, гідроакумуюча електростанція, собівартість.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-109-116

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Гірничорудні підприємства являють собою енергоємні види промислових виробництв із щорічними обсягами споживання електричної енергії на рівні близько 30% від усього споживчого рівня промисловості держави [1]. Наявна до лютого місяця ситуація в електроенергетиці України, а після вищезгаданого терміну тим паче, диктує необхідність проведення заходів, як для ефективного використання електроенергії, та і до пошуку дієвих заходів її генерації в форматі автономних джерел живлення стратегічних для економіки держави видів виробництв. Це повністю відноситься й до гірничовидобувних підприємств. Саме вони володіють значним потенціалом енергетичних ресурсів для розбудови таких генерувальних потужностей, що дозволить не тільки зменшити енергоємність видобутку залізної руди, що вельми актуально, як, до речі, і інших видів корисних копалин, а й забезпечити безперебійність їх функціонування незалежно від стану централізованого електропостачання магістральних електричних мереж. При цьому логістична структура систем внутрішнього електропостачання гірничовидобувних підприємств змінюється з централізованого варіанту на варіант розосередженої генерації [1, 2].

Одним з таких засобів для генерації електроенергії всередині шахти можуть виступати головні водовідливні комплекси, водозбірники яких по суті виконують функції гідроаккумуляторів. Доповнивши їх гідротурбінами може бути отримана повноцінна гідроакумуюча електростанція (ГАЕС), що функціонуватиме на загальну промислову мережу підприємства або здійснювати автономне живлення, коли це потрібно й економічно обґрунтовано, окремих шахтних електроприймачів.

Аналіз досліджень і публікацій. Визначення оптимальної конфігурації систем розподіленої генерації з ГАЕС та оптимізації потоків потужності при такому електропостачанні за економічними показниками є основним підходом при розбудові сучасних систем електропостачання [3–5].

Авторами у роботі проведена [3] оптимізація конфігурації енергосистеми з вітро- та гідроакумуючою електростанціями за критеріями собівартості виробництва електроенергії та рівня викидів вуглекислого газу. Визначена кількість гідроагрегатів та вітротурбін, що забезпечують мінімізацію означених показників.

Визначенню оптимальної конфігурації системи електропостачання з вітро-, фотоелектричними, біомасовими і гідроакумуючими електростанціями за критерієм мінімальної собівартості виробництва електроенергії присвячена також робота [4].

У роботі [5] запропонований багатоперіодний метод координації виробництва активної потужності в енергосистемі з вітро-, фотоелектричними, тепловими і гідроакумуючими електростанціями і накопичувачами енергії. Планування і оптимізація роботи системи здійснюється на добу наперед, погодинно та в реальному часі. Такий підхід дозволяє знизити коливання виробництва електроенергії, які зумовлені мінливим характером ВДЕ. У якості критерію оптимізації також використовується собівартість виробництва електроенергії.

У [6] визначено рівень генерації ГАЕС (Gâlceag hydropower facility on Sebeș River, located in Romania) залежно від рівня води у верхньому резервуарі.

Підвищити ефективність системи розподіленої генерації в умовах шахти можна шляхом впровадження вітрогенераторів з сучасними системами керування [7] та систем накопичення енергії [8] для зниження коливань у генерації, зумовлених мінливим характером відновлюваних джерел енергії.

Постановка задачі. Для визначення доцільності впровадження пікових ГАЕС (ПГАЕС) на базі головних водовідливних комплексів шахт у структуру промислових енергосистем гірничорудних підприємств необхідно попередньо провести аналіз гідроенергетичного потенціалу об'єкту, визначити очікуваний рівень генерації електроенергії та її собівартість. Після чого

виконати оцінку витрат підприємства на придбання електроенергії в енергосистемі з ПГАЕС та без неї. Таким чином, мета роботи полягає в аналізі доцільності створення на базі головних водовідливних комплексів шахт пікових гідроакумуючих електростанцій шляхом визначення рівня виробництва електроенергії гідротурбінами для різних витрат води через неї, обчислення собівартості генерації та встановлення умов, коли використання ПГАЕС буде виправданим з економічної точки зору, залежно від тарифу на електроенергію, що встановлює оператор розподілу, та поточного рівня енергоспоживання електроприймачами шахти.

Викладення матеріалу та результати. Ефективність упровадження ПГАЕС для комбінованого живлення споживачів шахти розглянемо на прикладі водовідливу шахти «Криворізька» АТ «Кривбасзалізрудком». Під час проведення досліджень розглянуто три конфігурації системи розподіленої генерації з використанням ПГАЕС: ГАЕС з однією гідротурбіною на горизонті 500 з використанням води однієї шахти; ГАЕС з двома гідротурбінами на горизонті 500 з використанням води декількох шахт; ГАЕС з чотирма гідротурбінами – двома на горизонті 500 і двома на горизонті 940, з використанням води декількох шахт.

Для кожної конфігурації системи порівняльний аналіз проводився для двох варіантів живлення споживачів. Перший варіант передбачає придбання електроенергії в електропостачальній компанії за чинними тарифами, що задовольняє потреби об'єкта в повному обсязі. Другий – електропостачання насосів водовідливу від гідрогенератора ПГАЕС та отримання електроенергії від мережі підприємства у випадку дефіциту потужності, зумовленого або збільшенням споживання через введення в дію додаткових насосів при збільшенні водоприпливу в шахту, або зменшення витрат води, що проходить через гідроагрегат.

Критерієм для порівняння ефективності двох варіантів виступає значення нормованої вартості електроенергії LCOE (Levelized Cost of Electricity) [11].

При проведенні обчислювальних експериментів передбачається встановлення на ступенях водовідливу гідрогенераторів потужністю 1 МВт типу CJ A237-W-90/1x5,5.

Гідроенергетичний потенціал водовідливу оцінюється шляхом розрахунку рівня генерації електроенергії гідротурбіною [10] залежно від ККД, щільності рідини, напору і потоку води.

Прийнято, що навантаження електроприймачів рівномірно розподілене. Добове споживання встановлювалося на рівні 10800 кВт·год, 21600 кВт·год і 43200 кВт·год. Генерація ПГАЕС досліджувалася при величинах напору 500 м (різниця відм. 0–500) і 440 м (різниця відм. 500–940). При чому втрати у гідросистемі становили 15%. ККД гідроагрегату – 0,9. Розглядалися два варіанти тарифів на електроенергію: базовий (93,38 грн/МВт·год) і піковий (140,07 грн/ МВт·год). Витрати води через гідроагрегат приймали дискретні значення: 0,23; 0,15; 0,07 м³/с.

Під час моделювання капіталовкладення на побудову ПГАЕС приймалися у розмірі 540 тис. грн, витрати на планово-попереджувальні ремонти й обслуговування – 80 тис. грн на рік, термін експлуатації системи – 25 років, номінальна облікова ставка – 8 %.

Результати обчислювального експерименту занесено до табл. 1 і табл. 2. Тут приведені розрахункові дані щодо вартості електроенергії у системі комбінованого електропостачання для різних умов функціонування.

Результати обчислень показали, що при низькій інтенсивності потоку через гідротурбіну ПГАЕС під час скидання шахтних вод, зокрема при $Q = 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ і енергоспоживанні від номінального значення і вище, вартість електроенергії перевищує тариф встановлений оператором розподілу. Це пояснюється тим, що витрати на обслуговування та ремонт гідротурбін перевищують економічний ефект від додаткової генерації через велику різницю між обсягами виробництва електроенергії і споживаною потужністю.

Побудовано залежність чистої приведеної вартості системи комбінованого електропостачання від витрат води через гідротурбіну і рівня споживання потужності та визначені області параметрів у межах яких доцільно застосовувати ту чи іншу конфігурацію. Графічна інтерпретація оптимальних областей застосування певного варіанту електропостачання виконана за аналогією з Optimal System Plot прикладного пакету Homer Pro [15]. Для проведення обчислень було зменшено інтервали зміни незалежних параметрів: витрат води через гідротурбіну і енергоспоживання. Так Q змінювалася у межах $[0,07 \text{ м}^3/\text{с}, 0,23 \text{ м}^3/\text{с}]$ з кроком $1 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$, а середньодобова потужність – у межах $[450 \text{ кВт}, 1800 \text{ кВт}]$ з кроком 10 кВт.

Таблиця 1

Вартість електроенергії про впровадженні на горизонтах 500 і 940 метрів системи розподіленої генерації з ПГАЕС під час дії базового тарифу

E , кВт·год/ день	Q , м ³ /с	Одна гідротурбіна на горизонті 500 м		Дві гідротурбіни на горизонті 500 м		Чотири гідротурбіни (дві на горизонті 500 і дві на горизонті 940 м)	
		мережа	мережа та ПГАЕС	мережа	мережа та ПГАЕС	мережа	мережа та ПГАЕС
10800	0,07	0.09338	0.112742	0.09338	0.132103	0.09338	0.173096
10800	0,15	0.09338	0.049795	0.09338	0.086548	0.09338	0.173096
10800	0,23	0.09338	0.043274	0.09338	0.086548	0.09338	0.173096
21600	0,07	0.09338	0.103061	0.09338	0.112742	0.09338	0.132103
21600	0,15	0.09338	0.071588	0.09338	0.049795	0.09338	0.086548
21600	0,23	0.09338	0.032406	0.09338	0.043274	0.09338	0.086548
43200	0,07	0.09338	0.098220	0.09338	0.103061	0.09338	0.112742
43200	0,15	0.09338	0.082484	0.09338	0.071588	0.09338	0.049795
43200	0,23	0.09338	0.062893	0.09338	0.032406	0.09338	0.043274

Таблиця 2

Вартість електроенергії про впровадженні на горизонтах 500 і 940 метрів системи розподіленої генерації з ПГАЕС під час дії пікового тарифу

E , кВт·год/ день	Q , м ³ /с	Одна гідротурбіна на горизонті 500 м		Дві гідротурбіни на горизонті 500 м		Чотири гідротурбіни (дві на горизонті 500 і дві на горизонті 940 м)	
		мережа	мережа та ПГАЕС	мережа	мережа та ПГАЕС	мережа	мережа та ПГАЕС
10800	0,07	0.14007	0.147475	0.14007	0.154881	0.14007	0.173096
10800	0,15	0.14007	0.053056	0.14007	0.086548	0.14007	0.173096
10800	0,23	0.14007	0.043274	0.14007	0.086548	0.14007	0.173096
21600	0,07	0.14007	0.143773	0.14007	0.147475	0.14007	0.154881
21600	0,15	0.14007	0.096563	0.14007	0.053056	0.14007	0.086548
21600	0,23	0.14007	0.037790	0.14007	0.043274	0.14007	0.086548
43200	0,07	0.14007	0.141921	0.14007	0.143773	0.14007	0.147475
43200	0,15	0.14007	0.118316	0.14007	0.096563	0.14007	0.053056
43200	0,23	0.14007	0.088930	0.14007	0.037790	0.14007	0.043274

На рис. 1 темна ділянка позначає область раціонального застосування системи електропостачання, що передбачає отримання живлення від електричної мережі, що не включає ПГАЕС, світла – системи розподіленої генерації з ПГАЕС.

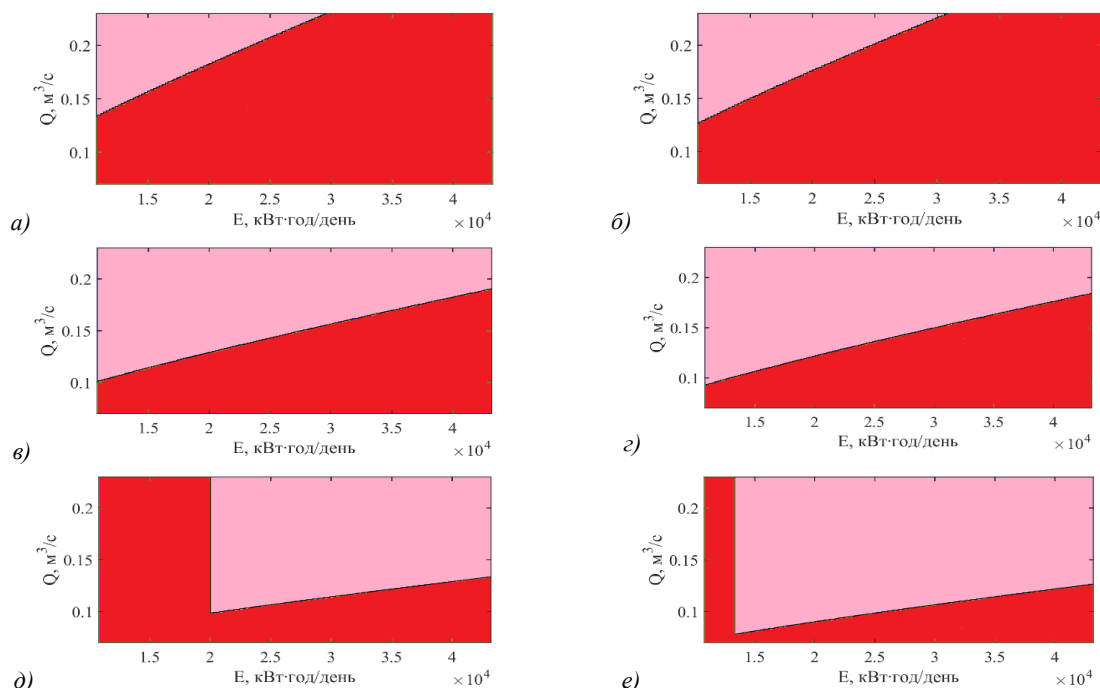


Рис. 1. Оптимальна, за критерієм чистої приведеної вартості, система електропостачання горизонтів 500 і 940 метрів, залежно від зміни навантаження та витрат води при впровадженні: а - однієї гідротурбіни базовий тариф; б - піковий тариф; в - двох гідротурбін базовий тариф; г - піковий тариф; д - чотирьох гідротурбін базовий тариф; е - піковий тариф

Аналіз отриманих результатів (рис. 1а) показує, що при чинному тарифі на електроенергію $\alpha_{ee} = 93,38$ грн/МВт·год систему комбінованого електропостачання з гідрогенератором доцільно застосовувати у разі забезпечення інтенсивності водного потоку вище $0,1339 \text{ м}^3/\text{с}$ при середньодобовому споживанні потужності $10800 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день; $0,1899 \text{ м}^3/\text{с}$ – при $21600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день і $0,23 \text{ м}^3/\text{с}$ – при $29520 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день. Зменшення витрати води нижче зазначених показників призводить до перевищення вартості для систем без ПГАЕС у порівнянні з варіантом без неї, що свідчить про неефективність застосування системи комбінованого електропостачання. Відзначимо також, що при рівні енергоспоживання вище $29520 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ застосування системи з ПГАЕС недоцільне.

Площа області ефективного застосування системи комбінованого електропостачання з власними об'єктами розподіленої генерації у межах розглянутої зміни параметрів при $\alpha_{ee} = 93,38$ грн/МВт·год склала $17,2 \%$. Це найбільш несприятливі умови для модернізації енергосистеми з усіх розглянутих, так як їх сукупність продемонструвала найнижчу область, коли застосування системи розподіленої генерації є доцільним.

Застосування тарифу для пікових годин – $\alpha_{ee} = 140,07$ грн/МВт·год очікувано призводить до підвищення ефективності системи комбінованого електропостачання, що містить ПГАЕС з однією гідротурбіною на горизонті 500 метрів.

Приведена вартість електроенергії в системі з ПГАЕС (табл. 2) перевищує піковий тариф при $Q = 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ для всіх розглянутих варіантів споживаної потужності, що свідчить про низьку ефективність системи розподіленої генерації при низьких витратах води через генеруючий гідроагрегат. Відзначимо, що вартість електроенергії в системі комбінованого електропостачання близька до пікового тарифу при $Q = 0,15 \text{ м}^3/\text{с}$ і рівні енергоспоживання $E = 43200 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ – менша лише на $15,53 \%$.

Графік (рис. 1б) демонструє, що систему без ПГАЕС доцільно застосовувати при інтенсивності водного потоку нижче $0,1264 \text{ м}^3/\text{с}$ для $E = 10800 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день, $0,1839 \text{ м}^3/\text{с}$ – для $E = 21600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день і $0,23 \text{ м}^3/\text{с}$ – для $E = 30960 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день. Тобто область застосування системи розподіленої генерації з ПГАЕС збільшується до $19,6 \%$ у порівнянні з тарифом $\alpha_{ee} = 93,38$ грн/МВт·год, проте не значно тільки на $2,4 \%$. Відзначимо також, що при рівні енергоспоживання вище $30960 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ застосування системи з ПГАЕС недоцільне.

На наступному етапі досліджень проведено розрахунки для варіанту встановлення двох гідротурбін на горизонті 500 метрів шахти «Криворізька». Результати обчислювального експерименту для базового тарифу $\alpha_{ee} = 93,38$ грн/МВт·год зведені у табл. 1.

Співставивши результати наведені у табл. 1 видно, що приведена вартість електроенергії в системі з ПГАЕС і двома гідротурбінами зростає. Це зумовлюється збільшенням у два рази капітальних витрат на придбання генеруючого обладнання та річної вартості обслуговування і планово-попереджувальних ремонтів.

Вартість електроенергії (табл. 1) перевищує тариф встановлений електропостачальною компанією для всіх варіантів енергоспоживання при $Q = 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$. У випадку коли $Q = 0,15 \text{ м}^3/\text{с}$, $0,23 \text{ м}^3/\text{с}$ і $E = 10800 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ приведена вартість близька до базового тарифу і менший за нього лише на $7,32 \%$.

Графік (рис. 1в) демонструє, що систему без ПГАЕС доцільно застосовувати при інтенсивності водного потоку нижче $0,1006 \text{ м}^3/\text{с}$ для $E = 10800 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день, $0,1334 \text{ м}^3/\text{с}$ – для $E = 21600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день і $0,1906 \text{ м}^3/\text{с}$ – для $E = 43200 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день. Тобто область застосування системи розподіленої генерації з ПГАЕС та двома гідротурбінами суттєво зростає і складає $51,57 \%$, що більше на $37,37 \%$ і $31,97 \%$ ніж для системи з одним гідроагрегатом під час дії базового і пікового тарифів, відповідно.

При застосуванні пікового тарифу на електроенергію дані про розрахунок приведеної вартості електроенергії в системі з двома гідроагрегатами (табл. 2) та за умови дії пікового тарифу показують, що порівняно з варіантом, де дефіцит потужності покривається за рахунок придбання

електроенергії за базовим тарифом (табл. 1), вартість зростає. Проте окрім випадків коли $Q = 0,07 \text{ м}^3/\text{с}$ вона залишається нижчою за $\alpha_{ee} = 140,07 \text{ грн/МВт} \cdot \text{год}$.

Графік (рис. 1з) демонструє, що систему без ПГАЕС доцільно застосовувати при інтенсивності водного потоку нижче $0,0926 \text{ м}^3/\text{с}$ для $E = 10800 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день, $0,1261 \text{ м}^3/\text{с}$ – для $E = 21600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день і $0,1839 \text{ м}^3/\text{с}$ – для $E = 43200 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день. Тобто область у межах якої застосовування системи електропостачання з ПГАЕС дещо розширюється на 4,34 % до 55,91 % порівняно з варіантом наведеним на рис. 1в, який відповідає базовому тарифу.

На завершальному етапі було розглянуто доцільність впровадження системи розподіленої генерації з ПГАЕС, розміщеними на горизонтах 500 і 940 шахти «Криворізька». Враховуючи, що у даному варіанті використовується енергетичних потенціал скидання вод з декількох шахт, тому передбачається встановлення чотирьох гідроагрегатів – по два на кожному горизонті.

Значне збільшення витрат на придбання генеруючого обладнання (чотирьох гідротурбін) та його подальше обслуговування призводить до перевищення тарифу $\alpha_{ee} = 93,38 \text{ грн/МВт} \cdot \text{год}$ приведеною вартістю електроенергії у системі розподіленої генерації, окрім випадків, коли енергоспоживання становить $E = 21600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ і $E = 43200 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ при витратах води $Q = 0,15 \text{ м}^3/\text{с}$ та $Q = 0,23 \text{ м}^3/\text{с}$. В умовах низького споживання потужності й інтенсивності водного потоку через гідроагрегати, вигідно здійснювати електропостачання споживачів тільки від мережі з придбанням електроенергії у оператора розподілу. Модернізація електричної мережі шахти зі зведенням ПГАЕС при цьому не доцільна, тому що економічний ефект від генерації протягом 25 років не покриває капіталовкладень та експлуатаційних витрат. Для більш ефективного використання енергетичного потенціалу ПГАЕС горизонтів 500 і 940 метрів від них потрібно забезпечувати живлення більшої кількості споживачів.

Графік (рис. 1д) демонструє, що систему без ПГАЕС доцільно застосовувати при інтенсивності водного потоку нижче на день, $0,1011 \text{ м}^3/\text{с}$ – для $E = 21600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день і $0,1336 \text{ м}^3/\text{с}$ – для $E = 43200 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день. Особливістю даного випадку є те, що при рівні енергоспоживання нижче $E = 20160 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ використання ПГАЕС у системі електропостачання недоцільне при будь-якому значенні витрат води через гідротурбіни. У результаті область у межах зміни параметрів, де застосування системи розподіленої генерації, дещо зменшилася на 0,93 % до 50,64 % порівняно з випадком, коли діє базовий тариф і встановлюються дві гідротурбіни на горизонті 500 метрів.

Під час дії пікового тарифу вартість електроенергії збільшується у 1,5 рази до $\alpha_{ee} = 140,07 \text{ грн/МВт} \cdot \text{год}$ і, відповідно, зростають витрати на її придбання з мережі оператора розподілу, приведена вартість електроенергії системи розподіленої генерації з ПГАЕС (табл. 2) стає нижчою за діючий тариф не тільки при $Q = 0,23 \text{ м}^3/\text{с}$ як для $\alpha_{ee} = 93,38 \text{ грн/МВт} \cdot \text{год}$, а й при $Q = 0,15 \text{ м}^3/\text{с}$, тобто енергетичний потенціал водовідливу використовується ефективніше.

Графік (рис. 1е) демонструє, що систему без ПГАЕС доцільно застосовувати при інтенсивності водного потоку нижче $0,0926 \text{ м}^3/\text{с}$ – для $E = 21600 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день і $0,1259 \text{ м}^3/\text{с}$ – для $E = 43200 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ на день. У даному випадку на відміну від дії базового тарифу, систему з ПГАЕС недоцільно застосовувати при зниженні електроспоживання нижче $E = 13440 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ (для $\alpha_{ee} = 93,38 \text{ грн/МВт} \cdot \text{год}$ ця межа становила $E = 20160 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ (рис. 1д)). Це значно розширило область застосування системи електропостачання з об'єктами розподіленої генерації порівняно з попереднім випадком. Відзначимо також, що порівнюючи площу області раціонального застосування системи з чотирма гідроагрегатами з відповідними площами при встановленні однієї або двох гідротурбін, то вона є найбільшою і становить 72,84 %.

Тобто незважаючи на високий рівень капітальних витрат на придбання генеруючого обладнання та подальше його обслуговування даний варіант є найкращим для електропостачання в умовах, коли відбувається зміна електроспоживання або витрат води через гідротурбіни.

Висновки та напрямки подальших досліджень. У даній роботі на прикладі шахти «Криворізька» АТ «Кривбасзалізрудком» виконано аналіз доцільності створення на базі головних водовідливних комплексів шахт пікових гідроакумуючих електростанцій. При цьому розглядалися три різні конфігурації ПГАЕС: зі встановленням однієї гідротурбіни на горизонті 500 м,

двох гідротурбін на тому ж горизонті 500 м, а також встановлення чотирьох гідротурбін – окремо по дві на горизонтах 500 м і 940 м, відповідно. З точки зору вартості електроенергії найсприятливішими умовами для впровадження системи розподіленої генерації продемонстрував випадок зі встановленням однієї гідротурбіни на горизонті 500 метрів. У такому випадку приведена вартість електроенергії перевищувала діючий тариф практично для всіх розглянутих умов функціонування, окрім випадків з дуже малими витратами води через гідроагрегат. Це зумовлюється оптимальним співвідношенням між, з одного боку, капіталовкладеннями на придбання обладнання ПГАЕС та вартістю його обслуговування і планово-попереджувальних ремонтів, з іншого – рівнем покриття потреб споживачів згенерованою електроенергією.

Використання гідроенергетичного потенціалу головних водовідливних комплексів залізрудних шахт шляхом застосування ПГАЕС дозволяє підвищити ефективність електропостачання споживачів за рахунок зменшення витрат на придбання електроенергії з зовнішньої енергосистеми. Це забезпечить зниження собівартості кінцевої продукції та підвищення її конкурентоздатності.

Список літератури

1. Budnikov K., Sinchuk O., Sinchuk I., Beridze T., Filipp Y., Dozorenko O., and Strzelecki R. Assessment of the factors influencing on the formation of energy-oriented modes of electric power consumption by water-drainage installations of the mines. *Mining of Mineral Deposits*. Vol. 15, no 4. 2021. pp. 25-33. doi:10.33271/mining15.04.025.
2. Sinchuk I., Mykhailenko O., Kupin A., Ilchenko O., Budnikov K. and Baranovskyi V. Developing the algorithm for the smart control system of distributed power generation of water drainage complexes at iron ore underground mines. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2022. pp. 116-122. doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969263.
3. Al-Masri HMK, Al-Quraan A, AbuElrub A, Ehsani M. Optimal Coordination of Wind Power and Pumped Hydro Energy Storage. *Energies*. 2019;12(22):4387. doi:10.3390/en12224387
4. Alturki FA, Awwad EM. Sizing and Cost Minimization of Standalone Hybrid WT/PV/Biomass/Pump-Hydro Storage-Based Energy Systems. *Energies*. 2021;14(2):489. doi:10.3390/en14020489
5. Zhang D, Du T, Yin H, Xia S, Zhang H. Multi-Time-Scale Coordinated Operation of a Combined System with Wind-Solar-Thermal-Hydro Power and Battery Units. *Applied Sciences*. 2019;9(17):3574. doi:10.3390/app9173574
6. Dunca G, Bucur DM, Aldea A, Georgescu AM, Georgescu SC. EPANET Modelling of a High Head Pumped-Storage Hydropower Facility. *Proceedings*. 2018;2(11):608. doi:10.3390/proceedings2110608
7. Uskov A, Shchokin V, Mykhailenko O, Kryvenko O. The fuzzy logic controllers synthesis method in the vector control system of the wind turbine doubly-fed induction generator. *E3S Web Conf.* 2020;166:04006. doi:10.1051/e3sconf/202016604006
8. Mykhailenko O. Modeling and simulating dynamics of lithium-ion batteries using block-oriented models with piecewise linear static nonlinearity. *E3S Web Conf.* 2021;280:05004. doi:10.1051/e3sconf/202128005004
9. Morabito, A.; Spriet, J.; Vagnoni, E.; Hendrick, P. Underground Pumped Storage Hydropower Case Studies in Belgium: Perspectives and Challenges. *Energies* 2020, 13, 4000. <https://doi.org/10.3390/en13154000>
10. Šćekić L., Mujović S., Radulović V. Pumped Hydroelectric Energy Storage as a Facilitator of Renewable Energy in Liberalized Electricity Market. *Energies*. MDPI AG, 2020. Vol. 13, № 22. P. 6076.
11. Al-Addous M., Al Hmidan S., Jaradat M., Alasis E., Barbana N. Potential and Feasibility Study of Hybrid Wind-Hydroelectric Power System with Water-Pumping Storage: Jordan as a Case Study. *Applied Sciences*. 2020. 10(9). P. 3332. <https://doi.org/10.3390/app10093332>
12. Madlener, R.; Specht, J.M. An Exploratory Economic Analysis of Underground Pumped-Storage Hydro Power Plants in Abandoned Deep Coal Mines. *Energies* 2020, 13, 5634. <https://doi.org/10.3390/en13215634>
13. Singh, N.K.; Koley, C.; Gope, S.; Dawn, S.; Ustun, T.S. An Economic Risk Analysis in Wind and Pumped Hydro Energy Storage Integrated Power System Using Meta-Heuristic Algorithm. *Sustainability* 2021, 13, 13542. <https://doi.org/10.3390/su132413542>
14. Chaima, E.; Lian, J.; Ma, C.; Zhang, Y.; Kavwenje, S. Complementary Optimization of Hydropower with Pumped Hydro Storage-Photovoltaic Plant for All-Day Peak Electricity Demand in Malawi. *Energies* 2021, 14, 4948. <https://doi.org/10.3390/en14164948>
15. Optimal System Type Plot. *Homer Energy*: веб-сайт. URL: <https://www.homerenergy.com/products/pro/docs/3.11/optimal-system-type-plot.html> (дата звернення: 31.03.2023).

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПОВІТРООБМІНУ В ПІДЗЕМНИХ КАМЕРАХ
АВАРІЙНОГО ПОВІТРОПОСТАЧАННЯ**

Метою дослідження є розробка та впровадження математичної моделі процесу повітрообміну для забезпечення відповідних умов життєдіяльності в підземних камерах аварійного повітропостачання, які відповідають санітарно-гігієнічним умовам праці.

Метод дослідження. При створенні математичної моделі застосовується комплексний метод, що передбачає структурний синтез, критичний аналіз і узагальнення літературних джерел, аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду, а також метод Бернуллі та застосовується задача Коші.

Наукова новизна. Запропонована математична модель дозволяє реалізувати процес управління аеродинамічними параметрами повітрообміну, а саме визначити кратність повітрообміну в камері аварійного повітропостачання в залежності від концентрації шкідливих газів, які надходять в КАПП. Математичне моделювання підтвердило основні показники здійснення повітрообміну в підземних камерах аварійного повітропостачання в певний час, та при певній концентрації. Створена математична модель повітрообміну в підземних камерах аварійного повітропостачання, яка дозволить не тільки спрогнозувати стан повітрообміну, але й розрахувати його ефективність.

Практична значимість. Впровадження математичного моделювання надасть можливість реалізувати ефективний повітрообмін як одну із головних складових мікроклімату в камерах аварійного повітропостачання, а також дозволить спрогнозувати належні умови праці при повітрообміні.

Результати. Розроблена математична модель надає можливість швидкого та точного розрахунку процесів повітрообміну і нормалізації мікроклімату для підземних камер аварійного повітропостачання, що дозволить підвищити рівень безпеки та нормалізації умов життєдіяльності робітників, які знаходяться в камері. Математично сформульовані і розроблені алгоритми структурної і параметричної ідентифікації повітрообміну в підземній КАПП шляхом обґрунтованого вибору структури повітряних потоків у вигляді моделей ідеального перемішування з їх корекцією по статистичним даним. Отримано аналітичні формули, які дозволяють реалізувати синтез систем управління повітрообміном підземної камери аварійного повітропостачання в такі властивості, які є обов'язковими для систем управління, як спостережливості, керованості і досяжності.

Ключові слова: математичне моделювання, повітрообмін, камера аварійного повітропостачання, мікроклімат, параметризація, концентрація, кратність, ефективність.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-116-122

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. При загорянні вибухових речовин у зоні гірничих робіт або при підготовці масового вибуху можливе поширення газоподібних продуктів горіння у робочі забої очисних блоків [1]. У цьому випадку аварійний режим провітрювання не забезпечує швидкого винесення газоподібних продуктів горіння, що може призвести до отруєння гірників [2]. Тому й виникла проблема вдосконалення системи протипожевної аварійної захисту гірників від раптового загазування рудникового повітря за рахунок використання камери аварійного повітропостачання (КАПП). Аналіз функціонування КАПП дає можливість зробити висновок, що вони відносяться до складних об'єктів управління [3,4]. Для цього розглянемо деякі основні риси складної системи. По-перше, треба виділити відсутність математичного описання і необхідність в ньому. Під математичним описанням мається на увазі наявність алгоритму обчислення стану об'єкту управління по спостереженням його вхідних змінних. Для управління складною системою за допомогою формальних методів, то доведеться створити її математичну модель [5]. Важливою є стохастичність поведінки складних об'єктів управління, що характеризує трудність аналізу і керування ними.

Згідно з призначенням КАПП питання управління повітрообміном є вкрай важливим [6]. Дійсно в аварійній ситуації в підземних виробках необхідно досить швидко реалізувати ефективний повітрообмін як одну із головних складових клімату в КАПП.

Аналіз досліджень і публікацій. Стаціонарна КАПП – це тупикова виробка перерізом $2,5 \times 3$ м, довжиною 5 м, яка з боку обладнана перемичкою з дощечок з дверним отвором перерізом $2 \times 1,2$ м і шторою з прогумованої стрічки, навішеною з внутрішнього боку перемички на весь переріз отвору. Для запобігання проникненню продуктів горіння у КАПП від магістралі стисненого повітря підводять трубопровід з діаметром не менше 50 мм для живлення камери повітрям. Він необхідний для створення експлуатаційного підпору, рівного не менше 10 Па, а також

нормальних параметрів мікроклімату, на період знаходження робітників у камері. Витрату стисненого повітря регулюють запірним вентилям, установленим на ділянці трубопроводу стисненого повітря. Кількість стисненого повітря, що подають по трубопроводу в КАПП, треба розраховувати за допустимим умістом кисню, вуглекислого газу, за тепловими умовами, а також перевіряти за умовами створення підпору в камері. Вихідний переріз трубопроводу стисненого повітря повинен бути розташований на відстані 1-1,5 м від тупика камери. На кінці трубопроводу встановлюють перфоровану ємність об'ємом 1-2 л для сферичного витоку повітря й унеможливлення циркуляції потоків у самій камері [7].

Недоліком відомої камери є те, що вона не виключає потрапляння отруйних газів в середину при пошкодженні магістралі стиснутого повітря в результаті аварії, оскільки буде відсутня подача стиснутого повітря, в результаті чого не буде утворюватись надлишковий тиск. Конструкція камери є нерухомою спорудою, а також відсутнє математичне моделювання повітрообміну при перебуванні робітників в камері під час аварійних ситуацій. Такі недоліки у цілому, не дозволяють ефективно застосовувати її під час аварій в гірничих виробках.

Постановка завдання. Враховуючи, що КАПП є складним об'єктом, для виконання задачі управління процесом повітрообміну треба побудувати математичну модель повітрообміну в камері, яка дозволить не тільки спрогнозувати наступний стан повітрообміну, але й розрахувати ефективний повітрообмін в ній. Без моделі повітрообміну в КАПП процес управління можна реалізувати лише методом проб і помилок, що неприпустимо при управлінні цим об'єктом.

Викладення матеріалу та результати. Згідно з досліджуваним питанням повітрообміну в КАПП особливу увагу треба приділити такої структурної категорії як динамічність, оскільки ця структура дозволяє дослідити швидкість повітропостачання в КАПП. Аналіз процесу повітрообміну, який відбувається в камері, дозволяє припустити, що при попаданні потоку газів в КАПП ця субстанція рівномірно розподіляється по всій камері, тобто має місце «ідеальне перемішування» [8]. Треба відзначити, що під субстанцією маються на увазі різні речовини (кисень, окис вуглецю, двооксид вуглецю тощо), які знаходяться в повітрі.

Тоді кількість шкідливих домішок (субстанції) можна представити як добуток витрати субстанції на концентрацію

$$Q = v \cdot C, \quad (1)$$

де Q – потік шкідливих домішок, кг/сек.

Для досліджуємої КАПП вхідний і вихідний потоки будуть

$$Q_0 = v \cdot C_0, \quad (2)$$

$$Q_1 = v \cdot C_1. \quad (3)$$

У сталому режимі, коли $C_0 = \text{const}$, справедлива рівність

$$Q_0 = Q_1,$$

тобто накоплення шкідливих домішок в КАПП не відбувається, скільки шкідливих домішок надходить в камеру аварійного повітропостачання, стільки із неї і йде в будь-який момент часу. Але в загальному випадку можуть відбуватися змінення за кількістю шкідливих домішок на вході. Нехай в якийсь момент часу вхідна концентрація шкідливих домішок збільшилася. При цьому сталий режим порушується і рівність вхідного і вихідного потоків не виконується

$$Q_0(t) \neq Q_1(t).$$

В результаті в камері буде накопичуватися кілька субстанції шкідливих домішок Δm , яке можна записати в інтегральній формі рівності.

$$\Delta m = \int_0^t [Q_0(x) - Q_1(x)] dx. \quad (4)$$

Для перетворення рівняння (4) розділимо обидві його частини на обсяг камери аварійного повітропостачання і підставимо (2) і (3) рівняння

$$\frac{\Delta m}{v} = \int_0^t [C_0(x) - C_1(x)] dx. \quad (5)$$

Ліва частина рівності (5) - це зміна кількості субстанції, віднесена до одиниці об'єму, тобто зміна концентрації, яку можна записати так

$$\frac{\Delta m}{v} = \Delta C = C(t) - C(0), \quad (6)$$

де $C(t)$ – концентрація субстанції в будь-який момент часу, $C(0)$ – концентрація субстанції до початку дії збурювання.

Тоді, враховуючи (5) і (6) рівняння, маємо

$$C(t) - C(0) = \frac{v}{V} \int_0^t [C_0(x) - C_1(x)] dx . \quad (7)$$

В результаті диференціювання рівняння (7) отримуємо математичний опис моделі ідеального перемішування шкідливих домішок у диференціальній формі

$$\frac{dC}{dt} = \frac{v}{V} (C_0 - C) . \quad (8)$$

Підкреслимо, що відношення $\frac{v}{V}$ характеризує інтенсивність повітрообміну в КАПП. Разом з цим це відношення, як було відзначено вище характеризує «ідеальність» перемішування в камері аварійного повітропостачання. Щоб згладити таке припущення, вважається доцільним ввести безрозмірний параметр α , який буде характеризувати відхилення перемішування в КАПП від «ідеальності», тобто від рівномірності. Тоді рівняння (8) прийме вигляд

$$\frac{dC}{dt} = \alpha \cdot \frac{v}{V} (C_0 - C) . \quad (9)$$

Оскільки структура моделі визначена у вигляді звичайного диференціального рівняння першого порядку, то треба задати також початкову умову

$$C(t = 0) = C_n , \quad (10)$$

де C_n – концентрація шкідливих домішок в камері в початковий момент часу, г/м³.

Рівняння (9) і початкова умова (10) рівняння являють собою задачу Коші [9].

Розглянемо розв'язання задачі Коші (9), (10) в загальному вигляді, тобто, коли об'ємна швидкість потоку повітря і концентрація субстанції в потоці повітря будуть залежать від часу $v = v(t)$,

$$C_0 = C_0(t) . \quad (11)$$

Тоді рівняння (9) з урахуванням (11) запишеться у вигляді

$$\frac{dC}{dt} = \alpha \frac{v(t)}{V} (C_0(t) - C) . \quad (12)$$

Враховуючи, що диференціальне рівняння (9) є звичайним лінійним диференціальним рівнянням першого порядку, для його розв'язання скористаємось методом Бернуллі [10]. Для цього рівняння (11) представимо у вигляді

$$\frac{dC}{dt} + \alpha \frac{v(t)}{V} C = \alpha \frac{v(t)}{V} C_0(t) . \quad (13)$$

Рішення будемо шукати у вигляді добутку двох невідомих функцій

$$C(t) = u(t) \cdot w(t) . \quad (14)$$

Підставляємо (14) в рівняння (13)

$$\frac{d[u(t) \cdot w(t)]}{dt} + \alpha \frac{v(t)}{V} u(t) \cdot w(t) = \alpha \frac{v(t)}{V} C_0(t) . \quad (15)$$

Проводячи диференціювання в (14) рівнянні, отримуємо

$$u'(t) \cdot w(t) + u(t) \cdot w'(t) + \alpha \frac{v(t)}{V} u(t) \cdot w(t) = \alpha \frac{v(t)}{V} C_0(t) . \quad (16)$$

Далі групуємо змінні в лівій частині рівняння (16)

$$u'(t) \cdot w(t) + u(t) \left[w'(t) + \alpha \frac{v(t)}{V} w(t) \right] = \alpha \frac{v(t)}{V} C_0(t) . \quad (17)$$

Прирівнюємо нулю вираз в квадратних дужках, в результаті чого отримуємо систему двох диференціальних рівнянь першого порядку з відокремленими змінними

$$\begin{cases} w'(t) + \alpha \frac{v(t)}{V} w(t) = 0 \\ u'(t) \cdot w(t) = \alpha \frac{v(t)}{V} C_0(t) . \end{cases} \quad (18)$$

Знаходимо частинний розв'язок першого рівняння з системи (18) методом розділення змінних, послідовно записуємо

$$\frac{dw(t)}{dt} + \alpha \frac{v(t)}{V} w(t) = 0 , \quad \frac{dw(t)}{dt} = -\alpha \frac{v(t)}{V} w(t) , \quad \frac{dw}{w} = -\alpha \frac{v(t)}{V} dt , \quad \int \frac{dw}{w} = -\frac{\alpha}{V} \int v(t) dt ,$$

$$\ln w = -\frac{\alpha}{V} \int_0^t v(x) dx , \quad w = e^{-\frac{\alpha}{V} \int_0^t v(x) dx} . \quad (19)$$

Далі користуємось другим рівнянням із системи (18). Підставляємо в рівняння (19) і послідовно розв'язуємо як рівняння з відокремленими змінними

$$\frac{du}{dt} \cdot w(t) = \alpha \frac{v(t)}{V} C_0(t) , \quad \frac{du}{dt} \cdot e^{-\frac{\alpha}{V} \int_0^t v(x) dx} = \alpha \frac{v(t)}{V} C_0(t) , \quad du = \alpha \frac{v(t)}{V} C_0(t) \cdot e^{\frac{\alpha}{V} \int_0^t v(x) dx} dt ,$$

$$\int du = \frac{\alpha}{V} \int v(t) C_0(t) \cdot e^{\frac{\alpha}{V} \int_0^t v(x) dx} dt , \quad u = \frac{\alpha}{V} \int_0^t v(x) C_0(x) \cdot e^{\frac{\alpha}{V} \int_0^x v(y) dy} dx + A \quad (20)$$

де A – довільна стала.

Користуючись формулами (19) і (20) і маючи на увазі формулу (14), знаходимо загальний розв'язок рівняння (13)

$$C(t) = \left[\frac{\alpha}{v} \int_0^t v(x) C_0(x) \cdot e^{\frac{\alpha}{v} \int_0^x v(y) dy} dx + A \right] \cdot e^{-\frac{\alpha}{v} \int_0^t v(x) dx}. \quad (21)$$

Для розв'язання задачі Коші формули (9) та (10), скористаємось початковою умовою (10), яку підставляємо в рівняння (21)

$$C(0) = \left[\frac{\alpha}{v} \int_0^0 v(x) C_0(x) \cdot e^{\frac{\alpha}{v} \int_0^x v(y) dy} dx + A \right] \cdot e^{-\frac{\alpha}{v} \int_0^0 v(x) dx}, \quad A = C_{\Pi}. \quad (22)$$

Згідно рівняння (22), розв'язок задачі Коші (9) і (10) запишеться у вигляді

$$C(t) = \left[\frac{\alpha}{v} \int_0^t v(x) C_0(x) \cdot e^{\frac{\alpha}{v} \int_0^x v(y) dy} dx + C_{\Pi} \right] \cdot e^{-\frac{\alpha}{v} \int_0^t v(x) dx}. \quad (23)$$

Треба підкреслити, якщо параметр $\alpha = 1$, то формула (23) описує модель «ідеального» перемішування.

Важливим є розгляд рішення (23) при спеціальних збурення вхідних змінних. Розглянемо випадок, коли об'ємна швидкість потоку повітря є постійною, а концентрація субстанції в потоці повітря задається ступінчатою функцією, відповідно,

$$v(t) = v = \text{const}, \quad C_0(t) = C_0 \cdot \eta(t), \quad (24)$$

де $\eta(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ 1, & t \geq 0 \end{cases}$ - одинична функція (функція Хевісайда) [11].

Підставляючи (24) в формулу (23), послідовно знаходимо

$$C(t) = \left[\frac{\alpha}{v} \int_0^t v \cdot C_0 \eta(x) \cdot e^{\frac{\alpha}{v} \int_0^x v dy} dx + C_{\Pi} \right] \cdot e^{-\frac{\alpha}{v} \int_0^t v dx}, \quad C(t) = \left[C_0 \frac{\alpha v}{v} \int_0^t e^{\frac{\alpha v}{v} x} dx + C_{\Pi} \right] \cdot e^{-\frac{\alpha v}{v} t},$$

$$C(t) = \left[C_0 \frac{\alpha v}{v} \frac{v}{\alpha v} (e^{\frac{\alpha v}{v} t} - 1) + C_{\Pi} \right] \cdot e^{-\frac{\alpha v}{v} t}, \quad C(t) = C_0 \left(1 - e^{-\frac{\alpha v}{v} t} \right) + C_{\Pi} e^{-\frac{\alpha v}{v} t}. \quad (25)$$

Формула (25) дозволяє дослідити залежність концентрації субстанції в основній камері КАПП від часу. Разом з цим, ця формула містить ще декілька змінних, які ускладнюють її застосування. З цієї причини виникає питання про зменшення змінних, залежність від яких треба вивчати. Для вирішення цього питання доречно застосувати методи теорії подібності і розмірності [12], згідно якої із змінних можна створити безрозмірні мультиплікативні комплекси, кількість яких менше, ніж початкова кількість змінних. Для цього формулу (24) представимо у безрозмірній формі, поділив обидві частини рівняння на концентрація субстанції в потоці повітря, яке подається в камеру аварійного повітропостачання. Тоді ця формула прийме вигляд

$$\hat{C} = 1 - (1 - \hat{C}_{\Pi}) e^{-\theta}, \quad (26)$$

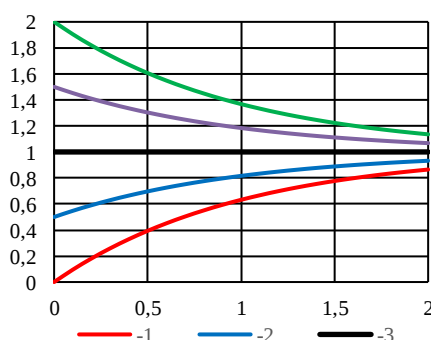
де $\hat{C} = \frac{C}{C_0}$, $\hat{C}_{\Pi} = \frac{C_{\Pi}}{C_0}$, $\theta = \frac{\alpha v}{v} t$.

Таким чином, в формулі (26) замість сімох змінних (C , C_0 , C_{Π} , V , α , v , t) застосовуються три змінні ($\hat{C}$, $\hat{C}_{\Pi}$, θ), що дозволяє істотно спростити дослідження отриманої залежності. Більш того, в формулі (26) одному значенню безрозмірної змінної, записаної в мультиплікативній формі, відповідає безліч значень змінних, які є співмножниками в цієї змінній. Аналізуючи безрозмірні змінні можна сказати, що безрозмірні комплекси, які пов'язані з концентрацією, визначають відносну концентрацію субстанції відносно концентрації субстанції в потоці повітря, яке подається в КАПП. В свою чергу безрозмірний комплекс θ характеризує безрозмірний час, вимірюючи час в одиницях числа обміну повітря в камері.

На (рис.1) представлений графік функції (26).

Рис. 1. Залежність відносної концентрації шкідливих домішок від безрозмірного часу: 1 - $\hat{C}_{\Pi} = 0$; 2 - $\hat{C}_{\Pi} = 0.5$; 3 - $\hat{C}_{\Pi} = 1$; 4 - $\hat{C}_{\Pi} = 1.5$; 5 - $\hat{C}_{\Pi} = 2$

Аналіз графіків, приведених на (рис.1) показує, що їх поведінка залежить від початкової концентрації субстанції в камері аварійного повітропостачання. Якщо початкова концентрація субстанції менша вхідної концентрації субстанції, то концентрація субстанції в КАПП з часом зростає, прагнучи до величини вхідної концентрації. В іншому випадку,



коли початкова концентрація субстанції більше вхідної концентрації субстанції, то концентрація субстанції в КАПП з часом зменшується, теж прагнучи до величини вхідної концентрації. Зрозуміло, якщо початкова і вхідна концентрації рівні, то концентрація субстанції в камері залишається постійною.

Треба підкреслити, що підтвердження правильності вибору структури математичної моделі процесу перемішування в камері аварійного повітропостачання можливо шляхом реалізації подачі речовини (індикатора) на вхід в КАПП у вигляді ступеневої або імпульсного збурення. Далі проводиться порівняння статистичної функції розподілу з прийнятою при моделюванні. Якщо на вхід в КАПП подається імпульсне збурення індикатора, то її концентрація в камері є статистичною функцією, теоретичне значення якої знаходиться шляхом диференціювання функції розподілу при ступеневому збуренні (25)

$$\dot{C}(t) = \frac{av}{v} (C_0 - C_n) e^{-\frac{av}{v}t}. \quad (27)$$

Формулу (26) теж доцільно представити у безрозмірному вигляді. Для цього розділимо обидві частини рівняння (26) на вхідну концентрацію субстанції

$$\hat{C}(\theta) = (1 - \hat{C}_n) e^{-\theta}, \text{ де } \hat{C}(\theta) = \frac{d\hat{C}}{d\theta}. \quad (28)$$

На (рис. 2) представлений графік функції (28). Аналіз графіків, приведених на (рис. 2), показує, що їх поведінка залежить від початкової концентрації субстанції в КАПП. Якщо початкова концентрація субстанції менша вхідної концентрації субстанції, то швидкість зміни концентрації субстанції в КАПП є додатною і з часом спадає, прагнучи до нульової величини швидкості зміни вхідної концентрації. В іншому випадку, коли початкова концентрація субстанції більше вхідної концентрації субстанції, то швидкість зміни концентрації субстанції в камері є від'ємною і з часом по модулю зменшується, теж прагнучи до нульової величини швидкості зміни вхідної концентрації. Зрозуміло, якщо початкова і вхідна концентрації рівні, то швидкість зміни концентрації субстанції в камері аварійного повітропостачання є нульовою.

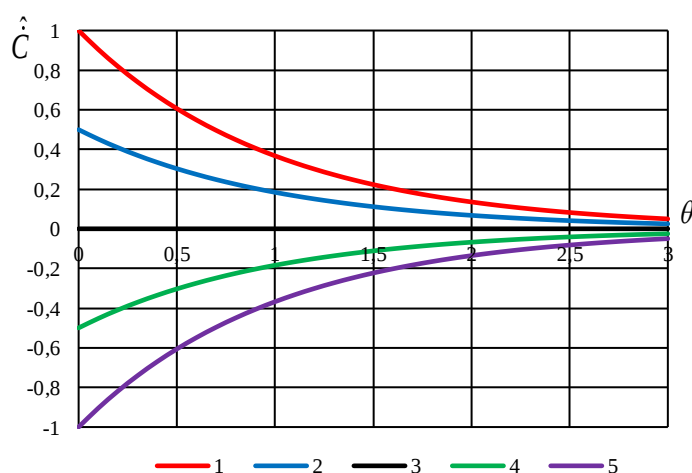


Рис. 2. Залежність швидкості зміни відносної концентрації субстанції від безрозмірного часу: 1 – $\hat{C}_n = 0$; 2 – $\hat{C}_n = 0.5$; 3 – $\hat{C}_n = 1$; 4 – $\hat{C}_n = 1.5$; 5 – $\hat{C}_n = 2$.

Побудова математичної моделі повітрообміну в підземній камері аварійного повітропостачання дає можливість синтезувати алгоритм управління повітрообміном в КАПП. Дійсно, нехай ціль управління задається концентрацією субстанції, яка повинна бути в КАПП, C_3 . Тоді, згідно представленню моделі в безрозмірному вигляді (26), буде мати місце рівняння

$$\hat{C}_3 = 1 - (1 - \hat{C}_n) e^{-\theta_3}, \quad (29)$$

де $\hat{C}_3 = \frac{C_3}{C_0}$, $\theta_3 = \frac{\alpha_0}{v} v_3 t_3$, v_3 – величина керуючого впливу по витраті повітря, t_3 – час досягнення цілі управління.

Для знаходження величини керуючого впливу по витраті повітря послідовно розв'язуємо рівняння (29)

$$(1 - \hat{C}_n) e^{-\theta_3} = 1 - \hat{C}_3, \quad e^{\theta_3} = \frac{1 - \hat{C}_n}{1 - \hat{C}_3}, \quad \theta_3 = \ln \left(\frac{1 - \hat{C}_n}{1 - \hat{C}_3} \right), \quad \frac{\alpha_0}{v} v_3 t_3 = \ln \left(\frac{1 - \hat{C}_n}{1 - \hat{C}_3} \right), \quad v_3 = \frac{v}{\alpha_0 t_3} \ln \left(\frac{1 - \hat{C}_n}{1 - \hat{C}_3} \right).$$

Переходячи до розмірних величин, маємо необхідну величину по витраті повітря для досягнення цілі управління – заданої концентрації субстанції в камері аварійного повітропостачання C_3 , за заданий час досягнення t_3

$$v_3 = \frac{v}{\alpha_0 t_3} \ln \left(\frac{C_0 - C_n}{C_0 - C_3} \right). \quad (30)$$

Разом з цим, треба підкреслити, що при розрахунку величини керуючого впливу по витраті повітря, згідно формули (30), необхідно брати до уваги обмеження по її величині, тобто

$$\underline{v} \leq v_3 \leq \bar{v}, \quad (31)$$

де $\underline{v}, \bar{v}$ – нижня і верхня межі по величині витрати повітря.

Також треба враховувати обмеження по часу досягнення цілі управління, який витікає із реальних умов користування КАПП

$$\underline{t} \leq t_3 \leq \bar{t}, \quad (32)$$

де $\underline{t}, \bar{t}$ – нижня і верхня межі по величині часу досягнення цілі управління.

Формула (30) з урахуванням обмежень (31) і (32) дає можливість стабілізувати задані концентрації субстанцій в камері аварійного повітропостачання, згідно умов користування КАПП.

Математичне моделювання підтвердило можливість здійснення повітрообміну в камері в певний час, та при певній концентрації.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Аналіз процесів повітрообміну і теплообміну в підземних КАПП показав, що вирішення завдань, пов'язаних зі стабілізацією мікроклімату в цих камерах, що відповідає вимогам техніки безпеки, представляє значні труднощі, оскільки ці процеси є складними об'єктами управління, що характеризуються нестационарністю, стохастичністю, відсутністю математичного опису і необхідністю в ньому.

Створена математична модель повітрообміну в підземних камерах аварійного повітропостачання, яка дозволить не тільки спрогнозувати стан повітрообміну, але й розрахувати його ефективність.

Математичне моделювання повітрообміну дозволяє прогнозувати умови праці при надходженні шкідливих домішок в приміщення камери.

Математична модель дозволяє реалізувати процес управління аеродинамічними параметрами повітрообміну.

Список літератури

1. 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.
2. Аерологія гірничих підприємств / А.О. Гурін, П.В. Бересневич, А.А. Немченко, І.Б. Ошмянський. – Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2007. – 461 с.
3. 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.
4. Об'єкт керування. Отримано з https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%B1%27%D1%94%D0%BA%D1%82_%D0%BA%D0%B5%D1%80%D1%83%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F
5. Математичне моделювання новітніх технологічних систем.: Монографія / Матвійчук В.А., Веселовська Н.Р., Шаргородський С.А. – Вінниця: 2021. – 193 с.
6. Вентиляція й освітлення підземних гірничих виробок. Отримано з <http://www.studcon.org/ventylyaciya-y-osvitlennya-pidzemnyh-girnych-y-vyrobok>
7. НПАОП 0.00-1.77-16 «Правила безпеки під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин підземним способом». Наказ Міністерства соціальної політики України від 23.12.2016 № 1592.
8. Модель ідеального перемішування. Отримано з <https://helpiks.org/2-90040.html>
9. Городецький В.В., О.В. Мартинюк, Р.І. Петришин. Задача Коші для одного класу сингулярних еволюційних рівнянь. Доповіді НАУ України: наук.-теорет. журн. Президії НАН України / Президія Нац. Акад. Наук України. – Київ: 2013 р. вип. №1 с. 7-14
10. Лінійні диференціальні рівняння першого порядку. Метод Бернуллі. Отримано з <https://yukhym.com/uk/prikladi-diferentsialnikh-rivnyan/linijni-pershogo-poryadku-metod-bernulli.html>
11. Одична функція Хевісайда. Отримано з <https://jak.koshachek.com/articles/odinichna-funkcija-hevisajda-ce.html>
12. Основи теорії подібності процесів теплообміну. Отримано з <http://um.co.ua/9/9-6/9-62811.html>

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНІВ НА ШЛАКОВИХ МАТЕРІАЛАХ
РАЦІОНАЛЬНИХ МОДИФІКАЦІЙ ДЛЯ ОДНОШАРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ ДАХУ З
ТЕПЛИМ ГОРИЩЕМ ТА БЕЗРУЛОННОЮ ПОКРІВЛЕЮ**

Створення одношарової панелі даху з безрулонною покрівлею і теплим горищем з легкого бетону на пористих заповнювачах дозволить значно спростити технологію заводського виробництва конструкцій і підвищити їх експлуатаційну надійність.

Мета. Отримання шлакопемзобетону і шлакобетону, який задовольняє вимогам, що пред'являються до бетону одношарової панелі даху з теплим горищем і безрулонною покрівлею щодо міцності при стиску і водопроникнення, при відносно низьких значеннях коефіцієнта теплопровідності та щільності.

Методи дослідження. При дослідженнях були використані руйнівні методи оцінки міцності при стиску бетону стандартних зразків та визначення водопроникнення за стандартною методикою. Також шлакопемзобетон досліджуваних структур був підданий випробуванню на водонепроникність при високих тисках.

Наукова новизна. Розроблені бетони на шлакових матеріалах раціональних модифікацій, які характеризуються показниками призменої міцності та модуля пружності, які перевищують нормативні значення, а також володіють підвищеними значеннями граничної розтяжності.

Практичне значення. Отримані шлакопемзобетон та шлакобетон зі зниженою водопроникністю, які мають високі значення міцності на розтяг при розколюванні, призменої міцності і модуля пружності. Все це визначає підвищену граничну розтяжність бетону на шлаковій пемзі в порівнянні з нормативними значеннями. Ці властивості є дуже важливими для бетону, що використовується в конструкціях даху з безрулонною кровлею та теплим горищем.

Результати. Розроблені та досліджені види шлакопемзобетону, які задовольняють вимогам, що пред'являються до бетону одношарової панелі даху з теплим горищем і безрулонною покрівлею щодо міцності при стиску і водопроникнення при відносно низьких значеннях коефіцієнта теплопровідності і щільності, характеризуються граничною розтяжністю і призменною міцністю, що перевищують нормативне значення.

Розроблений шлакобетон, який у віці 28 діб після пропарювання характеризується більш високими показниками міцності в порівнянні з дослідженими модифікаціями шлакопемзобетону та характеризується граничною розтяжністю, що значно перевищує нормативне значення.

Ключові слова: конструкції даху з безрулонною покрівлею над теплим горищем, шлакопемзобетон, шлакобетон, мелений гранульований шлак, відходи ГЗК.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-122-126

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Питання використання шлакової пемзи та гранульованого доменного шлаку як заповнювачів для бетону одношарової панелі даху з безрулонною покрівлею над теплим горищем ще не достатньо відображене у науково-технічній літературі. Тому в наш час є доцільним продовжувати дослідження використання в конструкції панельного даху шлакових матеріалів.

Це стає можливим і доцільним за умови розробки технологічного регламенту, який забезпечує складну сукупність властивостей бетону в конструкції: високі показники міцності, опору водопроникненню, морозостійкості при низькій теплопровідності. Таке технологічне рішення дозволить розширити область застосування шлакопемзобетону і шлакобетону та досягти істотного підвищення заводської готовності конструкцій, зниження будівельних працевитрат і вартості будівництва.

Для захисту бетону конструкцій даху від впливу атмосферної вологи розроблено та застосовуються різні матеріали на основі бітумних й асфальтових мастик, бітумно-полімерні, полімерні мастичні та фарбувальні склади [1-3], плівкові полімерні матеріали [4, 5], що наносяться в будівельних або заводських умовах до або після тепловологої обробки бетону конструкцій. Однак досвід експлуатації дахів з безрулонним покриттям виявляє недовговічність застосовуваних водо-захисних матеріалів [6]. Вплив сезонних і добових коливань температури, що посилюється інсоляцією, зумовлює значні температурні деформації конструкцій даху [7], що призводить до розтріскування гідроізоляційного шару. Тріщини, які при цьому з'являються, стають осередками подальшого руйнування покрівлі при замерзанні води, яка потрапляє в них, що призводить до відшаровування гідроізоляції [6].

Аналіз досліджень і публікацій. У зв'язку зі зростанням цін на пісок, щебінь та інші інертні матеріали для будівництва виникла потреба у вишукуванні економічних та раціональних

прийомів використання місцевої сировини для виробництва будівельних матеріалів [8]. Додатковим, погіршуючим фактором, що схиляє до цих рішень, є ціни на енергоносії, що постійно зростають і, як наслідок, збільшуються витрати на транспортування матеріалів та сировини до місця будівництва [8].

Світовий та вітчизняний досвід дозволяє припустити, що оптимальним виходом із такої ситуації може стати застосування бетонів зі спрямовано функціональними органічними та мінеральними добавками, що забезпечують отримання надійних будівельних конструкцій [8].

В нашому регіоні накопичилась велика кількість ГЗК, які можуть бути використані в якості одного з компонентів складного в'язучого [8-10] або дрібного заповнювача.

Як відзначається в роботі [11], на сьогодні в Україні промисловими відходами відчується до 5 тис. га земельних ділянок. Щорічно додається тільки відходами збагачення залізних руд на 60-80 мільйонів тонн. На п'яти гірничозбагачувальних комбінатах Кривбасу із загального обсягу видобутої гірничої маси у вигляді товарної сировини використовується лише 38 %, інша йде у відвали [11]. Загалом у відвалах і хвостосховищах цих комбінатів накопичилося понад 350 млн м³ мінеральних відходів. У середньому гірничо-збагачувальні комбінати Кривого Рогу щорічно складають у відвали 15-20 млн м³ безрудних кварцитів [11].

Сьогодні це є серйозною небезпекою для екологічного стану регіонів України і особливо Кривбасу. Тому проблеми використання промислових відходів вимагають невідкладного рішення [11].

Крупні гірничо-збагачувальні комбінати є джерелами забруднення довкілля. До їх складу входять хвостосховища, які тільки на Криворіжжі займають площу понад 7600 га і є потужними джерелами пилоутворення, викликають засолення значних територій, змінюють їх гідрологічний режим [12].

Особливої уваги заслуговує проблема твердих відходів, яких в гірничодобувних регіонах накопилася величезна маса, причому їх видалення та складування перестало бути економічно виправданим [13].

На ГЗК склалася така ситуація, що відходи виробництва економічно не існують, у фінансовій звітності не відображаються і на показники господарської діяльності не впливають. На підприємствах утворилось замкнуте коло: відходи не враховуються тому, що не вигідно, а не вигідно, тому що не враховуються [14].

У 2015 р. Комісія ЄС прийняла план дій щодо циркулярної економіки, як елементу «зеленого» сценарію розвитку світової економіки [15]. Він націлений на стимулювання сталого споживання і застосування виробничих моделей з дотриманням зобов'язань ЄС у рамках «Програми сталого розвитку 2030». У плані підкреслювалося, що перехід до циркулярної економіки вимагає дій протягом всього життєвого циклу продукту: від виробництва до створення ринків вторинної сировини [15].

Україна у контексті «зеленого» курсу має як великі проблеми, так і великий потенціал, адже проблема відходів знаходиться у центрі уваги всієї циркулярної економіки [15].

Постановка завдання. Метою дослідження є отримання шлакопемзобетону і шлакобетону, який задовольняє вимогам, що пред'являються до бетону одношарової панелі даху з теплим ґрищем і безрулонною покрівлею щодо міцності при стиску і водонепроникнення, при відносно низьких значеннях коефіцієнта теплопровідності та щільності.

Викладення матеріалу та результати. В даній групі експериментів досліджувалися бетони на шлакових матеріалах раніше встановлених раціональних модифікації з уведенням добавки ГКЖ-11 у кількості 0,03 % і без неї.

Склади бетону на шлакових матеріалах зображені в табл. 1.

Результати виконаних досліджень шлакопемзобетону і шлакобетону наведено в табл. 2.

Зареєстрована у процесі випробувань міцність при стиску досліджуваного шлакопемзобетону ГК-20 складає 30,7 МПа, шлакопемзобетону ГК-10 – 32 МПа, і у віці 28 діб після пропарювання відповідає класу С 25 (табл. 2).

Введення добавки ГКЖ-11 у кількості 0,03 % від маси цементу і меленого шлаку збільшує міцність при стиску шлакопемзобетону ГК-20 та ГК-10 відповідно до 32 МПа (4,2 %) та 33,7 МПа (5,3 %) (табл. 2).

З метою зіставлення величин міцності бетону при осьовому розтягуванні і розтягуванні при розколюванні була виготовлена серія зразків з шести призм і шести кубів розміром, відповідно, 100×100×400 мм і 150×150×150 мм із шлакопемзобетону складу Ш-11.

Таблиця 1

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

Шифр складу	Грани- чна круп- ність запов- нювача	$\frac{M}{M+K}$	Шлакова пемза						Граншлак		Меле- ний гран- шлак, кг	Це- мент, кг	ГКЖ-11, в перера- хунку на суху ре- човину	Вода, л
			0-5		5-10		10-20		л	кг				
			л	кг	л	кг	л	кг						
Ш-21	20	0,5	598	666	239	179	359	256	-	-	270	300	-	282
Ш-22	20	0,5	608	677	243	182	365	261	-	-	270	300	174	269
Ш-11	10	0,66	721	803	372	279	-	-	-	-	300	300	-	290
Ш-12	10	0,66	729	812	376	282	-	-	-	-	300	300	180	276
ГШ	5	1	-	-	-	-	-	-	1150	1350	275	300	-	276
ГШП	5	1	-	-	-	-	-	-	1170	1372	275	300	173	262

Таблиця 2

Фізико-технічні властивості бетону на шлакових матеріалах для конструкцій даху з безрулонною покрівлею над теплим горіщем

Шифр складу	Вид бетону	Властивості бетону віком 28 діб після пропарювання							
		R , МПа	R_{np} , МПа	R_{pp} , МПа	E , МПа	$\epsilon_{pr} \times 10^5$	K_w , г/см ²	λ , Вт/м·К	γ , кг/м ³
Ш-21	Шлакопемзобетон ГК-20	30,7	30,1	2,63	21900	12	0,27	0,456	1760
Ш-22	Шлакопемзобетон ГК-20	32	31,9	3,03	22400	13,52	0,22	0,461	1779
Ш-11	Шлакопемзобетон ГК-10	32	30,7	2,34	21400	10,93	0,28	0,473	1806
Ш-12	Шлакопемзобетон ГК-10	33,7	33,1	2,82	22000	12,81	0,24	0,468	1819
ГШ	Шлакобетон	32,8	31,6	3,04	22200	13,69	0,32	0,480	1980
ГШП	Шлакобетон	35,5	34,9	3,3	23000	14,34	0,26	0,483	1996

Випробування проводилися відповідно до [16] у віці 28 діб після пропарювання.

Результати проведених випробувань виявили відповідність показників міцності шлакопемзобетону при осьовому розтягуванні і розтягуванні при розколюванні, середні значення яких різняться на 3,9 % (табл. 3).

Таблиця 3

Результати випробування міцності шлакопемзобетону при розтягненні

Вид випробування	Міцність зразків R , МПа							Коефіцієнт варіювання, %
	1	2	3	4	5	6	середнє арифметичне значення R	
Осьове розтягнення	2,16	2,42	2,44	1,86	1,98	2,62	2,25	13,1
Розтягнення при розколюванні	2,16	2,46	2,51	2,32	2,38	2,23	2,34	5,7

Аналіз результатів дав повні підстави для того, щоб при проведенні подальших досліджень міцність бетону при розтягуванні оцінювати шляхом випробування зразків кубів на розтяг при розколюванні.

Шлакопемзобетон з добавкою метилсиліконату натрію, в порівнянні з бездобавковим, виявляє високі значення міцності на розтяг при розколюванні (R_{pp}), призмної міцності (R_{np}) і модуля пружності (E). Так, додавання 0,03 % ГКЖ-11 змінює R_{pp} шлакопемзобетону ГК-20 з 2,63 до 3,03 МПа, ГК-10 – з 2,34 до 2,82 МПа (табл. 2).

Модуль пружності бетону E відповідно зростає для шлакопемзобетону ГК-10 з 21400 МПа до 22000 МПа, для ГК-20 – з 21900 до 22400 МПа (табл. 2).

Усе це визначає підвищену граничну розтяжність бетону на шлаковій пемзі з добавкою 0,03% ГКЖ-11 порівняно з бетоном без добавки, яка зростає для шлакопемзобетону ГК-20 і ГК-10, відповідно, на 12,6 % та 17,2 %.

Гранична розтяжність досліджуваних видів шлакопемзобетону без ГКЖ-11 і з добавкою ГКЖ-11 перевищує нормативне значення (для бетону на пористих заповнювачах класу С 25) відповідно в 1,62 та 1,82 рази при використанні заповнювача ГК-20, у 1,47 та 1,73 рази при заповнювачі ГК-10.

Відношення R_{np}/R шлакопемзобетону коливається в межах 0,96 - 0,98. Призменна міцність бетону на шлаковій пемзі ГК-20 перевищує нормативне значення у 1,28 рази, ГК-10 – у 1,25.

Введення добавки ГКЖ-11 в оптимальній кількості збільшує R_{np} шлакопемзобетону ГК-20 і ГК-10 відповідно на 6 % і 5,5 %.

Показник водопроникнення досліджуваних модифікацій шлакопемзобетону знаходиться в межах 0,28 - 0,27 г/см². Добавка ГКЖ-11 знижує K_w до 0,22 - 0,24 г/см² (табл. 2).

Поряд з оцінкою водопроникнення за стандартною методикою, шлакопемзобетон досліджуваних структур був підданий випробуванню на водонепроникність при високих тисках за методикою [17]. Дослідження проводилися в центральній лабораторії об'єднання "Криворіжзалізобетон". Зразки пластини розміром 150×150×50 мм і циліндри $D=H=150$ мм для оцінки водонепроникності за вищевказаними методиками були виготовлені з бетонної суміші одного замісу без добавки ГКЖ-11 при однакових режимах формування і твердіння.

Дослідженнями встановлено, що шлакопемзобетон у віці 7 діб, водопроникнення якого характеризується $K_w = 0,28-0,3$ г/см², відповідає марці водонепроникності за [17] W-6 і задовольняє вимогам, що пред'являються до бетону одношарових конструкцій даху з безрулонною покрівлею та теплим горищем з водонепроникності.

В умовах експерименту, введення добавки ГКЖ-11 в оптимальних кількостях, не має істотного впливу на коефіцієнт теплопровідності шлакопемзобетону, як наведено в табл. 2.

Таким чином, розроблені та досліджені види шлакопемзобетону ГК-20 та ГК-10 з витратою цементу та меленого граншлаку, відповідно, 300 та 270-300 кг/м³ задовольняють вимогам, що пред'являються до бетону одношарової панелі даху з теплим горищем і безрулонною покрівлею щодо R і K_w при відносно низьких значеннях коефіцієнта теплопровідності і щільності, характеризуються граничною розтяжністю і призменною міцністю, що перевищують нормативне значення, відповідно, в 1, 62 ... 1,47 і 1,25 ... 1,28 рази.

Введення добавки ГКЖ-11 зумовлює збільшення R , R_{pp} , R_{np} , E і ϵ_{np} шлакопемзобетону, сприяє підвищенню опору бетону водопроникненню.

Шлакобетон складу, представленого у табл. 1, у віці 28 діб після пропарювання характеризується більш високими показниками міцності в порівнянні з дослідженими модифікаціями шлакопемзобетону ГК-20 і ГК-10. Міцність при стисканні шлакобетону із запровадженням 0,03 % ГКЖ-11 підвищується з 32,8 до 35,5 МПа, міцність на розтяг при розколюванні – з 3,04 до 3,30 МПа.

Бетон на гранульованому доменному шлаку характеризується граничною розтяжністю, що значно перевищує нормативне значення. Це перевищення становить 1,85 рази, для шлакобетону без ГКЖ-11 та 2,1 рази з додаванням ГКЖ-11.

Показник водопроникнення шлакобетону K_w становить 0,32 г/см². Введення 0,03 % ГКЖ-11 від маси цементу і меленого шлаку сприяє зниженню K_w до 0,26 г/см².

Коефіцієнт теплопровідності шлакобетону знаходиться в межах 0,480...0,483 Вт/(м·К) і практично не залежить від наявності в бетоні добавки ГКЖ-11.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Теплопровідність шлакопемзобетону і шлакобетону росте зі збільшенням витрати цементу і меленого шлаку. При цьому зміна вмісту останнього, проти портландцементу, менш істотно відбивається на теплопровідності.

Бетон на шлакових матеріалах класу С25-С30 раціональних модифікацій характеризується показниками R_{np} і E , які перевищують нормативні значення, відповідно, в 1,25 і 1,2 рази для шлакопемзобетону ГК-10, в 1,28 та 1,25 рази для шлакопемзобетону ГК-20, у 1,26 та 1,11 рази для шлакобетону, а також підвищеними значеннями граничної розтяжності.

Застосування добавок поверхнево-активних речовин забезпечує поліпшення властивостей бетону на шлакових матеріалах. Уведення в бетонну суміш добавки ГКЖ-11 у кількості 0,03 % від маси цементу та меленого шлаку сприяє збільшенню міцності при стисканні та розтягуванні при розколюванні, призмової міцності та граничної розтяжності бетону, зниженню його водопроникнення.

Список літератури

1. Касымов И. К., Салимов А. Ю. Некоторые теоретические основы пропитки бетона в расплавах термопластика / И. К. Касымов, А. Ю. Салимов // Науч. тр. / Среднеазиат. политехн. ин-т, 1973, вып. 109. - С. 108-114.
2. Салимов А. Ю. Технология пропитки плит покрытия / А. Ю. Салимов // Науч. тр. / Ташкент, политехн. ин-т, 1973, вып. 109. - С. 114-120.
3. Фоломин А. И., Кричевская Е. И. Рекомендации по применению в конструкциях совмещенных крыш безрулонных кровель, полимерных материалов и панелей из водонепроницаемых бетонов / А. И. Фоломин, Е. И. Кричевская // М.: Стройиздат, 1970. - 37 с.
4. Зуфаров К. З. Применение безрулонной кровли на основе полимерной пленки в жилых домах Ташкента / К. З. Зуфаров // - Строительство и архитектура Узбекистана, 1972, No2. - С. 13-15.
5. Краснов В. В., Диамант М. И. Сборная крыша с безрулонными кровельными плитами / В. В. Краснов, М. И. Диамант // Жилищное строительство, 1978. № 9. - С. 13-16.
6. Фазылов У. Ф. Состояние и перспективы развития крыш с безрулонной кровлей в жилищном строительстве IV климатического района / У. Ф. Фазылов // Опыт проектирования, изготовления и применения безрулонных крыш в гражданском строительстве. Ташкент: 1980. - С. 1-3.
7. Спивак Н. Я. Совершенствование конструкций крупнопанельных жилых домов / Н. Я. Спивак // М.: Знание, 1973. - 64 с.
8. Шишкин А. А., Шишкина А. А., Щерба В.В. Особенности использования отходов горнообогатительных комбинатов в производстве строительных материалов / А. А. Шишкин, А. А. Шишкина, В. В. Щерба В.В. // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. - 2013. - № 1(99). - С. 8 – 12.
9. Резниченко П. Т. Охрана окружающей среды и использование отходов промышленности [Текст] / П. Т. Резниченко, А. П. Чехов. - Днепропетровск: Промінь, 1973. - 94 с.
10. Шишкин А. А. Бетоны на основе шламов обогащения железных руд и щелочного компонента [Текст]: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Шишкин Александр Алексеевич. - Кривой Рог, 1989. - 177 с.
11. Валовой О. І., Астахов В. І., Афанасьєв В. В., Валовой М. О., Єременко О. Ю. Використання відходів гірничорудної промисловості у промисловому, цивільному та транспортному будівництві / О. І. Валовой, В. І. Астахов, В. В. Афанасьєв, М. О. Валовой, О. Ю. Єременко // Гірничий вісник. - 2020. - вип. 107. - С. 142-147.
12. Малахов И. Н. Качество жизни: опыт экологического прочтения / И. Н. Малахов // Кривой Рог: Вежа. - 1999.- 158 с.
13. Моссур П. М., Негода С. В. Техногенное минеральное сырье и его использование в Украине / П. М. Моссур, С. В. Негода // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2007. Вип. 6. - С. 299 - 307.
14. Руденко О. В. Відходи гірничо-збагачувального виробництва: особливості при визначенні їх об'єктом обліку / О. В. Руденко // ISSN 2074-5362. Європейський вектор економічного розвитку. - 2011. - № 1 (10). - С. 202 – 207.
15. Лепа В. В., Прогнімак О. Д. Проблеми утилізації доменних шлаків у контексті переходу до циркулярної економіки / В. В. Лепа, О. Д. Прогнімак // Економічний вісник Донбасу. - 2021. Вип 1 (63). - С. 129 – 145.
16. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. - На заміну ГОСТ 10180-90; введ. 01.09.2010. - К.: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2010. - 43 с.
17. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. - На заміну ГОСТ 12730.5-78; введ. 01.07.2009. - К.: ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», 2009. - 38 с.

УДК 622.271

П.В. БІЛЕНКО, гірн. інженер, Перший заст. гендиректора,
АТ «НДПІ по збагаченню й агломерації руд чорних металів «Механобрчормет»
Г.І. ЄРЕМЕНКО, канд. техн. наук, доц.,
С.О. ЖУКОВ, В.В. ПЕРЕГУДОВ, доктори техн. наук, професори,
Криворізький національний університет

ПЕРСПЕКТИВИ ТА ЧИННИКИ ЗАСТОСУВАННЯ БЕЗПЛОТНОГО РОБОТИЗОВАНОГО АВТОТРАНСПОРТУ В КАР'ЄРАХ УКРАЇНИ

Основна мета дослідження полягає в аналітичному огляді сучасного стану кар'єрного автотранспорту й ІТ-орієнтованих тенденцій щодо його подальшого розвитку в умовах глибоких залізрудних кар'єрів значної потужності з виділенням перспективних моделей, потенційно придатних до умов Кривбасу.

Методами дослідження є актуальний та компаративний аналіз основних статистичних показників щодо гірничотранспортних систем найбільш масштабних відкритих гірничих розробок рудних родовищ з наступним прогнозуванням перспективності технічного переозброєння крупних залізрудних кар'єрів України в напрямку роботизованого рухомого складу.

Наукова новизна дослідження полягає в установленні сучасних тенденцій та закономірностей в еволюції кар'єрного автотранспорту зі зростанням глибини гірничих робіт.

Практична значимість: можливість прогнозування ефективності й обґрунтування параметричного діапазону технічного переозброєння вантажопотоків рудних кар'єрів при проектуванні розвитку їх глибоких горизонтів.

Результати. На підставі виконаного авторами аналізу стану транспортно-технологічних комплексів рудних кар'єрів аргументовано стверджується, що впровадження роботизованого автотранспорту у виробничі процеси залізничних кар'єрів України є найбільш перспективним і реальним напрямком у технічному й економічному вирішенні питань удосконалення переміщення гірничої маси. Застосування роботизованих кар'єрних автосамоскидів забезпечує найбільш гнучку оптимізацію будь-якої внутрішньокар'єрної системи екскавації та транспортування гірських порід, проте, гірничодобувна галузь продовжує працювати з використанням звичайних автосамоскидів. В даний час неодноразово альтернативою роботизованому автотранспорту стає навіть використання 300-тонних і більш потужних самоскидів у зв'язку з великими експлуатаційними витратами. Життєздатність застосування роботизованого автотранспорту полягає у ступені його економічності й безпеки. Це – ті переваги, які він забезпечує порівняно зі звичайною системою доставки за допомогою автомобільного транспорту, яку він має замінити. Аналіз останніх досліджень переконливо продемонстрував повністю виправдане відродження інтересу щодо транспортування гірничої маси в глибоких рудних кар'єрах роботизованим автотранспортом та технічні й економічні переваги даного напрямку одночасно зі зменшенням негативного впливу на навколишнє середовище за умов його реалізації.

Ключові слова: гірська порода, кар'єр, роботизований автосамоскид, кар'єрний транспорт.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-126-133

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. На даний момент в усьому світі домінує транспортування гірничої маси в кар'єрах автомобільним транспортом. Глибини ж відпрацювання рудних покладів вже перевищують 400 м, що робить таку доставку все більш небезпечною, витратною та малоефективною. Якщо ж тенденція відпрацювання кар'єрів рухатиметься й надалі у бік поглиблення останніх, то застосування принципово нових кар'єрних автосамоскидних систем стане чи не єдиним рішенням з можливих реально щодо підвищення продуктивності транспортування гірничої маси.

Аналіз досліджень і публікацій. Постійне ускладнення умов праці в кар'єрах та зростання тиску економічних чинників змушує гірників шукати альтернативи традиційному автомобільному транспорту, серед яких на особливу увагу заслуговують системи безпілотного роботизованого автотранспорту [1-3]. При цьому головна увага приділяється не тільки конструктивному удосконаленню даних засобів, але й реорганізації функціонування приймаючої їх кар'єр-системи з метою максимально ефективного їх упровадження й застосування в умовах глибоких рудників [4-10].

Постановка завдання. Серед сучасних тенденцій в розвитку технологічного кар'єрного автотранспорту все помітніше виділяється тенденція до поглиблення рівня автоматизації рухомого складу й управління його роботою в напрямку повної роботизації, що актуалізує проблему своєчасної та системної підготовки вітчизняних відкритих розробок адекватно до відміченого тренду.

Викладення матеріалу та результати. Сучасна розробка родовищ суттєво ускладнює участь людини в технологічних процесах видобутку корисних копалин, створює проблеми пошуку все більш висококваліфікованого персоналу. Тому найважливішим напрямом інноваційного розвитку гірничодобувної промисловості є розробка технологій безлюдної виїмки та транспортування руди із застосуванням сучасних програмно-апаратних комплексів, інтегрованих у загальну систему управління гірничодобувним підприємством. За цих умов особливої значущості набуває створення системи автоматизованого та роботизованого видобутку корисних копалин в кар'єрах. При цьому управління здійснюється як мінімум дистанційно, а у загальному випадку – повністю автоматично. Застосування даної технології гарантує підвищення продуктивності та безпеки відкритих гірничих робіт за рахунок видалення людини з небезпечної зони, їх ефективності за рахунок усунення простоїв, пов'язаних із людськими факторами й управління технікою в оптимальних режимах.

Автономні безпілотні роботизовані автосамоскиди (АБРА) – порівняно новий вид техніки, який передбачає роботизоване керування транспортом при виконанні широкого спектру виробничих заходів та робіт. Безпілотні роботизовані транспортні засоби здатні вирішувати різні завдання в процесі доставки гірничої маси без участі людини або керуватися дистанційно з кабіни, яка знаходиться в іншому місці. Вони рухаються заданою траєкторією і в процесі програмування враховуються різні варіанти маневрів: під'їзд до місця роботи та від'їзд, вантажні та розвантажувальні заходи, рух по певній ділянці та багато іншого.

Безпілотне роботизоване управління стає можливим завдяки застосуванню супутникової навігації, а також заміні механічних електричних зв'язків. У таких машинах з'явилися інтелектуальні системи керування та контролю у загальному інформаційному просторі. В АБРА замість кабіни водія встановлено інтелектуальний модуль. Завдяки такій комп'ютеризації можна використовувати транспорт у цілодобово і тим самим підвищити його ефективність.

У розвитку роботизації – найбільші резерви підвищення ефективності та безпеки гірничого виробництва. Впровадження систем безпілотного роботизованого управління транспортуванням гірничої маси кардинально змінює систему організації виробництва і праці та стимулює появу нових сучасних технологій [1]. За цих умов бортове обладнання автосамоскидів має бути модернізованим. Необхідно передбачити кілька незалежних бортових комп'ютерів (контролерів) з відповідними групами сенсорів, які відповідають за вирішення окремих завдань автоматичного керування, таких, як: інтелектуальна система розпізнавання перешкод; бортовий комплекс для дистанційного керування технікою; центральний керуючий бортовий комп'ютер для керування технікою й узгодження взаємодії всіх бортових програмних підсистем.

Навігаційне обладнання модернізується відповідно до наступних вимог:

на кар'єрну техніку необхідно встановити обладнання високоточної системи навігації;

для більш надійного визначення координат, навіть за короткочасної відсутності даних від диференціальної станції або відсутності видимості супутників, необхідно встановити системи інерційної навігації, що базуються на гіроскопах.

Спільне використання супутникової та інерційної систем навігації дозволить забезпечити високу точність і надійність визначення розташування й орієнтації техніки у просторі.

В сучасних системах управління гірничо-транспортними комплексами використовуються системи бездротової передачі даних, а також комбінації систем: УКХ-зв'язок, транкінгові системи, широкосмугові системи передачі даних, стільникові системи зв'язку й ін. Для побудови безпілотних роботизованих систем вантажоперевезень (БРСВ) необхідними є широкосмугові системи і технології бездротової передачі даних: WiFi, WiMax, MESH-системи й інша техніка.

Для досягнення максимальної продуктивності системи необхідно, щоб кар'єрна техніка не припиняла свою роботу навіть за короткочасної відсутності зв'язку або затримки в обробці даних на сервері, для чого необхідно забезпечити максимальну автономність бортового програмного забезпечення (БПЗ), яке, окрім функцій управління робочими органами кар'єрної техніки, контролю відстаней до перешкод, їх розпізнавання, визначення місцезнаходження та орієнтації, має здійснювати безпечний рух заздалегідь заданим маршрутом, а також – забезпечити можливість роз'їзду з іншими учасниками руху без участі центрального сервера системи. За сервером диспетчерського центру необхідно залишити функції контролю за безпекою руху, прогнозування небезпечних ситуацій та оповіщення оператора при виникненні позаштатних ситуацій, коли потрібним є безпосереднє віддалене керування автосамоскидами й іншою технікою, вирішення оптимізаційних завдань та ведення цифрової моделі кар'єру, а також загальну функцію автоматичної диспетчеризації та оптимізації роботи [2].

Для оцінки ефективності даних заходів доречним є аналіз результатів експериментальної часткової роботизації руху загальних транспортних мереж [11], з якого слідує, що фактично можна ефективно вирішити проблему перевантаженості автошляхів, пропускну здатність яких за цих умов можна підвищити до 273%, адже на шосе, наповненому звичайними автомобілями з водіями, пропускну здатність однієї смуги руху становить приблизно 2,200 авто/год., і лише 5% доступного дорожнього простору зайняті автомобілями. Це тому, що водіям потрібні смуги руху, як мінімум, у 2 рази ширші автомобіля, і дистанція між автомобілями – 40-50 м.

Дослідники з університету Колумбії [11] спрогнозували перспективність автономних та напівавтономних автомобілів, обладнаних датчиками або міжавтомобільними комунікаційними системами: якщо всі транспортні засоби на дорозі будуть обладнані адаптивним круїз-контролем, то пропускну здатність шосе можна збільшити в 1,4 рази; а якщо – й адаптивними датчиками круїз-контролю та засобами обміну інформацією (про параметри руху) між автомобілями, пропускну спроможність шосе може бути збільшена у 3,7 разів. І збільшення пропускну спроможності досягається без будь-якої модернізації інфраструктури.

На рис. 1 показано, як дистанція між автомобілями залежить від швидкості руху для автомобілів з ручним керуванням (графік 1), для автомобілів, обладнаних адаптивним круїз-контролем (графік 2), та для роботизованих автомобілів, обладнаних засобами обміну інформацією (графік

3). З рис. 1 видно, що за швидкості 120 км/год, роботизовані автомобілі дозволяють скоротити дистанцію з 37 до 6 метрів.

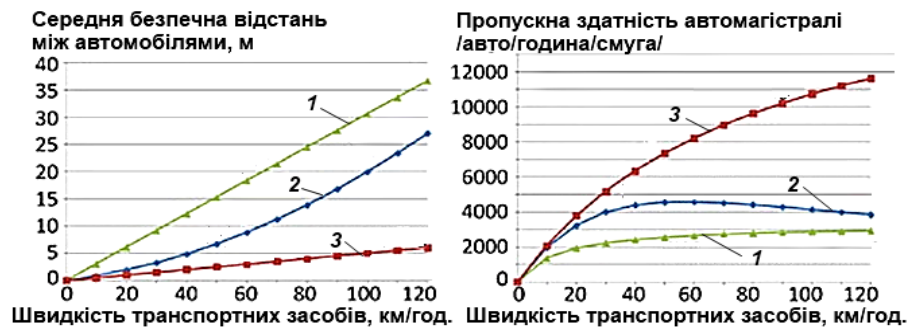


Рис. 1. Залежність дистанції між автомобілями від швидкості руху для автомобілів з ручним керуванням (1), обладнаних адаптивним круїз-контролем (2), та для роботизованих автомобілів, обладнаних засобами обміну інформацією (3)

На рис. 2 показано, як пропускна здатність однієї смуги шосе залежить від швидкості руху для вищевказаних типів автомобілів. З рис. 2 видно, що за швидкості 120 км/год, роботизовані автомобілі дозволяють збільшити пропускну спроможність однієї смуги шосе від 2000 до 12000 автомобілів на годину.

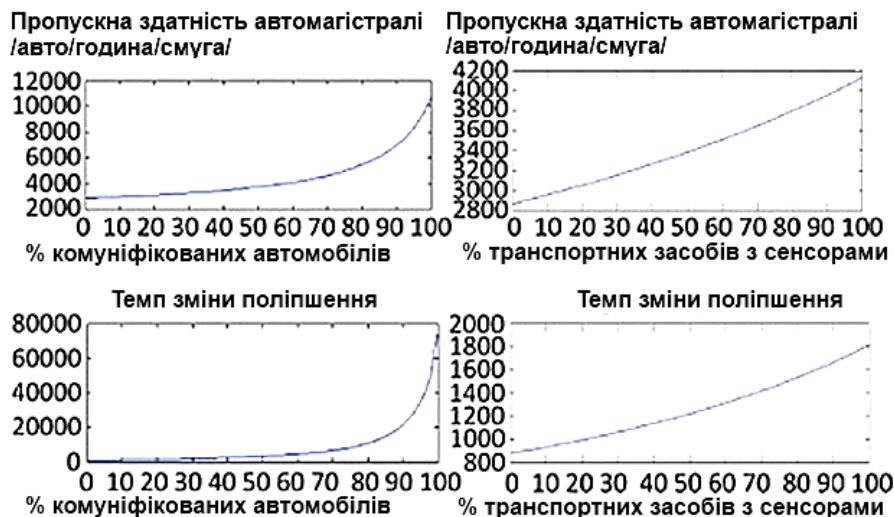


Рис. 2. Залежність пропускної здатності однієї смуги шосе від швидкості руху різних типів автомобілів

Коли робот-автомобіль «знає», що роблять інші, його комп'ютер може розрахувати найкращий план дій та безпечний режим руху, опрацювавши обсяг даних приблизно за час, потрібний водієві для того, щоб перемістити ногу з педалі газу на гальмівну.

Для послідовного відпрацювання технологій застосування БРСВ необхідно виділити етапи: розробка безпілотної роботизованої системи вантажоперевезень за фіксованим маршрутом між стаціонарними пунктами навантаження-розвантаження;

створення БРСВ між екскаваторами та пунктами розвантаження без оснащення дистанційним керуванням екскаваторів й іншої техніки;

створення БРСВ самоскидами з використанням дистанційно-керованої техніки (екскаваторів, бульдозерів, навантажувачів й ін.).

Створення БРСВ є ключовим етапом при застосуванні АБРА. Для її розробки необхідні технічні та технологічні рішення щодо дистанційного й автономного управління кар'єрним самоскидом і організації його руху по заданому маршруту.

До узагальненої структури системи дистанційного керування кар'єрним автосамоскидом мають бути включені бортовий програмно-апаратний комплекс та спеціально обладнане робоче місце оператора. Бортвий контролер забезпечує управління:

пневмостартерним запуском двигуна;

кермовим механізмом;
гальмівною системою;
оборотами дизельного двигуна;
режимами роботи тягового електроприводу;
перекидальним механізмом;

системою освітлення, світлової та звукової сигналізації за командами оператора, що передаються каналом бездротової передачі даних від контролера робочого місця оператора.

Для збереження ручного режиму управління автосамоскидом входи/виходи контролера підключаються паралельно відповідним електричним ланцюгам задіяних органів управління, виконавчих механізмів та пристроїв автосамоскида.

Основною відмінністю АБРА від автосамоскида з дистанційним керуванням є можливість його роботи в автоматичному режимі під керуванням бортового комп'ютера з використанням даних системи високоточної супутникової навігації (можлива інтеграція з інерційною навігаційною системою для забезпечення надійності навігаційних вимірювань), системи запобігання далекоміра та радарів. Оператор, що знаходиться у віддаленому робочому місці (диспетчерському центрі), може забезпечувати контроль роботи автосамоскида і, за необхідності, завдання маршруту руху та вимкнення автономного режиму.

Роботизація впливає на конструкцію самоскидів, що дозволяє зробити їх легшими й ефективнішими (при усуненні кабіни – підвищити вантажопідйомність за рахунок збільшення об'єму кузова). Роботизована ділянка організовується за схемою: «виділений маршрут руху автосамоскидів – АБРА – бункер чи екскаватор – пункт розвантаження (склад або відвал) – грейдери дорожніх робіт, бульдозери на складі чи відвалі».

Для керування технологічними операціями роботизованої системи вантажоперевезень розгортається центр управління у складі: «робоче місце водія (дистанційний пульт управління) – робоче місце диспетчера – сервер – обладнання системи передачі даних – базова станція диференціальної поправки». Серверне програмне забезпечення має забезпечувати організацію циклу руху АБРА на лінії, що включає наступні стадії:

готовність АБРА до автономного руху з місця техобслуговування чи заправки;
розрахунок оптимального маршруту під завантаження; маршруту з атрибутами;
контроль й управління рухом; прибуття до екскаватора; сигнал закінчення вантаження;
розрахунок оптимального місця розвантаження;
підготовка маршруту з атрибутами;
контроль й управління рухом; розрахунок нового маршруту або – на ТО, заправку.
При постановці автономного самоскида під завантаження повинні бути забезпечені:
відсутність непорозумінь за рахунок виділення зон завантаження та його очікування;
точне позиціонування автосамоскидів під завантаження.

Пункт розвантаження самоскидів повинен бути поділений на дві зони: зона розвантаження; зона роботи бульдозера.

З метою безпеки повинна бути виділена зона очікування розвантаження АБРА та передбачені можливості роз'їздів зустрічних АБРА на маршруті, руху попутних АБРА, а також спільної роботи (руху) АБРА і кар'єрної техніки, керованої операторами безпосередньо з кабіни. Для забезпечення функціонування БРСВ потрібним є створення відповідної інфраструктури.

При використанні БРСВ такі параметри геотехнології, як кут ухилу дороги, кут укосу борта кар'єру, швидкість руху АБРА на лінії можуть бути збільшені, а ширина технологічних доріг – зменшена, порівняно з традиційною технологією. Економоефект за цих умов може бути значним, тому потрібними стають детальні дослідження й обґрунтування норм проектування гірничих робіт у разі застосування безпілотної роботизованої кар'єрної техніки.

Найбільш яскравим прикладом цієї нової технології в дії є залізрудний кар'єр «Rio Tinto Pilbara», де можна знайти 80 безпілотних вантажівок «Komatsu» (рис. 3). Використовуючи GPS, радар та лазерні датчики, вантажівки можуть об'їжджати рудник, обминаючи перешкоди та доставляючи на переробку руду. У 2017 р. «Rio Tinto Pilbara» оголосила, що її вантажівки перевезли 1 млрд т гірничої маси, при цьому питомі витрати на руднику скоротилися на 15%.

Для функціонування БРСВ та високої продуктивності кар'єрних автосамоскидів, збереження терміну служби їх основних вузлів і агрегатів, зниження витрати пального та збільшення термінів експлуатації шин має бути забезпечена відповідна якість технологічних доріг. Контроль їх

якості стає найважливішим завданням у зв'язку з відсутністю візуального контролю водієм, а також вимогам до підтримки курсової стійкості. ПЗ має здійснювати автоматичний контроль якості доріг, кількісну оцінку параметрів якості, а також відображати на цифровій карті кар'єру інформацію про місцезнаходження проблемних ділянок й оцінювати типи «поганих» доріг, для включення їх в оптимізаційні алгоритми розподілу самоскидів між пунктами завантаження та розвантаження. У загальному випадку, вихідною інформацією для розрахунку типів неякісного дорожнього покриття є дані телеметрії, що передаються від АБРА: тиск у підвісках, швидкість руху, обрана передача, свідчення інклінометрів і лідарів.

У разі, якщо до складу БРСВ включаються кілька самоскидів, пунктів навантаження та розвантаження, то постає завдання оптимізації роботи такої системи за рахунок оптимального розподілу АБРА на маршруті, відповідно до виробничого плану.

Факторами підвищення продуктивності при використанні АБРА є:

виключення нетехнологічних простоїв, пов'язаних із людським фактором;

зниження простоїв, пов'язаних із непогодою, запиленістю після БВР та загазованістю;

зниження облікової чисельності водіїв. З'являються оператори, які контролюють рух, здатні у разі нештатних ситуацій перевести самоскид у режим дистанційного керування та провести його за маршрутом. Співвідношення: 1 оператор контролює рух 4 АБРА;

зниження експлуатаційних витрат на утримання АБРА (шини, паливе, фонд оплати праці, витратні матеріали тощо), пов'язаних з некоректним керуванням, втомою водіїв;

скорочення капвират на будівництво соціальної інфраструктури;

можливість гірничих робіт на ділянках, де перебування людей заборонено чи обмежено.

Цикл роботи АБРА повинен включати:

поетапне завантаження у першій та у другій точках породного бункера ЗФ;

рух до пункту розвантаження;

заїзд на майданчик очікування (за потреби), розвантаження та повернення.

Пункт розвантаження автосамоскида повинен розділятися на дві зони:

1. Зона розвантаження з визначенням системою автоматично його точок.

2. Зона роботи бульдозера.

На етапі дослідної експлуатації заїзд самоскида під завантаження та виїзд – в режимі дистанційного керування під контролем оператора бункера через пульт дистанційного керування (ПДК). На етапі промислової експлуатації – автоматично: на ділянку запускаються декілька АБРА, що працюють в режимі автономного керування. Оператор ПДК бере на себе керування автосамоскидом за командою технічного спеціаліста у разі виникнення аварійних ситуацій та неможливості продовження роботи АБРА в режимі автономного керування.

До світових лідерів у виробництві АБРА, окрім компанії «Komatsu» (Японія), слід віднести «Caterpillar» (США), «БелАЗ» (Білорусь), «Scania» та «Volvo» (Швеція), «Hitachi» (Південна Корея), а також «Liebherr» (ФРН) [4-10].



Рис. 3. Автонгомі безпілотні роботизовані автосамоскиди: а – «Komatsu», б – «Caterpillar», в – «Scania»

Провідні виробники обладнання «Komatsu», «Caterpillar» та «Hitachi» досягли помітних успіхів у розгортанні автономних систем транспортування, при цьому як основні фактори були визначені економічні переваги та безпека, а також підвищення продуктивності на деяких операціях до 30%. Наприклад, у «Caterpillar» на даний момент близько 200 АБРА «CAT 797 F», що працюють по всьому світу. Також «розумним» стає ще один АБРА – найбільший у світі самоскид «БелАЗ» 75710, власною масою 496 тон.

Слід урахувати, що АБРА пропонують гірничодобувним підприємствам ряд переваг:

- вища точність роботи;
- відсутність проблем із поганою видимістю;
- можливість роботи 24/7 без втоми та перерв на обід;
- виключення людського фактора, який нерідко стає причиною помилок та аварій;
- здатність точно повторювати траєкторію руху, аж до 10 мм;
- відсутність страху при виконанні робіт на гірських розв'язках за умов снігу та дощу, де будь-яка помилка може призвести до аварії;
- зниження кількості нещасних випадків.

Тому не дивує той факт, що багато гірничодобувних компаній упроваджують безпілотну роботизовану техніку і намагаються замінити нею хоча б частину свого автопарку. При цьому результати помітні вже в перші місяці роботи: економія на пальному та оплаті праці, значне підвищення ефективності роботи, зниження часу окупності техніки.

Висновки та напрямок подальших досліджень. Досвід використання АБРА на відкритих розробках впевнено зазначив, що застосування даної техніки дозволяє досягти значних результатів у наступних показниках:

- зростання продуктивності на 10-20%;
- зниження споживання пального на 10-15%;
- зменшення витрат на техобслуговування – близько 8%;
- менший знос гуми – від 5 до 15%;
- підвищення коефіцієнта застосування транспорту на 10-20%.

Проте ситуація – далека від ідеальної. Найбільшою проблемою є відсутність стандартів для автоматизації промислових транспортних засобів. Усі великі гірничодобувні компанії перебувають у стадії інтеграції своїх рішень щодо них. Також не можна забувати і про низку інших проблем, пов'язаних з використанням роботизованої техніки. Сюди належить віднести і необхідність навчання персоналу контролю й обслуговуванню АБРА, переобладнання робочого простору, і навіть правові питання, пов'язані з безпекою робіт. Тому при оцінці ефективності потрібно враховувати всі нюанси, а не лише економоефект від запровадження АБРА.

Однак варто взяти до уваги, що, не дивлячись на деякі труднощі, наявні на даному етапі впровадження безпілотних роботизованих автосамоскидів при веденні відкритих гірничих робіт, цей вид транспорту впевнено витісняє традиційний. І це, як ніколи раніше, є особливо актуальним для гірничодобувної промисловості та роботи кар'єрів, де мають місце ризики для людини (наприклад, розробка уранових руд), а також багато інших факторів, що заважають застосуванню класичних вантажівок. Ключовий фактор заміни полягає лише в тому, скільки часу займе у гірничодобувних компаній перехід на безпілотну роботизовану техніку.

Список літератури

1. **Йохан Ларсон.** Безпілотна експлуатація вантажно-самоскидної техніки в умовах гірничих робіт. - Еребру: Університет Еребру, Школа науки і технологій, Швеція. 2011.
2. **Жданов В., Косолапов А., Ибрагимова Ф.** Роботизация карьерных самосвалов на этапе транспортировки породы / Веб-конференция № 134. – Кузбасс: КГТУ, 2019 рік.
3. **Зню Жао.** Планування шляху кар'єрних автономних самоскидів на транспортній дільниці / Школа ресурсів та техніки безпеки. Центральний південний університет (Китай), 2020.
4. <https://technoaktyv.com.ua/ua/cp61966-komatsu.html>
5. <https://www.scania.com/group/en/home/products-and-services/trucks.html>
6. <https://www.caterpillar.com/ru/company/innovation.html>
7. https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:БелАЗ-7513R_%28беспилотный_самосвал%29
8. <https://www.hitachi.com/>
9. https://ru.wikipedia.org/wiki/Liebherr#/media/%D0%A4%D0%B0%D0%B9%D0%BB:Liebherr_t282_1.jpg
10. <https://www.volvocars.com/uk-ua/>
11. <http://roboting.ru/1685-kak-povysit-propusknuyu-sposobnost-shosse.html>

**ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ В УКРАЇНІ:
СТАН, МОЖЛИВОСТІ ТА ПЕРСПЕКТИВИ**

Метою публікації є дослідження основних бар'єрів на шляху підвищення енергоефективності сучасного парку короткозамкнених асинхронних двигунів (АД) на фоні постійно зростаючої вартості електричної енергії та з урахуванням традиційних технологій, організаційно-правових обмежень та техніко-економічних можливостей.

Методи дослідження. Проаналізовані головні риси проблеми, сучасний стан парку АД та особливості їх експлуатації. Основний акцент зроблено на важливому економічному аспекті проблеми – постійно зростаючій вартості електроенергії у загальному балансі витрат. Проаналізовано особливості енергетичної політики країн ЄС щодо впровадження енергоефективних АД. На основі порівняння ККД короткозамкнених АД класів енергоефективності IE2, IE3 і вітчизняних АД серії АІР в діапазоні 0,75 – 375 кВт проілюстровано перевищення в 3-5 % в діапазоні потужностей 0-5 кВт енергоефективності двигунів провідних світових фірм у порівнянні з вітчизняними аналогами. Розглянуті альтернативні підходи до модернізації АД як часткового вирішення проблеми ресурсо- та енергозбереження. Обґрунтовано важливість розробки гнучкої системи визначення життєвого циклу АД та політики формування їх вторинного ринку. Як одне з пріоритетних завдань широкого моніторингу АД визначено розробку надійних і доступних методів встановлення реального навантаження двигунів в умовах експлуатації. Як пріоритетний рекомендовано використання тензорезисторних датчиків крутного моменту. Проаналізована також можливість використання альтернативних систем виміру моменту.

Наукова новизна полягає у формулюванні комплексу недостатньо досліджених, проблемних та дискусійних питань, що безпосередньо відносяться до АД і пов'язані з підвищенням їх енергоефективності.

Практична значимість роботи витікає із актуальності і масштабу проблеми, яка має всі ознаки загальнонаціональної.

Результати роботи полягають у визначенні основних бар'єрів на шляху підвищення енергоефективності парку АД та розробці шляхів їх усунення або пом'якшення. Сформульовано тезу, що зростання вартості електричної енергії гостро ставить на порядок денний питання зміни традиційних підходів до проблеми проектування та експлуатації АД, зокрема в частині надійного техніко-економічного обґрунтування доцільності їх використання в конкретних умовах експлуатації на основі базового критерія – максимуму ефективності перетворення енергії (ККД).

Ключові слова: асинхронний двигун, класи енергоефективності, модернізація, життєвий цикл, вторинний ринок, датчики крутного моменту.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-133-139

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Доля асинхронних електродвигунів (АД) у світовій номенклатурі складає біля 90 %, а за потужністю – біля 50 %. Такі унікальні показники використання АД, в першу чергу короткозамкнених, обумовлені простотою їх конструкції, надійністю, відносно низькою вартістю. Разом з тим енергетичні показники вітчизняних АД загальнопромислового використання малої і середньої потужності (ККД і $\cos \varphi$) недостатньо високі (наприклад, у порівнянні з європейськими); при цьому вони додатково зменшуються при недовантаженні, невідповідності якості електроенергії нормативним вимогам, при неякісних ремонтах та ін. Тому в контексті актуальної для України проблеми низької енергоефективності існує вагомий і практично не реалізований потенціал енергозбереження, пов'язаний з суттєвим підвищенням енергетичних параметрів парку АД.

Масштаби проблеми проілюструємо простими прикладами. Так, при річному виробництві електричної енергії в Україні в останні довоєнні роки на рівні 160 млрд кВт·год і орієнтовному споживанні її АД близько 60 млрд кВт·год підвищення ККД лише на 1% при середній вартості 1 кВт·год для промисловості 4,0 грн річна економія складе більше 2 млрд грн. Потенційна ж можливість підвищення ККД може бути у 2-3 рази більшою, якщо врахувати той факт, що енергетичні параметри найбільш поширених двигунів потужністю до 5 кВт (біля 60 % загального парку АД) на 3-5 % менший за параметри аналогічних двигунів у розвинених країнах.

Наведемо також додаткову інформацію щодо сучасного стану парку АД в Україні. Основу АД загальнопромислового використання складають двигуни серій АІР, АД, АДТ, 4А, 5А, 6А, АМУ, ІЕС АО, ВАО, АІМ, АІУМ, ВА, ВР та ін. – всього приблизно 30 млн од. За потужністю: АД малої потужності (1-5 кВт) – 60 %, середньої (до 20 кВт) – 20 %, потужні (20-100 кВт) – 7 %, надпотужні (більше 100 кВт) – 1 %. Номінальні енергетичні показники (на прикладі серії АІР):

АД малої потужності – ККД = (72-85,7) %, $\cos \varphi$ = (0,69-0,88); середньої потужності – ККД = (90-92) %, $\cos \varphi$ = (0,8-0,9); потужних – ККД = (90-93,9) %, $\cos \varphi$ = (0,9-0,91); надпотужних – ККД = (94-95,4) %, $\cos \varphi$ = (0,91-0,92).

Таким чином, найбільш масовими є АД потужністю 1-5 кВт з найбільш низькими значеннями ККД, які споживають до 40 % електроенергії. Важливо також зазначити, що половина АД приводить в дію вентилятори (32 %) і насоси (16 %). Але незважаючи на те, що саме даний сегмент має найбільш високий потенціал енергозбереження за рахунок впровадження регульованого електропривода, на практиці цей потенціал реалізований лише на 10-12%.

Експлуатація АД в Україні має наступні характерні риси:

- у різних галузях промисловості від 10 % до 50 % АД потребують щорічного ремонту;

- фактичний середній строк служби двигунів не перевищує 6-7 років;

- у середньому післяремонтні енергетичні показники АД зменшуються на 3-4 %;

- середнє завантаження АД становить 30-40 % (в Європі не менше 60 %);

- системи ефективного моніторингу та діагностики технічного стану й енергетичних показників АД широко не використовуються;

- післяремонтна паспортизація часто проводиться в обмеженому обсязі.

Надана вище інформація однозначно свідчить про нагальну необхідність вирішення великого комплексу проблем у сфері виробництва і практичного використання АД, що стане суттєвим внеском у проблему підвищення енергоефективності в Україні в цілому.

Аналіз досліджень і публікацій. Різні аспекти теорії і практики АД були об'єктом активних досліджень численних авторів як в Україні, так і за кордоном. Вітчизняна бібліографія з цієї тематики налічує десятки монографій і сотні публікацій, що свідчить про багатогранність і складність даної проблеми. Широко розглянуті методи ідентифікації параметрів АД та розробки різних математичних моделей. Значно меншу увагу приділено можливостям отримання доступної й достовірної інформації щодо навантаження двигуна в конкретних умовах експлуатації. Питанням безконтактного визначення моменту (потужності) на валу працюючих електродвигунів присвячені публікації [1, 2]. Значна кількість публікацій присвячена питанням експлуатаційної надійності та діагностики робочих параметрів АД. Так, загальні питання побудови систем технічного діагностування розглянуті в [3-6], а діагностування енергоефективності електромеханічних систем з АД – в роботах [7-10]. Способи зниження втрат енергії в АД у контексті загальної проблеми підвищення їх енергоефективності розглянуті в [11].

Але незважаючи на активний інтерес до зазначеної проблеми слід визнати, що радикальних успіхів у її вирішенні за останні 30 років в Україні не досягнуто. При цьому за межами активних досліджень залишаються деякі практичні питання, що безпосередньо пов'язані з підвищенням енергоефективності АД. Зокрема, дискусійними є питання розробки загальноприйнятого критерію енергоефективної роботи АД, зміни існуючої концепції розробки та використання електродвигунів у зв'язку з постійним зростанням вартості електричної енергії, детального техніко-економічного обґрунтування тривалості життєвого циклу, що тісно пов'язане з політикою формування вторинного ринку АД. Невирішеними є питання щодо широкого впровадження енергоефективних двигунів підвищеної надійності в енергозбережних технологіях, можливостей підвищення енергоефективності АД при їх ремонті та модернізації як часткового вирішення проблеми. Проблемними залишаються питання оновлення стандартів, наприклад, діючого ГОСТ 25941-83, який регламентує визначення ККД, але є застарілим і не враховує новітніх досягнень і можливостей в галузях електроніки, вимірювальної й обчислювальної техніки, а також вітчизняний стандарт ДСТУ 3886-99 «Енергозбереження. Системи електроприводу. Методи аналізу та вибору», який базується на приблизних емпіричних залежностях для відносно нових електродвигунів. Актуальною залишається проблема розробки недорогих датчиків моменту з прийнятними параметрами вартості, точності й універсальності.

Постановка задачі. Реалізація великого за обсягом потенціалу енергозбереження в електромеханічних системах з АД ускладнюється залежністю від багатьох взаємопов'язаних чинників, як зовнішніх – несприятливих фінансово-економічних можливостей, відсутності або недосконалості необхідної нормативно-правової бази, недостатньо високого рівня проектування та культури експлуатації, обмеженості мотиваційного фактору, відхилення параметрів якості електричної енергії, невідповідності параметрів АД і навантаження тощо – так і внутрішніх, серед яких головним є ККД як основна характеристика ефективності перетворення енергії у самому двигуні.

Більшість із перелічених ускладнюючих факторів даної проблеми проаналізована в наукових джерелах, тому в даній публікації акцент зроблено на комплексі питань, які є недостатньо дослідженими, проблемними або дискусійними безпосередньо відносно АД і вирішення яких сприяло б прогресу у напрямку підвищення енергоефективності й експлуатаційної надійності електромеханічних систем з асинхронними приводами.

Метою публікації є дослідження основних бар'єрів на шляху підвищення енергоефективності сучасного парку АД та можливостей їх усунення на фоні постійно зростаючої вартості електричної енергії з урахуванням існуючих технологій, традицій, організаційно-правових обмежень та техніко-економічних можливостей.

Викладення матеріалу та результати. При загальній характеристиці процесу експлуатації АД в Україні слід відзначити важливий економічний аспект, пов'язаний з високою вартістю електричної енергії, яка до того ж має постійну тенденцію до зростання. В останні 20-30 років у світовому електромашинобудуванні саме фактор вартості електричної енергії став вирішальним при виробництві та експлуатації АД. Так, річна вартість електроенергії при експлуатації загальнопромислового двигуна AIP90L2 (3,0 кВт, 3000 об/хв, $\eta_n = 0,83$) за умови його роботи в номінальному режимі протягом 8 500 годин становить 122 892 грн (за вартості електроенергії 4 грн/кВт·год) при вартості самого двигуна від 2 100 до 6 584 грн. При експлуатації аналогічного двигуна з класом енергоефективності IE3 ($\eta_n = 0,871$) річна економія електроенергії становитиме 5 654 грн. Для більш потужного двигуна AIP355L2 (315 кВт, 3000 об/хв, $\eta_n = 0,954$) при вартості двигуна 445 920 грн річна вартість електроенергії становить приблизно 11,2 млн грн. Експлуатація ж аналогічного двигуна класу IE3 ($\eta_n = 0,96$) забезпечує економію приблизно 70 000 грн. Таким чином, річна вартість споживаної електроенергії в 25-30 разів перевищує вартість самого двигуна, причому цей показник практично не залежить від потужності АД. У той же час термін окупності двигунів малої і середньої потужності суттєво менший, ніж аналогічний показник для потужних двигунів.

Таке співвідношення загальних витрат до сумарної вартості нового двигуна з витратами на його ремонті й обслуговування стало, на відміну від України, ключовим фактором зміни основної концепції в системі розробки та використання АД в розвинених країнах. Якщо за домінуючою в Україні концепцією основною вимогою при модернізації електродвигунів є мінімізація розрахункових витрат, то в США, ЄС та ін. в основі підходу – енергоефективний асинхронний двигун, в якому основний акцент зроблено на підвищення ККД, коефіцієнта потужності та надійності.

Домінуюча роль ККД електродвигунів активно реалізується в розвинених країнах вже протягом останніх двох-трьох десятиліть. Так, в США ще в 1997 році прийнято Акт енергетичної політики щодо енергоефективних двигунів (ЕЕД). У 2007–2008 рр. в ЄС введений стандарт IEC 60034-30, який передбачав три стандарти енергоефективності – IE1, IE2, IE3. У 2009 році на основі цього стандарту розроблений стандарт IEC 60034-30:2009 з наступною класифікацією ККД: IE1 – «стандартний»; IE2 – «підвищений»; IE3 – «преміум»; IE4 – «супер-преміум» класи ККД. Показники ККД за цими стандартами постійно зростають. Наприклад, енергоефективний АД (ЕЕАД) потужністю 375 кВт класу енергоефективності IE2 має ККД 95 %, а IE3 – 96 % [12].

На сьогодні вже анонсовано рекордний рівень енергоефективності IE5, досягнутий данською фірмою Grundfos, синхронні електродвигуни якої MGE Grundfos потужністю від 0,75 до 11 кВт впроваджуються з 2017 року. Анонсовано зменшення енергоспоживання на 15% [13].

Активній динаміці енергозбереження сприяє енергетична політика країн ЄС з жорсткими вимогами щодо впровадження ЕЕАД. Так, з червня 2011 року заборонені до реалізації на території країн ЄС двигуни, що не відповідають вимогам класу енергоефективності IE2 по стандарту IEC 60034-30. А двигуни потужністю 0,75 – 375 кВт, що не відповідають класу ефективності IE3 або класу ефективності IE2 за умови їх оснащення засобами регулювання швидкості, заборонені до реалізації з 2017 року.

На перший погляд у цій економічній політиці показники вартості повністю відсутні, але саме сукупність високих енергетичних показників АД та їх надійності гарантують високу енергоефективність і, що надзвичайно важливо в умовах ринкових відносин, конкурентоспроможність. Урахування цього факту повинно стати визначальним при формуванні та реалізації політики енергозбереження в електромашинобудуванні України.

У цьому контексті позитивною подією в галузі вітчизняної електроенергетики став затверджений постановою КМУ від 27.02.2019, № 157 (набув чинності з 15.09.2019) «Технічний регламент щодо вимог до екодизайну для електродвигунів» (далі Регламент). Згідно з Регламентом через два роки з дня його чинності «... всі електродвигуни з номінальною потужністю від 0,75 кВт до 375 кВт, за деякими виключеннями, повинні мати номінальний коефіцієнт корисної дії не нижче рівня IE3 або відповідати рівню IE2 електродвигунів, оснащених регулятором швидкості». Регламентується також, що для «забезпечення відповідності вимогам до екодизайну для електродвигунів *вимірювання і розрахунки проводяться із застосуванням методик, які встановлені в національних стандартах...*».

Для ілюстрації «відстані», яку необхідно подолати вітчизняним виробникам та постачальникам АД для приведення їх у відповідність з вимогами Регламенту, в табл. 1 наведені значення ККД поширених двигунів серії AIP та відповідних альтернативних двигунів класів енергоефективності IE2 та IE3. Параметри наведені для режиму роботи S1.

Таблиця 1

Вибіркові дані щодо ККД АД класів енергоефективності IE2, IE3 та АД серії AIP

IE2/IE3/AIP				IE2/IE3/AIP			
P _н , кВт	n, об/хв			P _н , кВт	n, об/хв		
	3000	1500	1000		3000	1500	1000
0,75	77,4/80,7/75,0	79,6/82,5/73,0	75,9/78,9/69,0	90	94,1/95,0/93,9	94,1/95,0/93,9	94,0/94,9/93,8
1,5	81,3/84,2/78,5	82,8/85,3/78,5	79,8/82,5/76,0	110	94,3/95,2/94,0	94,5/95,4/94,0	94,3/95,1/94,0
3,0	84,6/87,1/82,6	85,5/87,7/82,6	83,3/85,6/81,0	132	94,6/95,4/94,5	94,7/95,6/94,8	94,6/95,4/94,2
5,5	87,0/89,2/85,7	87,7/89,6/85,7	86,0/88,0/84,0	160	94,8/95,6/94,6	94,9/95,8/94,9	94,8/95,6/94,5
11	89,4/91,2/88,4	89,8/91,4/88,4	88,7/90,3/87,5	200	95,0/95,8/94,8	95,1/96,0/94,9	95,0/95,8/94,5
22	91,3/92,7/90,5	91,6/93,0/90,5	90,9/92,2/90,0	250	95,0/95,8/95,2	95,1/96,0/95,2	95,0/95,8/94,5
45	92,9/94,0/92,5	93,1/94,2/92,5	92,7/93,7/92,5	315	95,0/95,8/95,4	95,1/96,0/95,2	95,0/95,8/–
75	93,8/94,7/93,6	94,0/95,0/93,6	93,7/94,6/93,5	375	95,0/95,8/–	95,1/96,0/–	95,0/95,8/–

Хоч і з запізненням на 10-15 років, введення в дію Регламенту повинно позитивно вплинути на формування енергетичної політики України щодо виробництва та присутності на ринку АД з підвищеною енергоефективністю. Але в часових рамках, встановлених Регламентом для виходу на енергоефективні показники ККД, повне його виконання було проблематичним навіть в довоєнні роки. І хоча умови воєнного стану значно ускладнили виконання цієї програм, тим не менше стає все більш зрозуміло, що чим скоріше проблема підвищення енергоефективності АД стане однією з пріоритетних енергетичних проблем України, тим краще. Одним із позитивних кроків у даному напрямку є перехід до класу ефективності IE3 ТОВ «Еквівес» в Україні [12].

Як часткове вирішення проблеми деякі фірми надають послуги з модернізації наявних в експлуатації електродвигунів для підвищення рівня їх енергоефективності. Спектр пропозицій достатньо широкий, зокрема, забезпечення максимального ККД при заданому завантаженні, підвищення ККД в режимі часткових навантажень, заходи щодо узгодження параметрів АД і виконавчого механізму. Певний енергоощадний ефект при модернізації АД досягається шляхом збільшення довжини сердечника статора, числа витків у фазі обмотки статора і діаметра дроту при збереженні заводської геометрії пазів. Досвід ряду країн, у т.ч. України, показав, що проблеми енергоресурсозбереження в АД значною мірою вирішуються шляхом використання мідної короткозамкнутої обмотки ротора замість литої алюмінієвої. Зокрема, в [14] підтверджено збільшення потужності в 1,3–1,7 раза, ККД – на 1,5–3,0 %, перевантажувальної здатності – в 1,4–1,7 раза і показників надійності – в 1,5–2,5 раза без зміни установочно-приєднувальних розмірів.

Стримуючим фактором підвищення енергоефективності АД є відсутність адаптованої до сучасних умов політики формування вторинного ринку. Значна частина парку АД в Україні має вік 10-20 років і більше. Практично всі вони проходили неодноразові (часто недостатньо якісні) ремонти, наслідком яких було погіршення їх енергетичних показників і надійності. Обсяг відремонтованих АД на цьому ринку коливається в межах 6-8 % і його наповнення залежить в основному від двох факторів: якості виконання ремонтних робіт і прийнятої концепції формування вторинного ринку. Експлуатація таких систем вимагає значних фінансових витрат на підтримку їх працездатності, питання ж енергоефективності нерідко є вторинним. На сьогодні існують різні погляди щодо критеріїв визначення доцільних термінів експлуатації АД, крайніми з яких є: відмовив двигун – купи новий (за принципом «скупий платить двічі») і протилежний: відмовив – ремонтуй за будь-яких умов, без жорстких гарантій і вимог до ремонтної організації (поширений в

Україні). Проміжна і, мабуть, найбільш раціональна система впроваджується в США, де з середи 2014 р. розгорнута пілотна програма щодо якісного ремонту АД з гарантованим підвищенням їх енергоефективності протягом всього періоду експлуатації. Програма передбачає за 10 років таку модернізацію АД сумарною потужністю біля 6000 ГВт. Цей ефект буде досягнуто за рахунок підвищення ефективності перемотки обмоток статорів АД (допускається можливість декількох перемоток). Проведено заходи з вибору та сертифікації сервісних центрів, впроваджуються системи фінансового заохочення та гарантування якості ремонтів.

Проблема економічно обґрунтованої політики формування вторинного ринку АД тісно пов'язана з питанням тривалості життєвого циклу двигунів і організації ефективної діагностики його параметрів і робочого стану. Ця проблематика є одним з найбільш активних напрямів дослідження АД (див, зокрема, [3-10]). Але швидке і невпинне зростання вартості електричної енергії вимагає більш конкретного цільового спрямування цих, без сумніву, важливих робіт. По-перше, впровадження систем моніторингу і діагностики не може бути масовим, особливо в умовах працюючих АД. З іншого боку, може бути різною і мотивація впровадження таких систем – ідентифікація параметрів, оперативне реагування на їх погіршення, оцінка ефективності перетворення енергії в електродвигуні, своєчасне виявлення передаварійного стану і т.і. Але тут очевидна присутність своєрідного «конфлікту інтересів» між зменшенням потенційних відмов шляхом запровадження ефективних систем моніторингу та діагностування і формування динамічного (прив'язаного до поточної вартості електричної енергії) прогнозованого на невелику перспективу висновку щодо недоцільності подальшого використання працюючого електродвигуна.

Важливим кроком на шляху підвищення енергоефективності АД є визначення реального завантаження двигунів в умовах експлуатації. Оскільки більшість приводних АД мають завищену номінальну потужність, їх енергетичні показники АД можуть на 5-7 % і більше відрізнятися від номінальних або декларованих. При цьому суттєво збільшується також споживання реактивної енергії, яке навіть при оптимальному навантаженні перевищує 50 % від активної. Негативно відбиваються на споживанні реактивної енергії і неякісні ремонти та ін.

Проблема надійного визначення реального завантаження двигунів ускладнюється тим, що коефіцієнт навантаження k_n є відношенням потужностей P_2 і $P_{2н}$, більш-менш достовірні значення яких в умовах експлуатації, як правило, відсутні. Щодо реальної потужності P_2 на валу двигуна, то регламентовані стандартами методи її вимірювання практично неможливо використати при масовому енергетичному обстеженні. Номінальна ж потужність $P_{2н}$ достовірно відома лише для АД з невеликим ресурсом роботи при забезпеченні нормативних умов експлуатації. Тому завдання визначення номінальної потужності $P_{2н}$ після неодноразових ремонтів є одним з базових питань теорії і практики електричних двигунів, яке на сьогодні не має загальноприйнятого рішення. Така ситуація може привести до хибних висновків. Наприклад, якщо два двигуни працювали з $k_{n1} = 0,45$ і $k_{n2} = 0,75$, а якісні дослідження показали зменшення $P_{2н}$ на 30 % (що цілком можливо), то нові значення коефіцієнтів навантаження $k'_{n1} = 0,45/0,7 = 0,63$ і $k'_{n2} = 0,75/0,7 > 1$. Тобто, оцінка реального завантаження двигунів радикально змінилася: якщо до паспортизації перший двигун підлягав заміні як недовантажений, а другий розглядався як оптимально навантажений, то після уточнення номінальної потужності вже підлягав заміні другий двигун, а перший наблизився до зони оптимального навантаження.

Технічно складна задача надійного визначення потужності на валу двигуна в умовах експлуатації найбільш точно і ефективно вирішується шляхом безпосереднього виміру моменту на валу. В останні десятиліття успіхи інтегральної електроніки забезпечили появу на зовнішніх ринках великого спектру датчиків крутного моменту з високими технічними параметрами та функціональними можливостями. На сьогодні провідні позиції займають тензорезисторні датчики крутного моменту. Великий спектр високоточних датчиків у широкому діапазоні зміни крутного моменту пропонують фірми Lorenz Messtechnik GmbH, HBM (ФРН), Magtrol (США), Datum Electronics (Великобританія) та ін. [15]. Але, на жаль, висока вартість цих пристроїв є суттєвою перешкодою на шляху їх широкого впровадження.

Одним із новітніх і перспективних напрямків вимірювання крутного моменту є використання поверхневих акустичних хвиль (ПАХ). Цей науковий напрямок значно активізувався останнім часом в автомобілебудуванні. У виробництво і використання цих пристроїв включилися такі потужні корпорації як Honeywell, Michelin, Texas Instruments, Sensor Technology [16] та ін.

В останні роки активізувалися також пропозиції щодо оптичних та індуктивних інкодерів, які можуть стати альтернативою розглянутим вище датчикам. Зокрема, великий спектр індуктивних інкодерів Zettlex пропонує американська фірма Celera Motion [17].

Висновки та напрямки подальших досліджень. Недостатньо високі енергетичні показники короткозамкнених асинхронних двигунів обумовлюють великий і практично не реалізований потенціал енергозбереження в Україні.

Основними бар'єрами на шляху підвищення енергоефективності парку АД є відсутність жорсткої державної політики щодо використання енергоефективних двигунів, недостатнє використання модернізації як часткового вирішення проблеми шляхом якісних ремонтів з гарантованим рівнем енергоефективності, відсутність адаптованої до сучасних умов політики формування вторинного ринку та пов'язаних з цим методів визначення життєвого циклу, неможливість організації постійного моніторингу реального навантаження двигунів в умовах експлуатації, недосконалість нормативно-правового забезпечення та ін.

Невпинне зростання вартості електричної енергії гостро ставить питання зміни традиційних підходів до проблеми проектування та експлуатації АД, зокрема в частині надійного техніко-економічного обґрунтування доцільності їх використання в конкретних умовах експлуатації на основі базового критерія – максимуму ефективності перетворення енергії (ККД).

Напрямки подальших досліджень повинні бути спрямовані на усунення або пом'якшення зазначених вище бар'єрів на шляху підвищення енергоефективності парку АД. Адже відсутність чітких і однозначних рішень з комплексу зазначених питань створює умови, при яких і без того недостатньо високі у порівнянні з кращими закордонними аналогами енергетичні показники АД в дійсності можуть бути значно нижчими від декларованих і, як правило, невідомими.

Список літератури

1. Толмачов С. Т. Система безконтактного виміру моменту на валу електродвигунів в умовах експлуатації / С. Т. Толмачов, І. М. Бурчак // Вісн. Кривор. нац. універ. Зб. наук. праць. – 2017. – Вип. 44. – С. 131–137.
2. Калинов А. П. Метод косвенного определения мощности на валу асинхронного двигателя / А. П. Калинов, В. А. Огарь, В. В. Лотоус // Вісник НТУ «ХПІ», 2017. 27(1249). С. 401–405.
3. Закладний О. М. Універсальний діагностувальний комплекс для прискорених випробувань електродвигунів / О. М. Закладний, О. О. Закладний // Інформаційний збірник «Промислова електроенергетика та електротехніка» Промелектро. – 2007. – №4. – С. 35–39.
4. Кучерук В. Ю. Елементи теорії побудови систем технічного діагностування електромоторів. Монографія / В. Ю. Кучерук // – Вінниця: Універсум-Вінниця, 2003. – 195 с.
5. Чорний О. П., Курбанова І. Г. Комп'ютеризовані комплекси для діагностики машин // ЕЛЕКТРОінформ. – 2004. – №1. – С. 19–22.
6. Калинов А. П. Системи діагностики, моніторингу та керування ресурсом роботи електромеханічних комплексів на основі показників якості перетворення енергії. Підсумки роботи і перспективи розвитку наукового напрямку / А. П. Калинов // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Науково-виробн. журнал. – 2009. – №3. – С. 22 – 30.
7. Закладний О. О. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем: Монографія / О. О. Закладний // – К.: Видавництво «Лібра». – 2013. – 195 с.
8. Праховник А. В. Функціональне діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами / А. В. Праховник, О. М. Закладний, О. О. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 1. С. 66–72.
9. Закладний О. О. Програмне забезпечення функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем з асинхронними двигунами / О. О. Закладний, О. М. Закладний // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2011. – № 2. С. 102–108.
10. Закладний О. М. Технічні засоби функціонального діагностування енергоефективності електромеханічних систем / О. М. Закладний, О. О. Закладний, В. М. Пермяков // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2012. – № 1. С. 47–54.
11. Лут М. Т. Зниження втрат енергії в асинхронних електроприводах / М. Т. Лут, О. Ю. Синявський / Енергетика і автоматика // – 2013. – № 3. С. 144–149.
12. Енергоефективні електродвигуни IE3, IE4. https://ledermann.com.ua/?utm_source=google&utm
13. Электродвигатели Grundfos стандарта IE5. <https://planetaklimata.com.ua/news/?sect=25&msg...0>
14. Чувашев В.А. Энергоэффективные асинхронные двигатели / В.А. Чувашев, Ю.Н. Папазов, А.А. Велков // Вісник СевДТУ. Вип. 88: Механіка, енергетика, екологія: зб. наук. пр. – Севастополь: Вид-во СевНТУ. – 2008. – С. 92 – 96.
15. MCS10 Multi-Axis Sensor: Measures 6 Forces and Moments with Ac-curacy Class 0.1 Guaranteed for Each Channel. – Режим доступу: <https://www.hbm.com/en/5626/multi-axis-sensor-mcs10/>
16. Kalinin V., Beckley J. Wireless Interrogation of SAW Strain Sensors for Automotive Applications Using TMS320C28x Controller. – TI Developer Conference, Dallas, 2006. – Режим доступу: <http://www.transense.co.uk/downloads/articles/TIDC.pdf>

УДК 550.834

А. О. РОМАНЕНКО, канд. техн. наук, маркшейдер кар'єру,
ПРАТ «Центральний гірничо-збагачувальний комбінат»
В.Д. СИДОРЕНКО, д-р техн. наук, проф.,
Криворізький національний університет

ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИЗНАЧЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПО СЕЙСМІЧНИХ СИГНАЛАХ ТА ВИЯВЛЕННЯ МІКРОРУЙНУВАНЬ МАСИВУ ГЛЕЮВАТСЬКОГО КАР'ЄРУ

Метою досліджень є визначення оптимальних частотних діапазонів та чутливості сейсмотатчиків, що необхідні для виконання замірів фізичних параметрів стану гірського масиву та провести дослідження, спрямовані на виділення мікросейсмічних подій в межах досліджуваної ділянки. У статті розглядаються напрямки напрацювань відомих українських вчених в галузі сейсмічного контролю стану масиву та звукометричних методів для визначення фізико-механічних властивостей гірських порід, що займалися питаннями мікросейсмічного та розглядається можливість визначення щільності та пружності гірських порід за допомогою аналізу мікросейсмічних сигналів.

Методи використовувались при виконанні досліджень наступні: для збору і аналізу звукової інформації та вивчення стану та характеристик гірничого масиву використано методи акустичної емісії, що полягає в зборі звукових сигналів, які виникають в результаті деформації гірничого масиву; сейсмічні методи, які використовують збір звукових сигналів, що виникають в результаті сейсмічних подій, таких як землетруси, для вивчення структури та характеристик гірничого масиву; метод зондування (розміщення зонду в межах ділянки дослідження), для збору звукових сигналів, які виникають у гірничому масиві, що дозволяє вивчати структуру та характеристики гірничого масиву.

Наукова новизна статті полягає у виборі оптимальних технічних параметрів для сейсмотатчиків та визначенні частотних діапазонів для проведення досліджень в Глеюватському кар'єрі. Розробка алгоритму ідентифікації явищ та параметрів вибіркового технологічних процесів дає можливість оцінювати напружено-деформований стан гірського масиву.

Практичне значення отриманих результатів полягає в отриманні оптимальних параметрів технічного обладнання для мікросейсмічного контролю гірських порід в кар'єрах, що дозволяє підвищити ефективність виробництва та зменшити ризик аварій через оцінку напружено-деформованого стану гірського масиву.

Результати по статті включає: визначені оптимальні параметри сейсмотатчиків та частотний діапазон для досліджень сейсмічних подій в Глеюватському кар'єрі, а також плани щодо детальної класифікації явищ та розроблення алгоритму їх ідентифікації.

Ключові слова: звукометрія, кар'єр, сейсміка, явища, мікросейсми, сейсмореєстратор, гірські породи.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-139-143

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Вивчення фізико-механічних властивостей гірських порід та їх змін у процесі експлуатації кар'єрів та рудників є важливим завданням в гірничій промисловості. Один із способів вивчення цих властивостей полягає у використанні сейсмічних методів, які дозволяють отримувати інформацію про структуру та механічні властивості гірських порід шляхом аналізу сейсмічних сигналів.

У даній статті розглядається проведення досліджень з визначення фізико-механічних властивостей гірських порід на прикладі масиву Глеюватського кар'єру. В результаті досліджень були зібрані та оброблені дані про сейсмічні сигнали, отримані за допомогою спеціальних пристроїв, які були встановлені на поверхні та внутрішній частині масиву.

Аналіз досліджень і публікацій. Звукометричні та сейсмічні дослідження гірських масивів є актуальною та складною проблемою для науковців у багатьох галузях, включаючи геологію, геофізику та геотехніку. За останні десятиліття значні зусилля були спрямовані на розробку нових методів вимірювання та аналізу даних з цих досліджень. Серед найвизначніших науковців, що займалися цими питаннями, можна згадати імена таких дослідників, як Джон А. Хадден, Міккель Х. Фабер, Жан-Жак Рінджер, Ян М. Мюллер та багатьох інших. Їх внесок у розвиток знань про гірські масиви та їхні властивості неоціненний, а їхні досягнення та методи дослідження досі є актуальними для сучасних наукових досліджень.

Серед сучасних дослідників додатково хочу відзначити українських вчених, що займалися розв'язанням задач, пов'язаних з сейсмічними та звукометричними дослідженнями: Хмелевський Г.О. професор з інституту гірничого та нафтогазового машинобудування Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Займався дослідженнями використання звукометричних методів для визначення фізико-механічних властивостей гірських порід та виявлення мікроруйнувань [1,2]. Ільченко А.О. провідний науковий співробітник з Інституту геофізики ім. С.І. Субботіна Національної академії наук України. Досліджує використання сейсмічних методів для вивчення структури та динаміки гірських масивів [3,4].

Постановка задачі – визначити оптимальні частотні діапазони та чутливість сейсмоматчиків, що необхідні для виконання замірів фізичних параметрів стану гірського масиву та провести дослідження, спрямовані на виділення мікросейсмічних подій в межах досліджуваної ділянки.

Викладення матеріалу та результати досліджень. Такі параметри мікросейсмічних сигналів, як швидкість розповсюдження хвиль, частота сигналу мікросейсми і частота сигналу явища формуються фізико – механічними якостями породи, а саме модулем пружності та щільністю породи ((закон Бйорча, криві Нейфа – Дрейка). Звідси, по результатах неруйнівного, чи дистанційного контролю можливо вирішувати як пряму, так і зворотну задачі поточного визначення пружності і щільності породи [5-7]. Більш того, наприклад, наявність двох частот в сигналі мікросейсми вказує, що вимірювальний зонд розташований біля границі рудного тіла і масиву вміщуючих порід. Наявність одної частоти по координаті X і двох частот по координаті Y вказує, що границя розділу двох середовищ (наприклад рудного тіла і вміщуючої породи) знаходиться по координаті Y. Частота сигналу мікросейсми залежить від рівня і напрямку напруги. Частіше більша частота по координаті Z (рис. 1), вказує на більшу напругу в вертикальному напрямку – тиск налягаючих порід.

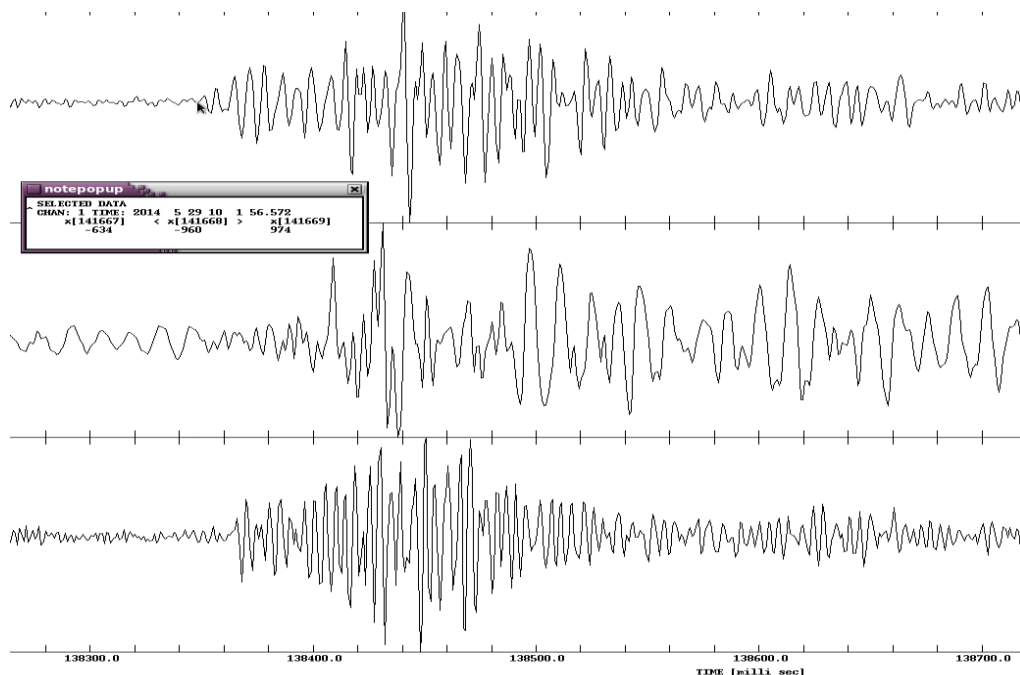


Рис. 1. Приклад сигналу мікросейсми з більшою частотою по координаті Z, що вказує на більшу напругу в вертикальному напрямку

По співвідношеннях щільностей і пружностей, зазвичай вища частота відповідає коливанням в скельному масиві вміщуючих порід, а нижча коливанням в рудному тілі. На жаль, навіть в найбільш докладних довідниках [8] для кожного родовища і покладу вказана щільність і міцність порід і в більшій частині відсутні дані про пружність, що зумовлює труднощі в використанні результатів дистанційного контролю. Кореляція між модулем пружності і міцністю по М.М. Протод'яконову доволі низька. Відповідно низька кореляція і між частотою мікросейсми і міцністю. А в інженерних розрахунках здебільшого використовується міцність по М.М. Протод'яконову. Це зумовлює деякі труднощі у використанні результатів вимірювання фізико-механічних властивостей гірських порід по сигналу мікросейсми.

Тим не менш в [9] обґрунтована теоретична залежність, яка зв'язує напруження скельного масиву з амплітудою резонансу спектральної щільності частоти коливань масиву, резонансною частотою, чистотою (достовірністю) отриманого сигналу, швидкістю осциляції скельного масиву і щільністю масиву, а в [10-12] обґрунтована теоретична залежність модулю пружності і щільності породи масиву від показників спектральної щільності сигналу мікросейсми. Залежності отримані як для модулю вектору, так і окремо по трьох координатах.

Як видно з розділу, тільки по сигналу мікросейсми можливо визначати щільність і пружність середовища, рівень і напрямок напруження, наявність і напрямок границі розділу двох середовищ. І цю інформацію можливо одержувати з сейсмореєстраторів додатково до основної інформації про мікросейсмічну активність. Без залучення додаткового апаратного ресурсу. На основі програмної обробки сигналу вимірювального каналу наявного сейсмореєстратора. В разі потреби таких даних, додатково потрібні тільки алгоритми і програмне забезпечення відповідної обробки.

На сейсмограмах чутливих датчиків завжди є слабкі сигнали, що складаються з випадкового сейсмічного шуму і квазістаціонарних коливань. Природні мікросейсмічні шуми присутні як на поверхні Землі, так і на нижніх горизонтах шахт, що з'являються на сейсмічних записях у вигляді постійно спостережуваних коливань.

Інтенсивність сейсмічного шуму може сильно змінюватися, а може бути і не помітна на сейсмограмах через маскування більш потужними техногенними шумами. При дослідженні геомеханічних явищ в межах кар'єрного поля, випадкова складова більше обумовлена шумом, проведенням технологічних процесів та роботою механізмів і транспорту.

Вплив техногенних шумів можливо зменшити розташуванням вимірювальних зондів і самих станцій. Нерегулярні сейсмічні події, такі як віддалене руйнування гірських порід, представлені на записях досить контрастними сплесками. Для контролю руйнування гірських порід і призначені сейсмічні станції - це корисні інформативні сигнали. Третім компонентом є квазістаціонарні коливання, присутні скрізь і завжди. Ці постійно присутні коливання називаються мікросейсмами Землі або коротко мікросейсмами.

Для проведення досліджень спеціалізованим обладнанням, чутливі сейсмодатчики були вибрані, основується на чотирьох найбільш важливих критеріях: вимірюваній фізичній величині, частотним діапазоном, чутливістю і розмірами.

Вимірювана фізична величина. Інтенсивність сейсмічних коливань може вимірюватись величиною зрушення, м; швидкості, м/с; прискорення, м/с². В зв'язку зі складністю практичної реалізації, вимірювання зрушень в реальних промислових умовах, цей метод не використовується. Вимірювання як швидкості, м/с; так і прискорення, м/с² сейсмічних коливань мають свої позитивні сторони і недоліки.

Зважаючи на реальні умови проведення досліджень, вимірювання в спостережних свердловинах, з опусканням зонду на глибину до 200м, вимагає використання датчиків і зондів в цілому, які не потребують точної орієнтації в просторі. Такими датчиками є п'єзоелектричні акселерометри, що вимірюють прискорення сейсмічних коливань.

Таким чином, за основний спосіб прийнято вимірювання прискорення сейсмічних коливань із спостережних свердловин.

На випадок необхідності вимірювань в місцях, де відсутні спостережні свердловини рекомендується вимірювати швидкість сейсмічних коливань з поверхні.

Чутливість сейсмодатчиків. При сучасних апаратних можливостях достатня чутливість вимірювального каналу обмежена амплітудою мікросейсми. При промисловому моніторингу гірських порід шахт і кар'єрів немає сенсу в вимірюванні сигналів менше амплітуди мікросейсми. У той же час, з позиції доцільної дискретизації, амплітуда мікросейсми повинна бути зафіксована у 100-500 одиниць АЦП (аналого-цифровий перетворювач). Отже, чутливість вимірювального каналу може бути представлена в розмірності (м/с)/од. АЦП чи в (м/с²)/од. АЦП. При ручній "візуальній" обробці записів значущими доцільно приймати тільки сигнали в 3 рази вище, ніж мікросейсми, і при автоматичній обробці принаймні в 10 разів. Тому бажано враховувати не чутливість приладу, а зону (радіус) моніторингу явищ певної сили. Ця зона, на додаток до вище названих коефіцієнтів 3 або 10, визначається рівнем мікросейсми (або іншого порушення відповідної частоти) в точці вимірювання; згасанням коливань, що є власністю масиву і енергією явища. Наприклад, для явищ з ємністю 4 Дж. зона моніторингу становить 100 м, для 40 Дж 400м, а для Масових вибухів в кар'єрі 40 км.

Частотний діапазон. Діапазон частот явищ, що входять до складу інформаційних для спеціалізованих геоінформаційних систем моніторингу напруженого стану масиву гірських порід складається з наступних складових: частота сигналів далеких мікросейсми далеких землетрусів 0,3-1Гц. Частота сигналів, близьких до мікросейсми в шахті становить 25-40Hz. Приклади техногенного шуму частота 8Hz (перфоратор); частота 25Hz (двигун 1500об/хв);-50 Гц (двигун 3000об/хв). Частота сигналів масових вибухів у кар'єрах на відстані 30 км і більше проявляється на частотах близько 16Гц, а на відстані 5-10 км на частотах близько 25Гц. Сигнали тріщиноутворення (найбільш корисна інформація) і очисні вибухи 2-8кг ВВ на відстані 100-400м проявляються на частотах 120-60Гц, іноді бувають сплески спектральної щільності на частотах 180, 250, 300 і менше 350 Гц. Утворення мікротріщин на відстані 20-40 м проявляється на частотах 600-750 Гц. Коливання 0,3-1Hz і 600-700Гц бажано вміти реєструвати, але це не є основною метою геоінформаційної системи.

По результатах досліджень безпосередньо в Глеюватському кар'єрі мікросейсми присутні на частотах від 25 до 66Гц, при середній частоті 38Гц. Явища при вимірюванні на поверхні присутні на частотах від 50 до 360Гц, при середній частоті 102Гц. Явища при вимірюванні в свердловині присутні на частотах від 26 до 33Гц, при середній частоті 31Гц. Відмічається значна різниця частот по різних напрямках вимірювань (в свердловині і шахті в вертикальному напрямі частота вища ніж в горизонтальному за рахунок напружень стискання. В кар'єрі можливо частоти відрізняються вздовж борту і в перпендикулярному напрямку.

Таким чином, для умов Глеюватського кар'єру, з позиції наявних інформативних частот коливань, доцільно мати частотний діапазон вимірювальних каналів 26-360Гц. З позиції використання всього діапазону частот наявних датчиків доцільно мати частотний діапазон вимірювальних каналів 0,5-1000Гц з можливістю фільтрування верхніх чи нижніх частот.

Аналогові передпідсилювачі зазвичай мають значно ширші частотні діапазони. Більша проблема з АЦП, частотою опитування датчиків і відповідно з об'ємами пересилаємої і реєструємої інформації.

В технічній літературі і в аналогах частота опитування (часова дискретизація) датчиків приймається 100-1000 в секунду. Зважаючи на те, що сигнал явища є умовно періодичним через девіацію частоти і через фазові коливання, відрізняється від синусоїдального на коротких відстанях до явища за рахунок накладення на сигнал поздовжніх хвиль, складових заломлення, відбитих і поперечних хвиль, а також такий, що має обмежену тривалість (кількість коливань) часу, він не підкоряється теоремі Котельникова.

Точність відтворення форми напів-періоду несинусоїдального сигналу визначається частотою опитування зондів. Залежно від ступеня спотворення сигналу явища (відмінності від синусоїдальної форми) і повинна обиратися частота опитувань. Досвід обробки сигналів явищ показує, що для мікросейсмічного контролю частота опитування повинна перевищувати в 20 разів основної частоти сигналу і в 10 разів верхню складову сигналу явища. Наприклад, для спектральної щільності сигналу, для головної частоти 60 Гц і верхньої складової 110 Гц необхідна частота 2200 опитувань/с.

Висновки та напрямки подальших досліджень. За результатами досліджень сейсмічних подій в межах Глеюватського кар'єру вибрані оптимальні технічні параметри для сейсмотатчиків та визначені частотні діапазони, які необхідно використовувати при проведенні досліджень.

З досліджень в Глеюватському кар'єрі встановлено, що мікросейсмічні явища спостерігаються на частотах від 25 до 66 Гц, при середній частоті 38 Гц, на поверхні - на частотах від 50 до 360 Гц, при середній частоті 102 Гц, в свердловині - на частотах від 26 до 33 Гц, при середній частоті 31 Гц. Різниця частот по різних напрямках вимірювань значна через напруження стискання, тому доцільно мати частотний діапазон вимірювальних каналів 26-360 Гц для умов Глеюватського кар'єру. Точність відтворення форми напів-періоду несинусоїдального сигналу визначається частотою опитування зондів, тому повинна обиратися частота опитувань, залежно від ступеня викривлення сигналу. Для мікросейсмічного контролю частота опитування повинна перевищувати 1000 Гц, а частотний діапазон вимірювальних каналів може бути 0,5-1000 Гц з можливістю фільтрування верхніх чи нижніх частот. Аналогові передпідсилювачі мають значно ширші частотні діапазони, але більша проблема з АЦП полягає в частоті опитування датчиків і об'ємах пересилаємої і реєструємої інформації.

В подальшому планується виконати детальну класифікацію явищ з фіксацією їх параметрів. За результатами даної класифікації буде розроблен алгоритм ідентифікації явищ та параметри вибірки явищ, які виникають в процесі розробки, тобто відбраковка технологічних процесів від

процесів, які відбуваються безпосередньо у масиві гірських порід. Це дасть можливість оцінювати напружено-деформований стан гірського масиву в межах досліджуваної ділянки.

Список літератури

1. Khmelevsky, H., Kornev, A., & Kyshakevych, I. (2016). Acoustic method for determining the strength characteristics of rock masses. *Journal of Mining Science*, 52(6), 1134-1141.
2. Khmelevsky, H., & Kornev, A. (2015). The acoustic emission method for studying the dynamic properties of rocks. *Journal of Mining Science*, 51(6), 1186-1192.
3. Ільченко, А. О., & Гаркуша, В. В. (2019). Аналіз мікросейсмічних даних для оцінки напруженого стану гірських порід під час видобутку корисних копалин. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія: Фізика*, (35), 96-102.
4. Ільченко, А. О., & Ткаченко, О. Є. (2021). Дослідження сейсмічних сигналів при вибухах на рудниках. *Наукові праці Інституту геофізики*, 3(58), 75-82.
5. Серебряников В.М., Рыбалко Б.И., Русаков М.И. Математическое моделирование сейсмических волн. Збірник наукових праць за результатами роботи V Міжнародної наукової конференції (Кривий Ріг, 23 - 24 листопада 2018р.). НДГРІ ДВНЗ «КНУ». Кривий Ріг: Вид. Р.А. Козлов, 2018. 180с.
6. Стор. 107 - 109.
7. Попов С.О. Визначення напруженого стану гірських порід на основі явища релаксацій коливань масиву./ С.О. Попов Збірник наукових праць за результатами роботи Міжнародної наукової конференції (Кривий Ріг, 22-23 квітня 2011р.) ДП НДГРІ. Кривий Ріг, «Видавничий дім», 2011.
8. Тарапата В.Я. Определение прочностных характеристик массива горных пород и его трещиноватости сейсмическим методом./ В.Я. Тарапата, Ф.И. Караманиц, В.С. Ричко, Ю.А. Плужник.— Сборник научных трудов. Качество минерального сырья 2011. Академия горных наук Украины, Криворожский технический университет. Кривой Рог, 2011, 266-270с.
9. Доценко В.Д., Воробьев А.Н., Радчук А.Г. Справочник по физико – механическим свойствам железистых кварцитов, продуктов их переработки и других мелкозернистых материалов. Дионис. Кривой Рог. 2013. 276с.
10. Рыбалко Б.И., Серебряников В.М. Определение физико – механических свойств массива горной породы по сигналу микросейсм. Збірник наукових праць за результатами роботи VI Міжнародної науково-технічної конференції (Кривий Ріг, 22 листопада 2019р.) Кривий Ріг. Видавець Роман Козлов. 2019. 198с. Стор. 115 – 120.
11. Рыбалко Б.И., Серебряников В.М. Оценка напряженного состояния массива по характеристике спектральной плотности микросейсм. Збірник наукових праць за результатами роботи VI Міжнародної науково-технічної конференції (Кривий Ріг, 22 листопада 2019р.) Кривий Ріг. Видавець Роман Козлов. 2019. 198с. Стор. 126 – 130.
12. Рыбалко Б.И., Серебряников В.М. Определение физико – механических свойств массива горной породы по сигналу микросейсм. Збірник наукових праць за результатами роботи VI Міжнародної науково-технічної конференції (Кривий Ріг, 22 листопада 2019р.) Кривий Ріг. Видавець Роман Козлов. 2019. 198с. Стор. 115 – 120.

УДК 658.5:334.012.6

А.Ю. ШАХНО*, д-р екон. наук, доц.
Криворізький національний університет

СТАН ТА ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ БІЗНЕСУ В УМОВАХ ІННОВАЦІЙНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ

Мета. Метою даної статті є визначення сучасного стану розвитку вітчизняного бізнесу та проблем його розвитку, розробка комплексу заходів щодо забезпечення ефективного розвитку бізнес-структур в умовах інноваційної діяльності й трансформації глобалізаційних процесів.

Методи дослідження. Результати і наукові положення отримані з використанням певних методів: узагальнення результатів попередніх досліджень, комплексного аналізу та синтезу, логіко-структурного й логіко-динамічного аналізу, науково-аналітичного, порівняння й аналогії, табличного тощо.

Наукова новизна. В ході дослідження надано оцінку стану функціонування вітчизняного бізнесу та визначено основні проблеми його розвитку, що дало можливість представити авторське бачення стратегічно-орієнтованої моделі державного управління розвитку бізнесу та запропонувати комплекс заходів щодо ефективного формування сприятливого бізнес-середовища з боку держави, що позитивно вплине на соціально-економічний розвиток країни, де важливим напрямом є розвиток інноваційного підприємництва.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані при формуванні стратегії розвитку інноваційного бізнесу та комплексу інструментів державного регулювання його розвитку. Впровадження запропонованих заходів сприятиме поліпшенню бізнес-клімату в Україні, підвищенню якості людського капіталу та підвищенню конкурентних переваг національної економіки в глобалізованому світі, де прискорюється розвиток цифрових технологій та креативних галузей.

Результати. В науковому дослідженні визначено сучасний стан розвитку бізнесу в Україні. Проаналізовано динаміку кількості суб'єктів господарювання України за період 2010 – 2021рр., визначено обсяги фінансування з державного бюджету інноваційної діяльності підприємств та проаналізовано інноваційну активність суб'єктів

підприємницької діяльності. Представлено рейтинг України серед інших країн світу за показником Doing Business Index та Індексом економічної свободи, проаналізовано динаміку обсягів інвестування в українські стартапи. Визначено основні проблеми формування бізнес-середовища. За результатами наукових досліджень представлено авторське бачення стратегічно-орієнтованої моделі державного управління розвитку бізнесу та запропоновано комплекс заходів щодо формування ефективного бізнес-середовища для створення сприятливих умов ведення бізнесу в умовах інноваційної діяльності.

Ключові слова: бізнес, підприємство, розвиток, управління, інновації, інвестиції, підприємництво, держава.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-143-152

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. В умовах прискорення глобалізаційних процесів, коли відбувається інтеграція економік держав до світової економіки, а динамізм розвитку ринкового середовища прискорює науково-технічні процеси, важливою умовою підвищення конкурентоспроможності національної економіки є розвиток бізнесу із застосуванням сучасних технологій в умовах інноваційної діяльності. Стратегічний вектор розвитку інноваційно-інвестиційної моделі економіки потребує активізувати інвестиційну діяльність в країні. Але в сучасних умовах невизначеності та широкомасштабної війни в Україні вітчизняний бізнес зазнає значних труднощів та перешкод в своєму розвитку.

Розвиток малого та середнього бізнесу є пріоритетними напрямками соціально-економічної політики держави, що сприяє стимулюванню інвестиційної та інноваційної активності суб'єктів підприємницької діяльності, формуванню конкурентного середовища, забезпеченню зайнятості населення та створенню додаткових робочих місць. В результаті діяльності бізнес-структур формується значна частка податкових надходжень до державного та місцевих бюджетів. Актуальності набуває дане питання в умовах розвитку науково-технічного прогресу та застосування сучасних технологій. Адже новою інноваційною моделлю розвитку економіки України є діджитал-економіка. Поєднання цифрових технологій з сучасними методами організації виробництва створює підґрунтя для підвищення ефективності діяльності бізнес-структур, що позитивно впливає на зростання конкурентоспроможності національної економіки в цілому.

Аналіз досліджень і публікацій. Формування нової парадигми розвитку економіки в сучасних умовах передбачає інноваційні шляхи та стратегічні напрями функціонування бізнес-структур, де головним акцентом виступає розвиток людського капіталу як головного чинника підвищення конкурентних переваг. Дослідженню проблем і тенденцій формування сприятливого бізнес-середовища, розвитку підприємницьких структур та визначенню ролі держави в забезпеченні його розвитку присвячено багато праць як зарубіжних, так і вітчизняних науковців, серед яких можна виокремити: О.І. Амошу, Б.М. Андрушківа, Л.М. Васильєву, З.С. Варналія, Т.В. Гринько, О.І. Дацій, О.К. Єлєсєєву, О.В. Захарова, А.П. Кісельова, І.Г. Костирка, А.О. Крисак, В.В. Липчука, М.Й. Маліка, С.В. Мочерного, С.Ф. Покропивного, Г.О. Поліщук, С.О. Полковниченко, В.О. Сизоненка, Л.М. Фокас, О.Г. Череп, Г.О. Швиданенко, О.М. Ястремську та ін. Серед зарубіжних науковців – С.С. Беляєву, І.В. Зікунову, Р. Кантільйона, А. Сміта, Д. Рікардо, Ж.-Б. Сея, А. Маршалла, Д. Шумпетера та ін.

Проте потребує подальшого дослідження перспективні шляхи та стратегічні напрями розвитку бізнесу за умов розбудови інноваційно-інвестиційної моделі економіки.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є визначення сучасного стану розвитку вітчизняного бізнесу та проблем його розвитку, розробка комплексу заходів щодо забезпечення ефективного розвитку бізнес-структур в умовах інноваційної діяльності й трансформації глобалізаційних процесів.

Викладення матеріалу та результати. В епоху нових викликів та змін в глобалізованому світі з'явилась нова парадигма розвитку, в основі якої знання, доступ до інформації, інновації, яка виступає потужним двигуном економічного зростання. Ефективний розвиток інноваційної економіки залежить від створення відповідного бізнес-середовища в країні як головного чинника підвищення конкурентоспроможності національної економіки. Інноваційну економіку можна охарактеризувати як симбіоз бізнес-процесів та діяльності людського капіталу, здатного до творчості, нестандартного мислення, результатом чого є виникнення нових інноваційних продуктів, ексклюзивних товарів і послуг [9].

Бізнес-середовище представляє собою складну багатфункціональну систему, на діяльність якої впливають сукупність зовнішніх і внутрішніх факторів функціонування суб'єктів

господарювання. Розвиток великого, середнього і малого бізнесу створює сприятливі умови для впровадження сучасних технологій в різних сферах діяльності та формує конкурентні переваги серед інших країн світу. Ефективна діяльність підприємницьких структур наповнює державні та місцеві бюджети, створює додаткові робочі місця, насичує ринок конкурентоздатними товарами та послугами. Враховуючи сучасні процеси глобалізації та діджиталізації, підтримка розвитку бізнес-структур повинна здійснюватись з боку державних структур, які забезпечують формування відповідного інституціонального середовища [8].

За даними Державної служби статистики України проаналізуємо зміни в кількості суб'єктів господарювання за період 2010 – 2021 рр. (табл. 1).

Таблиця 1

Динаміка кількості суб'єктів господарювання в Україні за період 2010 – 2021 рр.

Роки	Кількість суб'єктів господарювання, одиниць							
	Усього	Тема приросту, %	У тому числі					фізичні особи-підприємці
			підприємства					
			усього	великі	середні	малі	з них мікро-підприємства	усього
2010	2183928	х	378810	586	20983	357241	300445	1805118
2011	1701620	-22,1	375695	659	20753	354283	295815	1325925
2012	1600127	-6,0	364935	698	20189	344048	286461	1235192
2013	1722070	7,6	393327	659	18859	373809	318477	1328743
2014	1932161	12,2	341001	497	15906	324598	278922	1591160
2015	1974318	2,2	343440	423	15203	327814	284241	1630878
2016	1865530	-5,5	306369	383	14832	291154	247695	1559161
2017	1805059	-3,2	338256	399	14937	322920	278102	1466803
2018	1839593	1,9	355877	446	16057	339374	292772	1483716
2019	1941625	5,5	380597	518	17751	362328	313380	1561028
2020	1973577	1,6	373822	512	17602	355708	307871	1599755
2021	1956248	-0,9	370834	610	17502	352722	304650	1585414
2021/2010 +/-	-227680	х	-7976	24	-3481	-4519	4205	-219704
2021/2010 %	-10,4	х	-2,1	4,1	-16,6	-1,3	1,4	-12,2

Джерело: Державна служба статистики України [1]

Як свідчать дані табл. 1, за період 2010 – 2021 рр. в Україні відбулося зменшення кількості суб'єктів господарювання на 227680 од., що становить 10,4%. Протягом аналізованого періоду спостерігаються тенденції до спаду активності бізнес-структур (в 2012р., 2017р. та 2021р.), на що вплинули всесвітня фінансово-економічна криза, політичні події в країні, пандемія тощо. Активізація підприємницької діяльності спостерігається в 2015р. та 2020р., де відбулось збільшення кількості підприємницьких структур, що є позитивною тенденцією (рис. 1).



Рис. 1. Порівняльна характеристика загальної кількості суб'єктів підприємницької діяльності і зареєстрованих фізичних осіб-підприємців за період 2010-2021рр.

Джерело: Державна служба статистики України [1].

Розвиток інноваційного бізнесу базується на застосуванні сучасних інновацій та економіки знань. Важливим напрямом є державна підтримка бізнесу. На рис. 2 представлено фінансування з державного бюджету інноваційної діяльності підприємств та організацій України.



Рис. 2. Фінансова підтримка діяльності підприємств та організацій з державного бюджету
Джерело: Державна служба статистики України [1]

Проаналізуємо інноваційну активність вітчизняних підприємств (рис. 3).



Рис. 3. Інноваційна активність вітчизняних підприємств (питома вага в загальній кількості промислових підприємств)
Джерело: Державна служба статистики України [1]

Як свідчать дані рис. 3, в цілому за період 2000-2020рр. інноваційна активність підприємств зменшилась з 18% до 16,8%, що є негативною тенденцією. Максимальний показник був досягнутий в 2016 р. (18,9%). В даному році витрати на інновації промислових підприємств досягли 23229,5 млн грн (рис. 4). Але на кінець аналізованого періоду відбулося зменшення інноваційної активності підприємств. В 2020 р. витрати на інновації становили 14406,9 млн грн, що менше в порівнянні з 2016р. майже на 38%.

Зниження інноваційної активності вітчизняних підприємств негативно впливає на розвиток національної економіки і свідчить про необхідність впровадження державною заходів щодо розвитку сприятливого бізнес-середовища.



Рис. 4. Динаміка витрат промислових підприємств на інновації за період 2000-2020рр.
Джерело: Державна служба статистики України [1]

В сучасному світі запроваджено різні методики оцінювання активності та сприятливості ведення бізнес-процесів. Всесвітній банк здійснює оцінку ведення бізнесу серед 190 країн світу. Індекс легкості ведення бізнесу (Doing Business Index) складається з 10 субіндексів. Останній звіт «Doing Business 2020», представлений Світовим банком, висвітлює результати досліджень щодо свободи ведення бізнесу [13]. Рейтинг України серед інших країн світу за індексом Doing Business представлено на рис. 5.



Рис. 5. Рейтинг України серед 190 країн світу за Doing Business Index
Джерело: The World Bank. Doing Business [13]

Як видно з рис. 5, серед 190 країн світу в 2020 р. Україна покращила свої позиції й піднялась з 124 місця (2006 р.) в рейтингу до 64 місця. Найнижчий показник Україна продемонструвала в 2012 р., де займала тільки 152 місце.

За підсумками 2022 р. за версією Heritage Foundation Україна покращила свої позиції у рейтингу визначення Індексу економічної свободи (табл. 2), який дає можливість оцінити рівень лібералізації взаємозв'язків держави і бізнесу.

Таблиця 2

Основні показники економічної свободи України за 2016-2022 рр., бали

Роки	Місце у рейтингу (серед 180 країн)	Загальна оцінка	Податковий тягар	Свобода бізнесу	Трудова свобода	Монетарна свобода	Свобода торгівлі	Інвестиційна свобода	Фінансова свобода
2022	130	54,1	89,1	61,1	60,7	71,2	78,6	35,0	30,0
2021	127	56,2	88,7	63,5	48,7	65,8	79,2	35,0	30,0
2020	127	54,9	81,1	61,3	48,3	63,0	81,2	35,0	30,0
2019	134	52,3	81,8	66,1	46,7	58,6	75,0	35,0	30,0
2018	147	51,9	80,2	62,7	52,8	60,1	81,1	35,0	30,0
2017	166	48,1	78,6	62,1	48,8	47,4	85,9	25,0	30,0
2016	162	46,8	78,6	56,8	46,9	66,9	85,8	20,0	30,0

Джерело: 2023 INDEX OF ECONOMIC OF FREEDOM [15]

За період 2016-2022 рр. загальна оцінка економічної свободи зросла з 46,8 до 54,1 бала. Найвищий показник Україна продемонструвала в 2021 р. (56,2 бала). Важливим індикатором Індексу економічної свободи виступає показник свободи бізнесу, який за досліджуваний період збільшився з 56,8 до 61,1 бала.

Незважаючи на поступове покращення бізнес-середовища до 2022 р., зараз під час військових дій бізнес опинився в складних умовах функціонування. Війна принесла нові виклики, під час яких ускладнюється діяльність всіх типів бізнес-структур.

За матеріалами Forbes Ukraine, в розвитку бізнесу в 2022 році в умовах війни спостерігались такі негативні наслідки:

26% бізнес-структур припинили свою діяльність;

індекс активності бізнесу (UBI - Ukrainian Business Index) має низькі значення: на початок січня 2023 року UBI становив 30,76 (із можливих 100), майже залишається на тому ж рівні у порівнянні з листопадом 2022 року (30,04) та нижчий за показник вересня 2022 року (33,9). Індекс активності бізнесу показує спроможність нарощувати товарооборот, створювати робочі місця. Якщо UBI нижчий за 50, це свідчить про негативні очікування бізнесу щодо подальшого розвитку подій в країні [12].

В умовах війни виникли проблеми та перешкоди розвитку бізнесу в Україні, що заважають йому розвиватись. Основними проблемами формування бізнес-середовища та функціонування великих, середніх та малих підприємств є [2]:

- недостатня кількість платоспроможних клієнтів;
- непрогнозованість ситуації, яка склалась в Україні;
- неможливість передбачити розвиток подій на внутрішньому ринку;
- відсутність достатнього капіталу для здійснення фінансово-господарських операцій;
- непередбачуваність дій держави, що збільшує ризики діяльності бізнес-структур;
- недоступність грантових програм, які оголошені Урядом;
- недостатність кредитних коштів (в тому числі програми 5-7-9 та ін.);
- перешкоди з боку регуляторних чи фіскальних органів та ін.
- податкове навантаження (зокрема адміністративне);
- корумпованість державних інституцій;
- судова система та слабкий захист прав власності;
- брак кваліфікованого людського капіталу;
- нестача оборотного капіталу та проблеми логістичних зв'язків тощо [3].

Також ускладнились взаємовідносини бізнесу із органами влади, що призвело до виникнення проблем: блокування податкових накладних, затримка з логістикою на кордоні, зловживання представниками влади регуляторними нормами, необґрунтована відмова від видачі дозволів тощо.

Зазначені проблеми стримують готовність іноземних інвесторів працювати в Україні, що пов'язано з великими ризиками, та уповільнюють приплив іноземного капіталу в національну економіку [4, 5].

Погіршення ділового середовища призвело до зменшення обсягів інвестування в українські стартапи. Хоча це було очікуване падіння, але з початком війни у 2022 році значна кількість інвесторів заморозили угоди. Відбулося різке зменшення обсягів інвестування з рекордного обсягу в 832 млн дол. США у 2021 році до 218 млн дол. США в 2022 році (рис. 6).



Рис. 6. Динаміка інвестування в українські стартапи за період 2014-2022 рр.

Джерело: фонд AVentures Capital [12]

В умовах сьогодення, коли відбувається прискорення глобалізаційних процесів у світі, активно формується новий устрій суспільства – цифровий. Діджиталізація процесів в нашій країні відбувається повільними темпами. Особливо це відчувається в сучасних умовах, коли Україна

знаходиться в стані війни. Проте швидко змінювані умови, розвиток науково-технічного прогресу та перехід до цифровізації вимагають застосування нових сучасних технологій й нових підходів до управління бізнес-процесів [6].

В світовій економіці активно набирають обертів процеси діджиталізації, в основі яких є застосування інформаційних технологій в усіх сферах діяльності. Діджиталізація - це інноваційний етап економічного розвитку, особливістю якого є інтеграція матеріальних, інформаційних, фінансових та цифрових ресурсів у сфері виробництва та споживання, в економіці та суспільстві [7].

Для української економіки в умовах війни дуже важливо, щоб бізнес структури продовжували свою роботу. Але виклики воєнного часу та трансформація суспільного виробництва вимагають нових підходів до управління бізнес-процесами. Застосування інноваційних технологій відкриває нові горизонти для розвитку процесів діджиталізації. Використання цифрових технологій сприяє оптимізації бізнес-процесів та вирішенню складних задач.

Вимоги часу поставили на перший план необхідність діджиталізації торгівлі товарами, документообороту, де активно впроваджується застосування кваліфікованого цифрового підпису та відповідних програм. В Україні активізуються процеси розвитку криптовалют та децентралізованих додатків, починають впроваджуватись децентралізовані технології (блокчейн), що сприятиме прозорій інформатизації суспільства [14].

Головними напрямками діджиталізації управління бізнес-процесами є:

оптимізація ресурсного потенціалу для підвищення ефективності виробничо-господарської діяльності;

оптимізація зниження витрат та часу, покращення фінансових показників;

удосконалення управління персоналом, мінімізація людського капіталу в кризових умовах;

застосування нових моделей робочого часу та трудового життя;

підвищення ефективності ведення бізнес-процесів та збільшення прибутку підприємства тощо.

Динаміка показників використання інформаційно-комунікаційних технологій на вітчизняних підприємствах представлено в табл. 3 [1].

Таблиця 3
Показники використання інформаційно-комунікаційних технологій на вітчизняних підприємствах

Показники використання інформаційно-комунікаційних технологій	Роки			Відхилення	
	2018	2019	2021	2021/ 2018	2021/ 2018
				+/-	%
Кількість підприємств, які мають доступ до мережі Інтернет, одиниць	43303	43785	44508	1205	2,8
Частка кількості підприємств, які мають доступ до мережі Інтернет, у загальній кількості підприємств, %	88,0	86,4	86,6	-1,4	x
Кількість зайнятих працівників, які мають доступ до мережі Інтернет (осіб)	1064745	1090035	1133069	68324	6,4
Кількість зайнятих працівників, які мають доступ до мережі Інтернет (у % до загальної кількості зайнятих працівників підприємств)	27,1	28,4	28,0	0,9	x
Частка кількості підприємств, які мають вебсайт у загальній кількості підприємств, %	35,6	35,2	35,3	-0,3	x
Частка кількості підприємств, які купують послуги хмарних обчислень у загальній кількості підприємств, %	9,8	10,3	10,2	0,4	x
Частка кількості підприємств, які мають найманих фахівців у сфері ІКТ у загальній кількості підприємств, %	22,3	21,6	21,7	-0,6	x

Джерело: Державна служба статистики України [1]

Дані табл. 1 свідчать, що за період 2018-2021рр. в Україні кількість підприємств та кількість зайнятих працівників, які мають доступ до мережі Інтернет, збільшилась на 2,8% і 6,4% відповідно. Негативною тенденцією є зменшення частки кількості підприємств, що мають вебсайти (на 0,3%) та зменшення частки кількості підприємств, які мають найманих фахівців у сфері ІКТ у загальній кількості підприємств (на 0,6%).

Процеси діджиталізації проявляються в цифровізації робочих місць, де підвищується необхідність використання таких інструментів, як мобільні пристрої, комп'ютерна техніка, мережі Інтернет, інноваційні цифрові технології тощо. В розвитку процесів діджиталізації важливе місце займає

інвестування в розвиток людського капіталу. Усвідомлення підприємцем, що людина стоїть в центрі всіх економічних процесів, сприяє впровадженню сучасної моделі трудового життя - «освіта протягом життя». Підвищення кваліфікації персоналу, проведення тренінгів, вебінарів тощо сприятиме ефективному застосуванню сучасних технологій й зручних цифрових платформ, що мінімізує ризики помилок і втрат та збільшує прибутки в майбутньому [9; 10].

Активізуються процеси діджиталізації з боку держави, що проявляється в створенні та впровадженні нових програм (наприклад, програма «Дія»). З нашої точки зору, для удосконалення процесів діджиталізації управління бізнес-процесами необхідно впровадження таких заходів:

ресурсна та фінансова підтримка розвитку діджиталізації на підприємствах;

розвиток інформаційної інфраструктури підприємства та активізація цифровізації робочих місць;

впровадження сучасних інформаційно-комунікативних технологій, організація логістики інформаційних потоків тощо.

Таким чином, діджиталізація управління бізнес-процесами – це оптимізація ресурсного та інформаційного потенціалу, застосування сучасних ІТ-технологій з метою підвищення ефективності діяльності бізнес-структур та збільшення прибутку. Діджиталізація процесів сприяє розвитку нових видів діяльності підприємства, що відповідає сучасним викликам і потребам сьогодення.

На рис. 7. представлено авторське бачення стратегічно-орієнтованої моделі державного управління розвитку бізнесу, де одним із напрямів соціально-економічної державної політики є формування сприятливого бізнес-середовища, яке визначають вектори стратегічних цілей в умовах впровадження інноваційної системи діджиталізації управління бізнес-процесами.

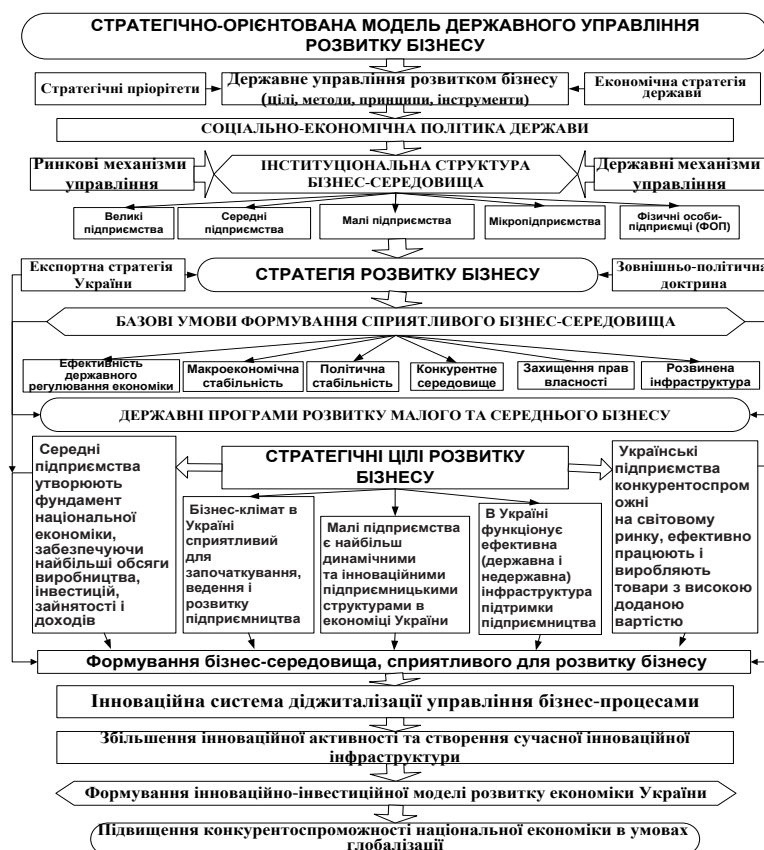


Рис. 7. Стратегічно-орієнтована модель державного управління розвитку бізнесу
Примітка: розроблено автором

Отже, запорукою досягнення успіху бізнесу є впровадження інновацій. З нашої точки зору, для ефективного формування сприятливого бізнес-середовища та розвитку креативних індустрій з боку держави необхідно запровадження певних заходів, а саме:

удосконалення законодавства щодо спрощення процедури ведення бізнесу;

розробка ефективного механізму надання дешевого кредиту та податкових пільг для ведення бізнесу;

залучення бізнес-спільноти до розробки та прийняття рішень щодо оптимізації регуляторного середовища;
активне залучення цифрових інструментів;
розвиток інноваційної інфраструктури та логістики;
розробка та впровадження стратегії розвитку бізнесу;
розвиток бізнес-культури та людського капіталу;
створення відповідного інституціонального середовища для покращення інвестиційної діяльності в країні тощо [11].

Впровадження запропонованих заходів сприятиме поліпшенню бізнес-клімату в Україні та підвищенню конкурентних переваг національної економіки в глобалізованому світі, де прискорюється розвиток цифрових технологій та креативних галузей.

Висновки та напрямки подальших досліджень. Таким чином, у сучасному світі трансформація процесів глобалізації неоднозначно впливає на розвиток національних економік. Закордонний досвід свідчить, що одним із найважливіших факторів підвищення конкурентоспроможності економіки країни є розвиток бізнес-середовища. Формування та розвиток бізнес-середовища значно впливає на розбудову інноваційно-інвестиційної моделі економіки, де головним напрямом виступає розвиток саме інноваційної економіки, в основі якої діяльність бізнес-структур та людського капіталу, здатного до креативного мислення, творчості, розумової праці й продукування інноваційного продукту. Формування глобальної економіки потребує активних дій з боку держави щодо створення відповідних стратегій, які сприятимуть соціально-економічному розвитку країни, де важливим напрямом є розвиток інноваційного підприємництва на основі застосування економіки знань в сучасному ринковому середовищі.

Перспективами подальших розробок у даному напрямі є дослідження та наукове обґрунтування стратегічних напрямів розвитку інноваційного бізнесу у відповідності до формування вітчизняної інноваційно-інвестиційної моделі економіки з врахуванням досвіду зарубіжних країн.

Список літератури

1. Державна служба статистики України, 2023. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/>
2. Ляліна Н.С., Матвієнко-Біляєва Г.Л., Панчук А.С. Сучасний бізнес в Україні: проблеми та перспективи розвитку. *Економіка та управління підприємствами*. 2021. URL: http://www.market-infr.od.ua/journals/2021/53_2021/11.pdf
3. Мірошник Р.О., Прокоп'єва У.О. Розвиток малого і середнього бізнесу в Україні: проблеми і перспективи. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Проблеми економіки та управління». 2020. Т. 4. №1. С. 63-71.
4. Пікулік О.І. Бізнес-середовище в Україні: проблеми та перспективи розвитку. *Держава та регіони. Серія: Економіка та підприємництво*. 2021 р., № 2 (119). С. 23-26.
5. Фролова Н.І. Сучасний стан і перспективи розвитку малого та середнього бізнесу в Україні в умовах кризи. *Інвестиції: практика та досвід*. 2021. №19. С. 16-21.
6. Швиданенко Г.О., Теплюк М.А., Бесараб С.О. Розвиток інноваційного бізнесу в умовах становлення економіки знань. *Інвестиції: практика та досвід*. 2018. №11. С. 43-48.
7. Яценко В.В. Діджиталізація – сучасний фактор розвитку бізнес-процесів. *Ефективна економіка*. 2022. №1. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=10042>
8. Varava L., Bradul A., Turylo A., Dashko I., Varava A. Forecasting the effectiveness of the enterprise to intensify innovation and investment development, taking into account the financial component of economic potential. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol.4 №13(112). P. 89–100. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.239249>
9. Veres O., Matseliukh Yu., Batiuk T., Teslia S., Shakhno A., Kopach T., Romanova Ye. and Pihulechko I. 2022. Cluster Analysis of Exclamations and Comments on E-Commerce Products. *COLINS-2022: 6th International Conference on Computational Linguistics and Intelligent Systems*, May 12–13, 2022 (Gliwice, Silesian University of Technology, Poland). URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3171/paper100.pdf>
10. Kostynets, Y., Kostynets, V. Sustainable business development in the context of the contemporary risks and challenges. *Economics, Finance and Management Review*. 2023. №1. P. 4–12. URL: <https://doi.org/10.36690/2674-5208-2023-1-4>
11. Kuzmin O., Bublyk M., Shakhno A., Korolenko O. and Lashkun H. Innovative development of human capital in the conditions of globalization. The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020). E3S Web Conf., Vol. 166 (2020), №13011. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016613011>
12. Forbes Ukraine, 2023. Бізнес погіршив оцінки ділової активності в січні – НБУ. URL: <https://forbes.ua/news/biznes-pogirshiv-otsinki-dilovoi-aktivnosti-v-sichni-nbu-01022023-11450>
13. The World Bank. Doing Business. *Ease of Doing Business in Ukraine*. URL: <https://archive.doingbusiness.org/en/data/exploreconomies/ukraine>

- 14.Center for Innovations Development, 2023. Стан та потреби бізнесу в умовах війни: результати опитування в січні 2023 року. URL: <https://cid.center/the-state-and-needs-of-business-at-war-results-of-the-january-2023-survey/>
15. 2023 INDEX OF ECONOMIC OF FREEDOM. Ukraine. URL: <https://www.heritage.org/index/country/ukraine>.

УДК 621.7-51

М.В. КІЯНОВСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф.,
О.В. БОНДАР, А.О. РЯЗАНЦЕВ, кандидати техн. наук, доценти, А.С. ЧУМАК, магістрантка
Криворізький національний університет

ШЛЯХИ ЗМЕНШЕННЯ КІЛЬКОСТІ ПРОСТОЇВ ВЕРСТАТНОГО ОБЛАДНАННЯ

Мета. Мета даної роботи полягає в запобіганні втрати ресурсного потенціалу та забезпечення безаварійної експлуатації токарно-карусельних верстатів шляхом коригування процесів технічного обслуговування і ремонту та зміни конструктивних елементів конструкції верстату

Методи дослідження. Результати роботи по запобіганню виходу з ладу та зниженню ймовірності відмов механообробного обладнання, а саме токарно-карусельних верстатів, отримані шляхом теоретичних, економіко-математичних, статистичних і експериментальних досліджень. За допомогою яких були проаналізовано різні стратегії управління ремонтами верстатів, оцінено ефективність їх практичного використання. В якості статистичних досліджень використано дані простоїв токарно-карусельних верстатів, виділено та проаналізовано основні вузли, вихід з ладу яких спричиняє простої механічного обладнання.

Наукова новизна. Розглянуто можливості впровадження системи автоматизованого контролю стану обладнання та управління ТОiP. Проаналізовано сучасні стратегії управління ремонтами та технічним обслуговування технологічного обладнання та запропоновані заходи щодо зменшення кількості простоїв через незадовільний технічний стан обладнання, які дозволять підвищити продуктивність роботи верстатів. Запропоновано застосування діагностичних систем контактних та безконтактних типів для моніторингу поточного технічного стану обладнання та проведення ТОiP «за фактичним станом».

Практичне значення. Задля запобігання простоїв токарно-карусельних верстатів запропоновано нове рішення конструктивної зміни елементів верстату на основі використання гідрогайок з автоматизованим модулем. Гідрогайки оснащуються індикаторами годинного типу і манометром. Даний пристрій разом з контролером може створювати діагностичний стенд та інформувати про стан обладнання. Додатково встановлюються модулі коеебох на двигуни, що відповідають за передачу гвинт-гайка. Були розраховані витрати на впровадження запропонованих заходів та встановлено, що в порівнянні з очікуваним результатом вони мінімальні. Розглянуто можливі шляхи впровадження не тільки для верстатів токарно-карусельної групи, а й для іншого обладнання, що має подібні конструктивні елементи, на всіх підприємствах групи МЕТІНВЕСТ.

Результати. Діюча система планово-попереджувальних ремонтів на підприємствах малоефективна та потребує змін. Виходом з цієї проблеми є перехід на ремонт обладнання «за фактичним станом», який можливий лише з використанням діагностичних систем та зміни конструктивних елементів верстату, зокрема застосування гідравлічних гайок в гвинтових передачах.

Ключові слова: простої обладнання, система ТОiP, ресурсний потенціал, безаварійна експлуатація.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-152-158

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Виробниче обладнання є найдорожчою частиною основних фондів промислового підприємства. У процесі експлуатації обладнання піддається фізичному та моральному зносу та потребує постійного технічного обслуговування та ремонту. Працездатність технологічного обладнання є основною функцією ремонтного господарства у виробничій інфраструктурі підприємства. Підтримка цілісності та працездатності обладнання, взаємозамінність деталей є одним із пріоритетних завдань, що стоять перед менеджментом підприємства.

Від ефективного управління ремонтами безпосередньо залежить продуктивність обладнання. Грамотне здійснення ремонту та організація ремонтного господарства на промисловому підприємстві – важлива складова діяльності підприємства, оскільки управління ремонтами спрямовано підтримку належного стану активної частини фондів. Управління технічним обслуговуванням та ремонтом основних виробничих фондів спрямоване на досягнення кінцевої мети підприємства – на максимізацію суми прибутку.

ТОВ «МЕТІНВЕСТ – Криворізький ремонтно-механічний завод» виготовляє та ремонтує обладнання для гірничодобувних і металургійних підприємств групи МЕТІНВЕСТ. До складу технологічного обладнання підприємства входить велика кількість токарно-карусельних верстатів. На сьогодні є значна проблема з простоями даного обладнання, що є досить негативним чинником та часто призводить до значних втрат. Крім того, від надійної й безаварійної роботи верстата значною мірою залежать продуктивність праці, безпека виробничих процесів, економічні показники виробництва.

На сьогодні часто простої обладнання на підприємствах приймаються як даність, при цьому працівники психологічно віддаляються від пошуку й усунення їх реальних причин. Усе, що залишається підприємствам із такими поглядами, – «гасіння пожеж» на ходу. Діяльність видима, іноді корисна, але недалекоглядна: у довгостроковій перспективі (наприклад, при розрахунку річного бюджету) час простоїв конвертується у значні збитки.

Тому питання щодо зменшення простоїв є досить актуальною темою для дослідження.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нестабільна робота та простої обладнання ведуть до зниження обсягу та якості продукції, що випускається, нераціональному використанню трудових і матеріальних ресурсів, втрати прибутку. Якщо основне завдання виробництва – створення цінності для споживача з метою отримання прибутку, то під час простоїв створення цінності просто неможливе, а отже, підприємство зазнає збитків через недоотриманий прибуток. З іншого боку, простої призводять до зриву термінів виконання замовлень, а отже, і погіршення відносин із клієнтами [1,2]. Скорочення часу між зупиненням та запуском технологічного комплексу без втрати якості та кількості робіт сприяє скороченню втраченої вигоди у вигляді невиробленої продукції за час простою.

Шляхи вирішення такої проблеми розглядали багато вчених таких як: Якобсон М.О., Владзієвський А.П., Якобас В.А., Баженов Г.Е., Коллегаєв Р.М. [3], Акбердін Р.З., Орлов А.П., Акбердіна Р.А., Передрій А.Е.Ю. [4] та інші. Вивчення представлених в літературі розробок свідчить про те, що є нагальна необхідність більш ретельної розробки варіантів вирішення даної проблеми. Також в літературі питанням органічного поєднання розвитку основного виробництва та ремонтного господарства, підвищення рівня обґрунтованості міжремонтного обслуговування обладнання, зниження витрат на запасні частини та усунення аварій приділяється серйозна увага ще з середини минулого століття. Проблема вибору найбільш раціональної форми управління ремонтним та технічним обслуговуванням обладнання та обґрунтування доцільності капітальних ремонтів присвячені роботи Дж. Рігса [5], Ю.В. Жірка [6], І.М. Євстаф'єва [7], М. Шухгальтера, J.Moubraу [8]. У сучасних умовах ці проблеми не лише не втратили актуальності, а й набули ще більшого значення.

Робота устаткування завжди пов'язана з професійним ризиком. Тому управляти безпечною необхідно ефективно, використовуючи системи методів аналізу і оцінки відповідних небезпек з кількісними показниками ризику. Як відомо, відмова технологічного устаткування може варіюватися від того, що легко усувається з мінімальними втратами до аварійного [9-11]. Такі чинники як витрати на ремонт, загальний час простою, наслідки для здоров'я і безпеки, дуже впливають на виробництво і надання послуг [12-16].

У структурі ТОВ «МЕТІНВЕСТ – КРМЗ» функціонують різні види механообробних верстатів – токарні, фрезерні, свердлильні та інші. Розглянемо токарно-карусельні верстати. Характеристика цих верстатів та виробничого процесу загалом, значною мірою залежить від експлуатаційних властивостей складових верстатів. Від сталості характеристик верстатів залежать надійність, безпека й ефективність роботи підприємства загалом.

Аналіз факторів впливу на технічний стан обладнання показує, що вони поділяються на зовнішні та внутрішні. До внутрішніх факторів відноситься: корозія, зношування, старіння, зміна пружно-інерційних характеристик системи. Зовнішні поділяються на експлуатаційні (дотримання регламенту та режимів експлуатації (рис.1)); якість ТОіР, якість монтажу) та людські (знання положень по експлуатації обладнання; правила використання інструменту; висока кваліфікація рбітників) фактори. Наявність даних факторів приводить до істотного підвищення рівня навантажень, зміни режимів навантаження вбік підвищення їх динамічності, що призводить до інтенсивності відмов, різкого зниження ресурсних характеристик верстату, підвищення експлуатаційних і капітальних витрат.



а



б

Рис. 1. Стан елементів токарно-карусельного верстату під час експлуатації: а – чистота гвинта; б – наявність точок змащення

Найбільш частою причиною виходу описуваного обладнання з ладу є природний знос його деталей. До складу токарного верстату входить досить велика кількість рухомих механізмів. Кожна складова верстату теоретично може вийти із ладу, що може стати причиною простою даного обладнання, і в результаті, принести значні

втрати підприємству.

Відповідно до статистичних даних простоїв токарно-карусельних верстатів ТОВ «МЕТІНВЕСТ-КРМЗ» цеху МСЦ-1 (рис. 2) встановлено, що простої без втрат складають 23%, а з втратами – 77%. Причому на ці 77% простоїв з втратами приходить 61%, який спричинений виходом з ладу механічного обладнання. Отже, вихід з ладу механічного обладнання являється основною причиною простоїв токарно-карусельних верстатів.



Рис. 2. Актуалізація проблеми на базі статистичного аналізу простоїв обладнання

Постановка задачі. Діюча система планово-попереджувальних ремонтів на вітчизняних підприємствах, зокрема на ТОВ «МЕТІНВЕСТ – Криворізький ремонтно-механічний завод», малоефективна та потребує змін. Безпосереднім вирішенням цієї проблеми є перехід на ремонт обладнання «за фактичним станом», який можливий лише з використанням діагностичних систем та зміни конструктивних елементів верстату. Таким чином, задачами даного дослідження є вирішення проблеми по запобіганню втрати ресурсного потенціалу та забезпечення безаварійної експлуатації токарно-карусельних верстатів шляхом коригування процесів ТОiР та зміни конструктивних елементів конструкції верстату.

Викладення матеріалу та результати. На сьогодні підприємства України, в тому числі й ТОВ «МЕТІНВЕСТ», мають проблему з простоями обладнання, зокрема, токарно-карусельних верстатів, що є досить негативним чинником та часто призводить до значних втрат. Крім того, від надійної й безаварійної роботи верстата значною мірою залежать продуктивність праці, безпека виробничих процесів, економічні показники виробництва [17]. Загалом, втрати простоїв складаються з:

скорочення продуктивності, передусім стосується обсягів вироблення продукції;

падіння фінансових показників (підприємства втрачають кредитний рейтинг, інвестиційну привабливість, виплачують зарплати робітникам під час зупинки виробництва, враховуючи доплати та відрахування на соціальні потреби);

репутаційні втрати – зіпсовані відносини з постачальниками, клієнтами та фінансовими ринками відновлювати буде дорого і довго;

зниження прибутковості – крім витрачених ресурсів під час зупинки виробництва (електроенергія, сировина, матеріали) сюди додаються компенсаційні виплати клієнтам та інвестиційні збитки;

інші витрати: на тимчасових робітників, оренду обладнання, виплати понаднормових і поставки необхідних матеріалів.

На сьогодні часто простої підприємства приймаються як даність, при цьому працівники психологічно віддаляються від пошуку й усунення їх реальних причин. Усе, що залишається підприємствам із такими поглядами, – «гасіння пожеж» на ходу. Діяльність видима, іноді корисна,

але недалекоглядна: у довгостроковій перспективі (наприклад, при розрахунку річного бюджету) час простоїв конвертується у значні збитки.

Регламент ТОВ «МЕТІНВЕСТ» про технічне обслуговування і ремонт обладнання (ТОіР) вимагає фіксацію факту завершення ТОіР у виді відповідних актів, які підписує механік і гарантує ефект відновлення працездатності обладнання. В агрегатних журналах (без яких робота машини не дозволена) фіксуються лише факт відмови обладнання з різних причин. Далі для умови використання обладнання потрібно зробити запис про відновлення працездатності (тобто виконання аварійного ремонту), тому що експлуатація несправного обладнання має кримінальний наслідок. Ці дві умови хронологічно фіксуються в агрегатному журналі за підписом механіка. Дані про випробування обладнання і оцінки його технічного стану відсутні. Лише зберігаються відомості про перевірку точності верстатів (обов'язкова регламентна процедура), тому що вартість браку механічної обробки деталей, після використання обладнання, механік не хоче залишати на собі.

В останні роки при відмові від обслуговування і ремонту техніки за регламентом (система ППР) висновок для виконання ремонту на практиці здійснюється трьома основними способами: робота до відмови; виведення техніки в ремонт за результатами експертних оцінок; виведення техніки в ремонт за результатами діагностики та прогнозу стану.

Але значний економічний ефект дає тільки третій спосіб. Успішне його використання дозволяє: скоротити час, обсяг ремонту і кількість запасних частин не менше ніж на третину; зменшити число раптових відмов в десятки разів; скоротити втрачений прибуток через простої в кілька разів.

Для останнього способу необхідна повна діагностика об'єкту, причому бажано виявляти всі дефекти, що впливають на ресурс, задовго до відмови, щоб підготуватися до ремонту.

Оскільки напрямком даного дослідження є запобігання виходу з ладу механообробного обладнання, а саме токарно-карусельних верстатів; зниження ймовірності відмов окремого обладнання та виробничих систем; мінімізацію експлуатаційних витрат; забезпечення умов безпечної експлуатації в умовах і під впливом наявних факторів виробництва, то необхідно визначити шляхи вирішення поставленої задачі, а саме пропонується 2 варіанти.

І варіант: використання інноваційного вирішення задачі – застосування гідравлічних гайок в гвинтових передачах. Гідрогайки оснащуються індикаторами годинного типу і манометром. Даний пристрій разом з контролером може створювати діагностичний стенд та інформувати про стан обладнання (рис. 3). В табл. 1 наведено виробничі витрати на придбання модуля з діагностики на основі гідравлічних гайок. Як бачимо, вартість впровадження складає 99969 грн, а отже річний економічний ефект від впровадження даного варіанту складатиме 102337,1 грн, термін окупності – 0,89 року, а коефіцієнт економічної ефективності – 1,12.



Рис. 3. Актуалізація проблеми на базі статистичного аналізу простоїв обладнання

Таблиця 1

Виробничі витрати на придбання модуля з діагностики на основі гідравлічних гайок

Найменування елементів модуля	Кількість, шт.	Ціна за шт., грн	Сума, грн
Виготовлення бронзової гідравлічної гайки	5	9000	45000
Електронний манометр	5	471	2355
Бронзова трубка Ø8мм	5	110	550
Мікропроцесорний контролер МІК – 52	1	10 080	10 080
Промисловий комп'ютер	1	23984	23984
Програмування контролера	1	18000	18000

Разом К_{доп1} = 99969 грн

II варіант: застосування діагностичних систем контактних та безконтактних типів для моніторингу поточного технічного стану обладнання та проведення ТОiP «за фактичним станом». Зокрема, встановлення модулів Коеебох на двигуни, що відповідають за передачу гвинт-гайка. Коеебох – є апаратним рішенням, яке підключається безпосередньо до технологічного обладнання, що має живлення від електричної мережі, та проводить аналіз ефективності його роботи (ОЕЕ – Overall Equipment Effectiveness). Коеебох вимірює ОЕЕ в режимі реального часу, має можливість збирати інформацію про температуру обладнання, його вібрації, тиск на вузлах, може попереджувати про відхилення в роботі верстатів та вихід його з ладу. Фактично, Коеебох – це розумна фабрика, керувати якою можна з персонального комп'ютера, телефону та отримувати дані про стан обладнання в зручній та зрозумілій формі (рис. 4). По суті, на підприємстві будується своя екосистема в середині цієї цифрової фабрики.

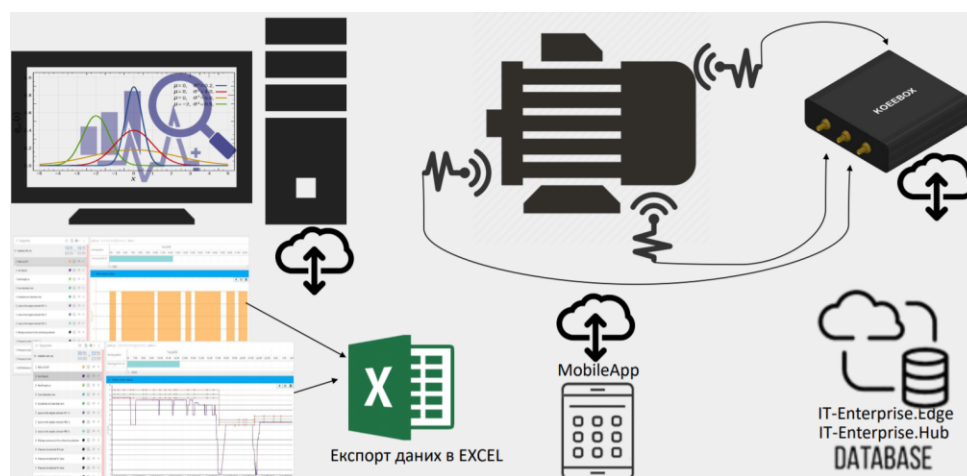


Рис. 4. Схема пропонуваного рішення на основі Коеебох

В табл. 2 наведено виробничі витрати по придбанню модуля з діагностики на основі модулів коеебох. Як бачимо, вартість впровадження складає 612806 грн, а отже річний економічний ефект від впровадження даного варіанту складатиме 51053,4 грн, термін окупності – 5,4 року, а коефіцієнт економічної ефективності – 0,19.

Таблиця 2

Виробничі витрати на придбання модуля з діагностики на основі модулів Коеебох

Найменування елементів модуля	Кількість, шт.	Ціна за шт., грн	Сума, грн
Апаратне забезпечення коеебох	4	5600	22400
Інтеграція з ІС	1	456750	456750
Навчання	1	14616	14616
Кураторство, тестування	1	51840	51840
Щомісячна абонентська оплата 1400 грн, за 12 міс. = 16800 грн	4	16 800	67200

Разом К_{доп2} = 612806 грн

Висновки та напрямки подальших досліджень. В результаті дослідження та аналізу досвіду експлуатації та обслуговування технологічного обладнання підприємства ТОВ «МЕТІН-ВЕСТ-КРМЗ», запропоновано заходи щодо зменшення кількості простоїв через незадовільний технічний стан обладнання, які дозволять підвищити продуктивність роботи верстатів, а саме використання гідравлічних гайок в гвинтових передачах верстатів є новим інноваційним рішенням. Витрати на впровадження запропонованих заходів, в порівнянні з очікуваним результатом, є мінімальними, та реальними для впровадження. Крім цього пропонується проводити наступні заходи: розробити інструкції по обслуговуванню кожного верстату; візуалізувати інформацію про використання інструменту; прищепити дбайливе ставлення до виконання обов'язків; проводити періодичне підвищення кваліфікації верстатників.

Розглянуті шляхи впровадження можливо застосовувати не тільки для верстатів токарно-карусельної групи, а й для іншого обладнання, що має подібні конструктивні елементи, на всіх підприємствах групи ТОВ «МЕТІНВЕСТ».

Список літератури

1. **Levitt J.** Handbook of maintenance management / Joel Levitt. – Industrial Press, Inc., 1997. – 455 p.
2. **Стукалов Д. Н.** Простои: анализ и устранение причин / Д. Н. Стукалов // Техническое обслуживание и ремонт. – 2011. – № 4. – С. 8–11.
3. **Колегаев Р. Н.** Эффективность работы ремонтной службы предприятия и объединения / Р. Н. Колегаев, К. И. Мельникова, В. И. Кривоберец. – Київ : Техника, 1976. – 160 с.
4. **Передрій А. Е. Ю.** Інноваційне управління підприємством в сучасних умовах / А. Е. Ю. Передрій // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2017. – Т. 24, № 1246. – С. 40–43.
5. **Риггс Дж.** Производственные системы: планирование, анализ, контроль / Дж. Риггс. – М. : Прогресс, 1972. – 340 с.
6. **Жиркин Ю. В.** Надежность, эксплуатация и ремонт металлургических машин / Ю. В. Жиркин. – Магнитогорск : МГТУ им. Г.И. Носова, 2002. – 330 с.
7. **Евстафьев И. Н.** Организация сбора данных для выбора оптимальной стратегии управления техническим обслуживанием и ремонтом оборудования / И. Н. Евстафьев // Металлург. – 2009. – № 3. – С. 30–33.
8. **Moubray J.** Reliability-Centered Maintenance Second Edition / John Moubray. – Industrial Press, Inc., 1997. – 448 p.
9. **Pacaiova H.** Maintenance management system [Electronic resource] / Hana Pacaiova, Juraj Glatz // MM Science Journal. – 2015. – Vol. 2015, no. 03. – P. 665–669. – Mode of access: https://doi.org/10.17973/mmsj.2015_10_201532 (date of access: 18.04.2023).
10. **Jardine A. K. S.** A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance [Electronic resource] / Andrew K. S. Jardine, Daming Lin, Dragan Banjevic // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2006. – Vol. 20, no. 7. – P. 1483–1510. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012> (date of access: 18.04.2023).
11. **Lee J.** New Technologies for Maintenance [Electronic resource] / Jay Lee, Haixia Wang // Springer Series in Reliability Engineering. – London. – P. 49–78. – Mode of access: https://doi.org/10.1007/978-1-84800-011-7_3 (date of access: 18.04.2023).
12. **Kizim A. V.** Establishing the Maintenance and Repair Body of Knowledge: Comprehensive Approach to Ensuring Equipment Maintenance and Repair Organization Efficiency [Electronic resource] / A. V. Kizim // Procedia Technology. – 2013. – Vol. 9. – P. 812–818. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.090> (date of access: 18.04.2023).
13. **Badía F. G.** Optimal inspection and preventive maintenance of units with revealed and unrevealed failures [Electronic resource] / F. G. Badía, M. D. Berrade, Clemente A. Campos // Reliability Engineering & System Safety. – 2002. – Vol. 78, no. 2. – P. 157–163. – Mode of access: [https://doi.org/10.1016/S0951-8320\(02\)00154-0](https://doi.org/10.1016/S0951-8320(02)00154-0) (date of access: 18.04.2023).
14. Modern Technology Equipment Maintenance Process Management [Electronic resource] / **Zi Qin Ma** [et al.] // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1061-1062. – P. 1220–1223. – Mode of access: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1061-1062.1220> (date of access: 18.04.2023).
15. **Dhillon B. S.** Mining Equipment Reliability, Maintainability, and Safety [Electronic resource] / Balbir S. Dhillon. – London : Springer London, 2008. – Mode of access: <https://doi.org/10.1007/978-1-84800-288-3> (date of access: 18.04.2023).
16. Present Status and Future Growth of Advanced Maintenance Technology and Strategy in US Manufacturing [Electronic resource] / **Xiaoning Jin** [et al.] // International Journal of Prognostics and Health Management. – 2020. – Vol. 7, no. 3. – Mode of access: <https://doi.org/10.36001/ijphm.2016.v7i3.2409> (date of access: 18.04.2023).
17. Точность, надежность и производительность металлорежущих станков / **Г. Д. Григорьян** [та ін.]. – Київ : Техніка, 1991. – 201 с.

Л.І. ЄФІМЕНКО, М.П. ТИХАНСЬКИЙ, кандидати техн. наук, доценти,
А.М.ТИХАНСЬКА, асистент, Криворізький національний університет

АДАПТИВНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ З ЕТАЛОННОЮ МОДЕЛЛЮ КОТЛОАГРЕГАТУ

Мета. Метою цієї роботи є синтез самоналагоджувальної системи з еталонною моделлю управління технологічними процесами в котлоагрегатах за рахунок автоматичного настроювання регуляторів для підвищення виробництва пари. Для цього необхідно розробити математичну модель процесу, сформулювати критерії адекватності квазістатичних процесів, що відбуваються у котлі під час пароутворення.

Методи дослідження. Для вирішення цього завдання використано: методи сучасної теорії управління; методи обробки випадкових процесів і математичного моделювання, а також наукове узагальнення раніше виконаних досліджень та аналіз літературних джерел.

Наукова новизна. Отримана адекватна математична модель з еталонною моделлю управління технологічними процесами в котлоагрегатах, що відбуваються з урахуванням перешкод різного походження та контрольованих і неконтрольованих збурень, що дозволяє синтезувати адаптивне керування режимами роботи котла при зміні вхідних параметрів.

При цьому використана модернізована методика настроювання регуляторів адаптивної системи керування технологічним процесом пароутворення.

Практична значимість. Отримана адекватна математична модель технологічного процесу, що відбувається у котлоагрегатах з урахуванням перешкод різного походження та контрольованих і неконтрольованих збурень, що дозволяє синтезувати адаптивне керування режимами роботи котла при зміні вхідних параметрів та за рахунок цього знизити енергоспоживання та підвищити ефективність пароутворення.

Авторами запропоновано автоматичне настроювання регуляторів адаптивної системи для підвищення виробництва пари яке відрізняється тим, що дозволяє швидко реагувати на додатну інформацію та корегувати управляючі дії за допомогою самонастроювального регулятора.

Результати. Розглянуто синтез самоналагоджувальної системи з еталонною моделлю управління технологічними процесами в котлоагрегатах за рахунок автоматичного настроювання регуляторів для підвищення виробництва пари. Автоматичне управління котлоагрегатами з адаптацією за зміною впливів, що збурюють, дозволяє підтримувати показники якості управління в заданих межах.

Ключові слова: система керування, адаптивна система, самоналагоджувальна система, еталонна модель, котлоагрегат, адаптивний регулятор, автоматична система керування.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-158-162

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними завданнями. Дослідження технологічних процесів пароутворення, а саме, процесів згоряння палива в топковому пристрої котельного агрегату показало, що в результаті дії керуючих впливів та зовнішніх і внутрішніх збурень параметри процесу пароутворення змінюються. Ця зміна носить детермінований або випадковий характер, крім того може призвести до серйозних аварій якщо виходить за межі допустимих.

До основної інформації, що змінюється треба віднести такі параметри як: температуру перегрітої пари, тиск пари, рівень води в барабані, розрідження у топці, надлишок повітря за пароперегрівачем. Їх відхилення варто підтримувати в допустимих межах.

Адаптивні системи накопичують та оброблюють інформацію по поведінку об'єкта у реальному часі. Це дає змогу знизити недоліки нестачі апріорної інформації про технологічний процес та систему під час її аналізу та проектування.

Аналіз досліджень та публікацій. Питаннями впровадження самоналагоджувальних систем управління технологічними процесами в котлоагрегатах за рахунок автоматичного настроювання регуляторів займається цілий ряд вітчизняних та закордонних вчених [1-6]. Розглянемо ряд відомих досліджень з питань автоматизації. Це дослідження, які проводять на фірмі Комел, парові котли якої "Комел СОщ" та "КотБУС-1" мають власну автоматику і працюють з блочними газовими пальниками; фірми Спекон, промислові котли якої працюють на газі або рідкому паливі та мають спеціалізовані промислові контролери СПЕКОН; фірми "АСУ-КТ" та КБ "АГАВА", які розробляють системи керування промисловими котлами.

Авторами [11, 13-17, 19 П] розглянуто деякі методи побудови оптимального алгоритму управління групою водогрійних котлів, що працюють на загальне навантаження, описана розроблена фірмою Energy Technology Control (Великобританія) схема Boilermizer з

мікропроцесорами, що працює на рідкому паливі або газі, розглядаються різні стратегії побудови САР котлів з точки зору їх ефективності та мінімізацією втрат.

Виконаний огляд та аналіз існуючих підходів, способів і методів регулювання технологічних параметрів процесів показав, що всі вони спрямовані на автоматизацію оптимального співвідношення «паливо – повітря», регулювання температури або тиску, розрідження в топці і за котлом.

Постановка задачі. Аналіз існуючих систем процесу виробництва пари в Україні та за кордоном показав, що процес достатньо автоматизований, однак, існуючі системи управління мають суттєві недоліки, а саме, досить спрощену, стандартну, систему керування, не використовують сучасні розробки адаптивних систем з еталонною моделлю управління технологічними процесами в котлоагрегатах, що не дозволяє забезпечити сталість високої якості вихідного продукту. Вони розглядають окремі підсистеми загальної системи керування процесами в котлоагрегатах, відомі методи регулювання та автоматизації та модернізують існуючі системи. Але не розробляють математичну модель існуючого процесу, критерії адекватності квазістатичних процесів, що відбуваються у котлі під час пароутворення.

Пов'язано це з тим, що збурення, в основному, відносяться до тих, які прямо не вимірюються, тому для підвищення виробництва пари необхідно синтезувати самоналагоджувальну систему з еталонною моделлю управління технологічними процесами в котлоагрегатах за рахунок автоматичного настроювання регуляторів. Автоматичне управління котлоагрегатами з адаптацією за зміною впливів, що збурюють дозволяє підтримувати показники якості керування в заданих межах.

Тому дослідження питання синтезу самоналагоджувальної системи з еталонною моделлю управління технологічними процесами в котлоагрегатах є актуальним завданням.

Для вирішення цього завдання необхідно обґрунтувати вибір та обрати тип регулятора, який забезпечить оптимальні показники якості процесу пароутворення, адаптувати методи сучасної теорії управління стосовно до квазістатичних процесів управління; дослідити різні підходи до синтезу адаптивної системи керування з еталонним і стабілізації процесу згоряння в КА за рахунок автоматичного настроювання з еталонною моделлю; розробити еталонну модель процесу згоряння в КА; провести чисельне моделювання керованих процесів та проаналізувати отримані результати.

Викладення матеріалу та результати. Система називається самоналагоджуваною адаптивною системою з еталонною моделлю, якщо бажаний рух об'єкта задається моделлю, яка є еталоном для об'єкта. На вхід такої моделі подають такі самі дії, що й на вхід об'єкта керування.

При цьому аналізують вплив зовнішніх збуджуючих факторів на характеристики технологічного об'єкта, що досліджують, а саме котлоагрегата. Якщо параметри коригуючого пристрою (регулятора) змінюються за попередньо одержаними законами, то використовують самоналагоджувальні системи з еталонною моделлю.

Стандартна схема самоналагоджуваної системи із моделлю-еталоном, зображена на рис.1.

Розглянемо принцип роботи такої системи з еталонною моделлю, який полягає в тому, що сигнал невідповідності $\varepsilon(t)$ подається на вхід моделі та на вхід послідовно з'єднаних керуючого пристрою та об'єкта керування. На виході об'єкта керування сигнал $z(t)$ порівнюється з сигналом моделі $z_M(t)$, який виходить з еталонної моделі.

Сигнал відхилення $g(t)$, впливає на ланцюг самоналагоджування (ЛС), змінює параметри керуючого пристрою, доки вихідні сигнали моделі $z_M(t)$ та об'єкта керування $z(t)$ стануть рівні.

Адаптивні системи з еталонними моделями широко використовуються при створенні систем автоматизації технологічних об'єктів, у нашому випадку технологічних процесів пароутворення, а саме, процесів згоряння палива в топковому пристрої котельного агрегату.

Розглянемо та проаналізуємо структурну схему адаптивної самоналагоджувальної системи з еталонною моделлю для об'єкта другого порядку, яка наведена на рис.2.

Визначено параметри системи, які дорівнюють: $k_0 = 6$, $a_0 = 2$, $a_1 = 2.5$, $A = 2$, $\omega = 0.6$ рад/с.

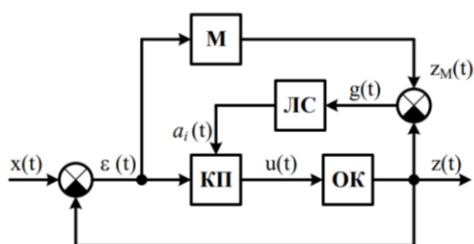


Рис. 1. Схема СНС з еталонною моделлю

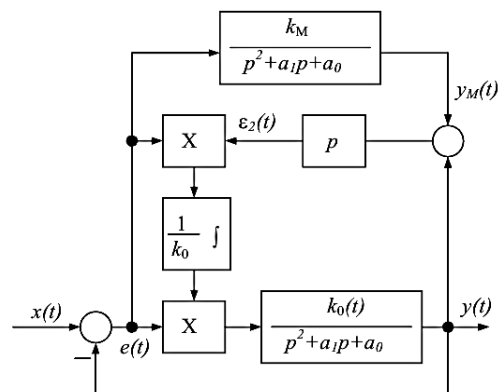


Рис. 2. Структурна схема самоналагоджувальної системи другого порядку

За даною схемою складена цифрова модель системи в додатку Simulink. Її структурна схема наведена на рис. 3.

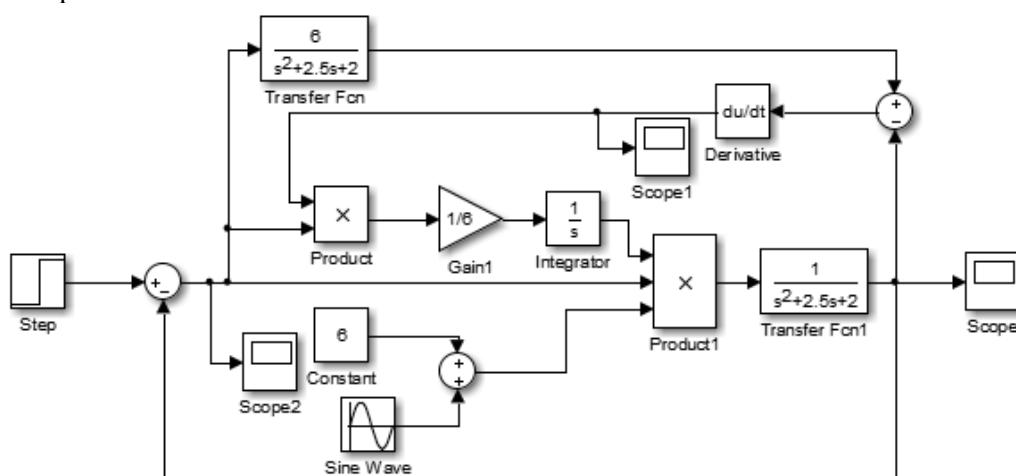


Рис. 3. Структурна схема цифрової моделі самоналагоджувальної системи другого порядку

Одержана структурна схема цифрової моделі самоналагоджувальної системи другого порядку, яка представлена на рис. 3, дозволяє при відсутності параметричного збурення здійснити моделювання в замкнутій системі.

Графік зміни вихідної величини $y(t)$ при відсутності параметричного збурення в замкнутій системі наведено на рис. 4.

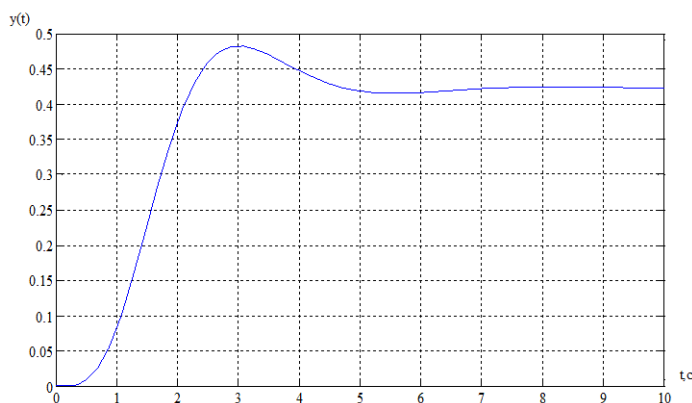


Рис. 4. Графік зміни вихідної величини $y(t)$ в замкнутій системі при відсутності параметричного збурення

Розглянемо поведінку системи при наявності параметричного збурення та здійснимо моделювання роботи систем, що само налаштовуються. При цьому параметричне збурення дорівнює:
 $A = 2, \omega = 0.6$ рад/с.

На рисунках 5а,б,в наведені відповідно графіки зміни вихідного сигналу $y(t)$, графік зміни помилки $\varepsilon_2(t)$, графік зміни помилки $\varepsilon(t)$.

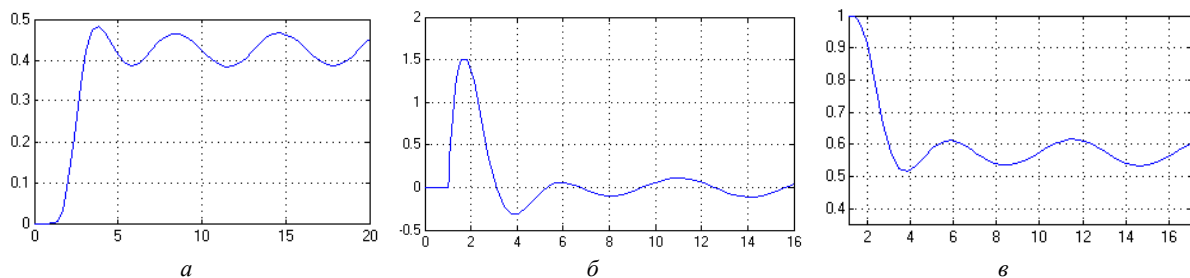


Рис. 5. Графік зміни вихідної величини $y(t)$ в замкненої системі при наявності параметричного збурення: a - графік зміни вихідного сигналу $y(t)$ при параметричному збуренню; b - графік зміни помилки $\varepsilon_2(t)$ при параметричному збуренню; v - графік зміни $\varepsilon(t)$ при параметричному збуренню

Розглянемо реакцію системи при збільшенні коефіцієнта передачі моделі k_M в 100 разів. Для цього необхідно побудувати графіки зміни відповідних сигналів, а саме: вихідного сигналу $y(t)$ та помилок $\varepsilon_2(t)$, $\varepsilon(t)$. Отримані графіки представлені відповідно на рис. 6а, б, в.

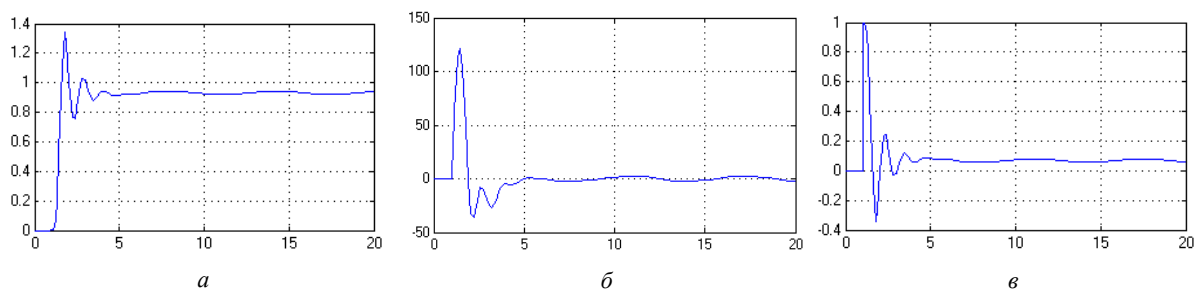


Рис. 6. Графік зміни вихідної величини $y(t)$ в замкненої системі при збільшенні коефіцієнта передачі моделі: a - графік зміни $y(t)$, b - графік зміни $\varepsilon_2(t)$, v - графік зміни $\varepsilon(t)$

Висновки та напрямок подальших досліджень. Отримана адекватна математична модель з еталонною моделлю управління технологічними процесами, що відбувається у котлоагрегатах з урахуванням перешкод різного походження та контрольованих і неконтрольованих збурень, що дозволяє синтезувати адаптивне керування режимами роботи котла при зміні вхідних параметрів та за рахунок цього знизити енергоспоживання та підвищити ефективність пароутворення.

Отримані графіки необхідних процесів в системі при відсутності параметричного збурення. Також для аналізу впровадження самонастроювального регулятора були отримані відповідні графіки при параметричному збуренні, та проаналізована їхня зміна. Аналіз показав, що введення збурення в систему додає в процес коливальну складову. При збільшенні коефіцієнту підсилення моделі скорочується час перехідного процесу, але збільшується коливальність.

Список літератури

1. **Хобін В.А., Левінський М.В.** Адаптивне керування об'єктами технологічного типу: алгоритми пасивного самоналагодження коефіцієнта передачі регуляторів : монографія. Одеса : Гельветика, 2019. 228 с.: табл., рис. Бібліотгр.: с. 185-194. ISBN 978-966-916-717-0.
2. **Бобух А. О.** Автоматизовані системи керування технологічними процесами : навч. посіб. Харків: ХНАМГ, 2006. 185 с.
3. **Khobin V.A., Levinskyi M.V.** Problem topicality of offset absence order increase in controllers during control of objects with varying transmission coefficient [Text]. *ATBP journal*. 2016. № 2 (26). P. 31–38.
4. **Бугров С.В., Лисовой Р.А., Жмудь В.А., Колкер А.Б.** Адаптивная система управления с использованием стабилизирующего эффекта девиации коэффициента регулятора. *Научный вестник НГТУ*. 2010. № 1(38). С. 157–160.
5. **Головко Д.Б., Рого К.Г., Скрипник Ю.О.** Автоматика і автоматизація технологічних процесів: Підручник для інженерів та студентів вузів. К.: Либідь, 1997. 232 с.
6. **Хобін В.А., Левінський М.В.** Оптимізація фільтрів власного руху самоналагоджувальної САУ об'єктом технологічного типу [Текст]. *Радиоелектроніка, інформатика, управління*. 2016. № 4. С. 120–129. ISSN 1607-3274.
7. **Артюх С.Ф., Дуель М.А., Шелепов И.Г.** Основы автоматизованных систем управления энергогенерирующими установками электростанций. Харків: Знання, 1998. 324 с.
8. **Astrom K.J., Hagglund T.** Advanced PID control. ISA (August 8, 2005). 461 p.
9. **Хобін В.А., Мазур О.В., Степанов М.Т.** Ефективне гарантующе управління тепловими та тепломасообмінними процесами харчових технологій. Херсон: ФЛП Гринь Д.С. 2014. 212 с.
10. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології [Текст]: Матеріали Четвертої Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів (АКІТ-2017). Київ, 19–20 квітня 2017 р. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2017. 204 с. : іл. Бібліотгр.: в кінці тез. 60 пр. ISBN 978-966-622-826.

11. Алгоритми адаптації в системах управління енергоблоками / Ротач В.Я., Кузищин В.Ф., Бутирев В.П., Солодовников В.Н. *Теплоэнергетика*. 1981. №10. С. 11–15.
12. Хобін В.А., Марчук О.А. Самоналагоджувальна система [Текст]: патент на корисну модель UA 36671, МПК2006 G05B13/02. / (Україна); заявник Одеська національна академія харчових технологій. № u200801328; заявл. 04.02.2008; опубл. 10.11.2008. Бюл. 21. 5 с.
13. Astrom K.D., R.D. Bell Drum - boiler Dynamics. *Automatica*, 36(2000). pp. 363-378.
14. Хобін В.А., Левінський М.В. Вдосконалення алгоритмів самоналагоджувальної системи керування для забезпечення ефективності її пускових режимів [Текст] // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2018. № 3. С. 120–129. ISSN 1607-3274.
14. O'Dwyer A. Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules, 2nd edition, Imperial College Press, 2006 – 564 p.
15. Адаптивне та робастне управління з компенсацією невизначеностей / під ред. Бобцов О.О., Пиркін А.О.: Вид.: НІУ ІТМО 2013. 132с.
16. Rejection of sinusoidal disturbance of unknown frequency for linear system with input delay / Pyrkın A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Krstic M. American Control Conference. Baltimore, USA, 2010.
17. Хобін В.А., Левінський М.В. Автоматична самоналагоджувальна система керування об'єктом технологічного типу. Одеська національна академія харчових технологій.
18. Ardell G. G., Gumovski B. Model Prediction for Reactor Control. *Chemical Engineering Progress*. 1983. V.79. №6. P.77–83.
19. Ed. by Tariq Samada. John Weyrauch Automation, control and complexity: An integrated approach. Chichester [etc.]: Wiley, Cop. 2000. 328 с., ил.
20. Ed. William, S. Levine Control system fundamentals. Boca Raton [etc.]: CRC press, Cop. 2000. 466 с., ил.
21. Соколов С.В. Оптимальні та адаптивні системи : навч. посіб. Суми : Сумський державний університет, 2018. 221 с. ISBN 978-966-657-725-5

УДК 622.7

В. ГАРБЕР, Dr.-Ing Bto Feuerung- und Trocknungstechnologien, Німеччина

В.І. ГОЛОВАНЬ, незалежний консультант АГНУ, Україна

Л.В. СКЛЯР, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет, Україна

ЗНЕВОДНЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОНЦЕНТРАТІВ ТА СУЧАСНІ СУШИЛЬНІ ПРОЦЕСИ

Мета. Мета даних досліджень - аналіз використання процесів фільтрації суспензій залізорудних концентратів та сучасних методів термічного сушіння та встановлення основних тенденцій у розвитку обладнання для зневоднення залізорудних концентратів.

Методи дослідження. Обробка статичних даних технічних та економічних характеристик роботи фільтрувального обладнання механічного та термічного видалення води.

Наукова новизна. Наукова новизна результатів дослідження полягає у визначенні вартості процесів зневоднення залізорудних концентратів залежно від типу фільтрувального обладнання, кінцевої вологості після фільтрації, визначення економічно обґрунтованої межі переходу від механічного зневоднення до термічного сушіння за умов підвищення тонини помелу залізної руди при збагаченні

Практичне значення. Аналіз технологічних та економічних показників процесів механічного та термічного сушіння показав, що при зменшенні тонини помелу збільшується кінцева вологість осаду на фільтрах і частина процесу зневоднення повинна передаватися термічному сушінню.

Результати. Розглянуто тенденції у розвитку обладнання для фільтрування залізорудного концентрату. Показано можливість та недоліки використання дискових вакуум-фільтрів з керамічними секторами, що фільтрують. Проведено техніко-економічне порівняння зарубіжних фільтрів та встановлено, що вологість осаду та високі питомі енергетичні витрати зумовили тенденцію впровадження нових конструкцій фільтрів імпортного виробництва, незважаючи на незначне зниження кінцевої вологості залізорудних концентратів з 9,5 до 7,5%. Такі концентрати не можна використовувати у наступних металургійних процесах. Розраховані питомі вартості механічного зневоднення (0,224 US\$/тонн. вологого. концентрату) та термічного сушіння (0,256 US\$/тонн. вологого. концентрату) близькі, що дозволяє розраховувати зневоднення залізорудних концентратів як єдиний процес з економічно обґрунтованою межею переходу, фільтрації вологості залізорудного концентрату

Ключові слова: зневоднення, сушіння, вологість, фільтрування, фільтри, термічна сушіння

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-162-169

Проблема та її зв'язок із науковими та практичними завданнями. Аналіз сучасного стану залізорудної галузі промисловості у світі показує, що з другої половини XX століття зросли

обсяги видобутку та споживання залізних руд при випереджаючих темпах приросту розвіданих запасів. Так, світове виробництво товарних залізняку зросло в 3,5 рази, а розвідані запаси за той же період збільшилися в 6,2 рази [1,2].

Видобуток і переробку залізняку здійснюють більш ніж у 50 країнах. Це зумовлює високий рівень конкуренції та, як наслідок, підвищення вимог до якості магнетитового концентрату. На світовому ринку користуються попитом концентрати з масовою часткою заліза 69-70 %, діоксиду кремнію не більше 2,5-3 % та сірки не більше 0,06-0,08 % [3], оскільки висока якість магнетитових концентратів дозволяє значно скоротити витрати у металургійному переділі. Водночас якість залізорудної сировини у світі постійно знижується і за останні 25 років вміст заліза у рудах, що добуваються, зменшився в 1,3 рази [1,4].

Відомо, що на збагачувальних фабриках широко застосовуються процеси, що здійснюються у водних середовищах (збагачення у важких суспензіях, флотація та ін.), під час яких у залізорудний концентрат запроваджується значна кількість баласту - вода. Тому заключними операціями у процесах збагачення є механічне та термічне зневоднення продуктів збагачення, насамперед - залізорудних концентратів. Останніми роками багатьох гірничо-збагачувальних комбінатах загострилася проблема забезпечення якісних показників зневоднення концентратів, зазначених вище [5,6]. Вологість відфільтрованого матеріалу не відповідає вимогам наступного переділу. Це зумовлено, зокрема, зростанням вимог металургійного переділу до якості концентрату за змістом корисного компонента, що тягне за собою збільшення тонини помелу руди. У процес збагачення залучаються концентрати з більш розвиненою питомою поверхнею (понад 220 м²/кг).

Аналіз досліджень та публікацій. Операція зневоднення концентратів у вигляді суспензій (згущених пульп) є заключною у циклі збагачення корисних копалин мокрим способом та пов'язана зі значними енергетичними та матеріальними витратами [7, 8]. Від вологості продукту, що отримується після зневоднення, залежать витрати на його подальший переділ.

Залізорудний концентрат приймається до перевезення водним транспортом вологістю: у період від 15 травня до 30 вересня – не більше 8%, у решту пори року – не більше 2%.

При вологості понад 8% під дією вібрації корпусу та хитамиці може переходити в розріджений стан і переміщатися в судні. При температурі повітря нижче - 5°C концентрат промерзає в порожнині судна на глибину до 50 см (це пояснюється термостатуючою дією води навколо судна). У залізничних вагонах концентрат може промерзати на усю глибину вагона, що значно ускладнює розвантажувальні роботи. При складуванні концентрат зберігається на відкритих майданчиках, що зумовлює процеси вторинного зволоження на рівні максимальної молекулярної вологості 8%-10% залежно від атмосферних умов.

Операція зневоднення обводнених концентратів корисних копалин пов'язана зі значними енергетичними витратами - у циклі збагачення посідає друге місце за енергоємністю після подрібнення. Подорожчання енергетичних ресурсів вимагає зниження енерговитрат на всіх етапах збагачення, зокрема фільтрації та подальших переділах.

Підвищення ефективності роботи фільтрувального обладнання, зниження сукупних витрат на процес зневоднення та забезпечення вимог до одержуваного концентрату мають важливе значення для підвищення конкурентоспроможності та стабільності роботи ГЗК в умовах ринкової економіки.

Перший етап зневоднення - фільтрація, в якій шар осаду (кек-фільтрувальний пиріг), отриманий в результаті поділу суспензії на фільтрі, має досить жорстку структуру і не деформується в процесі зневоднення.

Основною характеристикою фільтрації є - обсяг фільтрату (рідини), або питома продуктивність в кг/м²*годину - вага осаду (вологого концентрату), який отримується за одиницю часу з одиниці поверхні фільтра. Швидкість фільтрування прямо пропорційна різниці тисків, обернено пропорційна в'язкості фільтрату і опору фільтруючого середовища, тобто. сумі місцевих опорів шару осаду та фільтруючої перегородки (фільтротканини). Товщина осаду, отже, та її опір у процесі фільтрування збільшується, зокрема і з допомогою його стискування під впливом тиску і закупорки каналів дрібними частинками. Види пов'язаної вологи різних представлені в табл. 1 [9]. В результаті вакуумної фільтрації під час сушіння осаду відбувається видалення вільної, осмотично пов'язаної вологи та вологи мікрокапілярів.

Кінцева вологість осаду залежить від крупності, мінералогічного складу (кількості глинистих частинок) концентрату та способу фільтрування. Величина і форма твердих фракцій концентрату визначає величини питомої поверхні та питомого опору.

Класифікація форм вологи в осадах

Концентрат магнетитовий	Масова доля вологи,%					Максимальна молекулярна вологостійкість
	Форми вологи за термограмами сушіння					
	осмотична мікрокапілярна, каналного стану	мікрокапілярний стикувальний стан	мікрокапілярів	молекулярної адсорбції		
				поли-	моно-	
ІнГЗК	22,5-20,1	20,1-8,6	8,6-0,21	0,21-0,12	0,12-0	10,5
АМКР	15,8-14,4	14,4-7,3	7,3-0,17	0,17-0,045	0,045-0	9,3
ПівнГЗК	18,4-15,6	15,6-7,1	7,1-0,2	0,2-0,049	0,049-0	9,2
ЦГЗК	18,7-16,3	16,3-6,9	6,9-0,13	0,13-0,032	0,032-0	7,8

Кінцева крупність подрібнення визначається мінералогічними характеристиками руд, розмірами вкраплень корисного матеріалу, технологією збагачення і якістю концентратів, що випускаються.

Вимоги до якості концентратів безперервно підвищуються, що призводить до зниження їхньої крупності [7]. Чим тонший концентрат, тим вище його питома поверхня та питомий опір. Питомий опір осаду є важливою характеристикою фільтрації рудних концентратів: чим вище питомий опір, тим нижче питома продуктивність при фільтруванні і вище вологість осаду. Фізико-хімічні характеристики концентратів та результати зневоднення (наведено у табл. 2).

У результаті зростання вимог металургійного переділу до якості концентрату за змістом корисного компонента, процес зневоднення залучаються концентрати з більш розвиненою питомою поверхнею.

Загальні тенденції зі збільшенням питомої поверхні (тонини поломи) концентратів:

a - зі збільшенням питомої поверхні зростає та питомий опір концентрату механічному зневодненню;

b - чим вищий питомий опір, тим нижча питома продуктивність при фільтруванні і вище вологість осаду.

Таблиця 2

Фізико-хімічні характеристики концентратів та результати зневоднення [21]

Концентрат магнетитовий	Масова доля твердого, %			Питома поверхня, м ² /кг	Масова доля вологи осаду, %			Питома продуктивність, кг/м ² *год	
	-45 мкм	-20 мкм	глини		вакуум-фільтр	прес-фільтр	центрифуга	вакуум-фільтр	прес-фільтр
ІнГЗК	94,33	12,71	0,2	205,8	12,5	8,8	8,5	350	140
АМКР	78,92	8,4	0,1	156,7	9,1	7,3	7,2	420	200
ПівнГЗК	85,31	13,5	0,1	142,3	11,0	7,2	7,0	500	200
ЦГЗК	61,61	7	0,1	127,4	10,0	7,0	7,0	400	240

Для отримання продукту, за якістю, що задовольняє вимогам наступного переділу, виникає необхідність інтенсифікації процесу зневоднення, використання систем зневоднення з більш високою рушійною силою процесу.

Перепад тиску у вакуумних фільтрах (рушійна сила зневоднення) обмежений 1 атм. (760 мм. рт. ст.). Фактично вакуум під фільтрувальною поверхнею ДВФ становить 400-600 мм. рт. ст. Природною була думка використовувати як вакуум, а й зовнішній тиск над фільтрувальною поверхнею. Німецькі фірми «Bokela Krupp Fördertechnik» пропонують дискові фільтри з тиском 6 атм. над поверхнею до 168 м² безперервної дії.

Серйозним, активно розвивається у вдосконаленні дискових вакуум-фільтрів є роботи пов'язані з реалізацією нового механізму фільтрації, заснованого на використанні нетканинних типів фільтруючих поверхонь [12-14]. Для забезпечення процесу фільтрації та безперервного видавлення води в цьому випадку потрібна незначна витрата електричної енергії для підтримки необхідного вакууму, оскільки капіляри, що постійно заповнені водою, не пропускають ні повітря, ні тверді частинки.

У цьому напрямі активно ведуться роботи фірмами: Outokumpu (Фінляндія) [11], НВКФ «БАКОР-Фільтр Кераміка» (Казахстан) [12]. Досвід експлуатації фільтрувальних установок CER-АМЕС фірми Outokumpu та дискових вакуум-фільтрів з керамічними фільтруючими секторами при зневодненні мідних, нікелевих та цинкових концентратів визначив їх можливості [13]:

ступінь зневоднення на 2-3% вище ніж при використанні фільтротканини, що скорочує витрати на подальше сушіння і підвищує якість одержуваного осаду;

термін служби керамічних елементів, що фільтрують, - не менше 1,5 роки, тканинних - 17-20 діб;

витрата електроенергії на етапі набору осаду - у 10-15 разів менша, так як рушійна сила процесу фільтрації створюється капілярними силами в порах керамічної перегородки, і немає необхідності застосування високопродуктивних вакуум-насосів;

отримання практично чистих фільтратів, що виключає втрати цінних продуктів, що містяться в твердій фазі;

висока термостійкість керамічних елементів, що фільтрують, що дозволяє застосовувати їх для обробки суспензій з високою температурою.

Водночас цей напрямок має суттєві недоліки [15]:

необхідно здійснювати регенерацію керамічних елементів, що фільтрують. Комбінована ультразвукова та кислотна очистка повинна проводитись періодично, 1-2 рази на добу протягом 30-60 хв., залежно від ступеня заростання капілярів різними відкладеннями;

розвантаження осаду провадиться за допомогою керамічних ножів, встановлених з високою точністю. Відстань між ножем та поверхнею кераміки становить 0,5-0,8 мм. На поверхні елемента, що фільтрує, залишається тонкий шар твердих частинок (підкладка);

компоненти концентрату можуть шкідливо впливати на керамічні фільтруючі елементи з точки зору заростання капілярів відкладеннями солей;

потрібна додаткова технологічна операція в межах кожного обороту валу - зворотне промивання. Після проходження ножів у керамічні фільтруючі елементи зсередини має подаватися невелика порція води під тиском 0,07-0,12 МПа протягом 2-5 сек. для видалення осаду, що залишився, і очищення капілярів.

Слід зазначити, що фільтри іноземного виробництва, значно дорожчі за капітальними та експлуатаційними витратами. Найбільшу вартість має фільтрувальне обладнання з інтенсифікацією процесів, що здійснюються на ньому. Техніко-економічне порівняння зарубіжних фільтрів наведено у табл. 3.

Таблиця 3

Техніко-економічне порівняння закордонних фільтрів

Продукт: залізрудний концентрат	Вакуумний дисковий фільтр	Bokela дисковий вакуум фільтр	Bokela фільтр під тиском до 6 бар	Автоматичний прес-фільтр	Керамічний фільтр
Вологість після фільтрації, %	9,5	9	7,5	7,5	9
Питома продуктивність, т/(год*м ²)	1,75	2,5	7,5	2,5	1,75
Загальна поверхня фільтрів на ділянці	480	360	180	360	480
Вартість одного фільтра, US\$	250.000	400.000	1.000.000	2.250.000	800.000
Площа одного, м ²	60-160	до 176	до 168		
Діаметр дисків, м	2,5	4,1; 5,6	3,2		

У ДВФ імпортного виробництва мають місце тенденції:

збільшення площі фільтрування (до 300 м²), переважно рахунок збільшення діаметр дисків;

модернізація вже встановлених ДВФ за збереження зовнішньої інфраструктури;

зниження вторинного зволоження осаду;

перехід від осередкової структури валу до трубчастої конструкції, що дозволяє спростити конструкцію і зменшити масу частин, що обертаються.

Основні показники, за якими ДВФ поступаються іншим типам фільтрувальних апаратів, - вологість осаду та високі питомі енергетичні витрати. Ці фактори зумовили тенденцію впровадження нових конструкцій фільтрів імпортного виробництва, навіть незважаючи на більш високу вартість.

У даний час на залізрудних збагачувальних фабриках працюють дискові вакуум-фільтри (ДВФ) з поверхнею від 60 до 160 м² типу ДК, ДШ (з подачею перегрітої пари в зону сушіння) та ДТЗ (до 250 м²), виробництва заводів «Прогрес», м. Бердичів.

Дані табл. 1-4 показують, що використання механічних фільтрів, незалежно від їх досконалості та вартості, не вирішують загального завдання зневоднення залізрудних концентратів до вологості менше 2% з метою використання в подальших металургійних процесах (агломерація, отримання окатишів, плавка тощо). Значні зусилля розробників нових конструкцій фільтрів (прес-фільтрів, фільтрів

під тиском, фільтрів з керамікою тощо) призвели до значного зростання вартості фільтрувального обладнання та підвищення інтенсивності процесу фільтрації, зниження питомих витрат на фільтрацію. Основний підсумковий цільовий результат виявився вкрай незначним - у кращому разі зниження кінцевої вологості осаду залізорудних концентратів із 9,5 до 7,5%. Такі концентрати не можна використувати у наступних металургійних процесах, а також більшу частину року вони не дозволені до транспортування морськими суднами.

Таблиця 4

Технічні показники дискових вакуум фільтрів під час реконструкції

Показник по рокам	2003	2004	Після 2005
Питома продуктивність, т/(м ² *ч)	0,524	0,678	0,723
Вологість концентрату на виході, %	9,23	9,43	9,57
Питома витрата фільтротканини, м ² /(1000 т концентрату)	5,4	5,0	4,5
Питома витрата по переділу, кВт год/тону концентрату	7,28	5,86	5,33

Постановка задачі. Зниження вологості залізорудних концентратів до рівня менше 2% на основі розгляду економічних та технічних показників спільного використання процесів механічного та термічного (термічного контактного сушіння) видалення вологи.

Викладення матеріалу та результати. У результатах розрахунків, показаних у табл. 5, враховано показники механічного зневоднення відповідно до табл. 3-4, а також показники установки термічного сушіння з використанням вертикальної трубної сушарки SRT-1000, з генератором гарячих газів, що працює на піловугільному паливі (ПВТ), природному газі та мазуті.

Питомі вартості механічного зневоднення (0,224 US\$/тонна вологого. концентрату) та термічного сушіння (0,256 US\$/тонна вологого. концентрату) близькі. Це дозволяє розраховувати зневоднення залізорудних концентратів як процес.

Особливістю механічного зневоднення є обмеження кінцевої вологості концентрату – на рівні близько 7,5 %. Зі зниженням кінцевої вологості або тонини частинок у залізорудному концентраті інтенсивність зневоднення різко знижується.

Таблиця 5

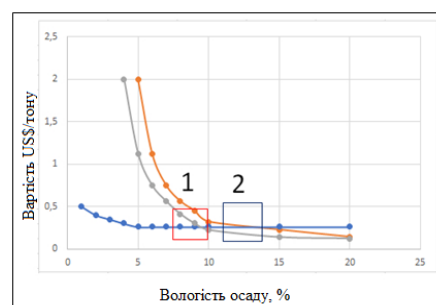
Питомі експлуатаційні витрати на процеси зневоднення

Механічне зневоднення	Апарат	ДВФ Прогрес	ДВФ імпорт	ДВФ BOKELA	ДДФ BOKELA +6 бар	Фільтр Пресс	Керамічний фільтр
Питома вартість одержання вологого концентрату	US\$/тонна вол. конц.	0,224	0,205	0,208	0,216	0,234	
Термічне зневоднення	Апарат/паливо	SRT-1000 вугілля	SRT-1000 газ	SRT-1000 мазут			
Питома вартість термічного сушіння на тону вологого концентрату.	US\$/тонна вол. конц.	0,256	0,270	0,306			

Рис. 1. Залежність вартості зневоднення від кінцевої вологості концентрату та тонини помелу

На рис. 1 на якісному рівні показано основні тенденції зміни вартості процесів зневоднення (фільтрація та термічна сушка) від кінцевої вологості залізорудного концентрату. Термічна сушіння (синя крива) йде з однаковою інтенсивністю у широкому діапазоні від 30% до 1-3%. Інтенсивність фільтрації змінюється залежно як від кінцевої вологості концентрату, яку потрібно отримати, так і від тонини помелу (сіра крива - концентрат 72 мкм, коричнева крива – концентрат 32 мкм). Характерним є експонентне зростання вартості фільтрації при досягненні певного рівня вологості осаду. Зменшення тонини помелу концентратів призводить до зміщення зони початку зростання вартості фільтрації в область більшої вологості, наприклад, в зону 12-15%, див. зону 2. Причини цього явища описані вище.

У практиці зневоднення концентратів, за різкого зростання вартості процесу фільтрації (див. зони 1 і 2 на рис. 1), економічно доцільно переходити від фільтрації до термічної сушіння.



Розрахунки показують, що при переході до підвищеної тонини помелу, спроби забезпечити колишній звичний рівень вологості, наприклад, 7,5-9,5% з використанням дорогих фільтрів підвищеної інтенсивності, не є економічно обґрунтованим. Питома вартість зневоднення (фільтрації та термічного сушіння) у зоні переходу приблизно однакові – 0,24 та 0,256 US\$/тону вологого концентрату. Перехід до термічної сушіння може виконуватися, наприклад, при вологості 7,5-9,5% концентратів помелу 72 мкм, і при вологості 10-13% концентратів помелу до 32 мкм. Отж, механічне зневоднення (фільтрація) і термічна сушка гармонійно доповнюють один одного. У випадках, коли зменшення частинок концентрату веде до підвищення вологості кеків після фільтрації, видалення залишкової вологи переймає на себе термічна сушка.

Вертикальна трубна сушарка в даний час є апаратом, що найбільш пристосований для сушіння залізрудних концентратів. Вертикальні трубні сушіння працюють із високими до 900-1000°C температурами гарячих газів на вході, відсутність рухливих частин забезпечує герметизацію корпусу. Час перебування концентрату в сушильному апараті 2-3 сек. Поряд із концентратами можливе сушіння шламів з підвищеною вологістю, а також шматкових матеріалів з частинками до 25 мм.

Особливістю термічного сушіння вертикальних трубних сушарках є повна незалежність процесу від зменшення тонини частинок концентрату. Зі зменшенням розмірів частинок збільшується площа їхньої сумарної поверхні, що взаємодіє з гарячими газами, що служить інтенсифікації процесу випаровування вологи. Питома напруга сушильного об'єму по випареній волозі (кг/м³) дозволяє порівняти інтенсивність процесів з використанням сушарок різних конструкцій. Для вертикальних трубних сушарок цей показник дорівнює 300-900 кг/м³ для сушильних барабанів близько 70 кг/м³ [16].

Європейські трубні сушарки конструктивно відрізняються за ефективністю та надійністю. Ремонт сушарки не потрібний 5-10 років.

В останні десятиліття європейські трубні сушарки використовувалися для сушіння доменного шлаку, що підсушується перед помелом у технології одержання шлакоцементів. Доменний шлак містить високо абразивні частинки розміром 0,5-3 мм.

Внутрішня поверхня труби сушарки покрита кам'яним литтям товщиною 25 мм, посадженим на шар пінобетону легкий товщиною 30-50 мм. Кам'яне лиття приблизно в 10 разів стійкіше проти абразивного зношування, ніж сталь. Це дозволяє вертикальній трубній сушарці працювати без заміни протиабразивного захисту багатьох років. Захист вертикальної трубної сушарки від абразивного зношування наведено на рис. 2.

Рис. 2. Захист вертикальної трубної сушарки від абразивного зношування

Малоінерційні генератори гарячих газів, що працюють на вугільному пилу, рідкому або газоподібному паливі, є сучасними повністю автоматизованими апаратами.

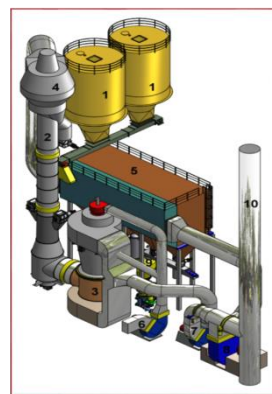
Діапазон регулювання 1:5. Зола, що залишається в газах, що відходять, після спалювання вугілля вловлюється системою газоочищення технологічної лінії.

Мінерали, що входять до складу золи, позитивно впливають на процеси агломерації, обкатування та плавлення концентратів металів [17].

Рис. 3. Установка труби-сушарки SRT1000: 1 - бункер сировинного матеріалу; 2 - вертикальна сушарка SRT; 3 - генератор гарячих газів; 4 – розвантажувальний сепаратор; 5 - рукавний фільтр; 6 - вентилятор повітря на горіння; 7 - вентилятор повітря на змішування; 8 - основний димосос; 9 - подача вугільного пилу до пальника; 10 – димова труба; габарити L×B×H = 34×14×30 м

Сухе очищення газів, що відходять, виконується в рукавних фільтрах. Це особливо важливо для уловлювання абразивних частинок залізрудного концентрату. У тих умовах, коли сталеві вузли батарейних мультициклонів зношуються за 4-6 місяців, тканина фільтраційних рукавів витримує кілька років роботи при правильній експлуатації. Пояснюється це тим, що на поверхні фільтраційної тканини утворюється шар найдрібніших частинок концентрату, який не видаляється при імпульсному очищенні та оберігає тканину [16].

Висновки та напрямки подальших досліджень. 1. Механічне зневоднення залізрудних концентратів до вологості 7,5-9,5% і термічне сушіння концентратів до кінцевої вологості 1-2%



є взаємно доповнюючими процесами, які гармонійно доповнюють один одного. 2. При зменшенні тонини помелу збільшується кінцева вологість осаду на фільтрах і частина процесу зневоднення повинна передаватися термічному сушінню. 3. Розрахункові питомі експлуатаційні витрати на механічне зневоднення та термічне сушіння становлять 0,224-0,256 US\$/тону вологого концентрату. Це дозволяє розраховувати зневоднення суспензій залізрудного концентрату з 50% вмістом твердого до товарного концентрату з вологістю 1-2% як єдиний процес. 4. Незважаючи на значущість процесів фільтрації та сушіння, ми вважаємо, що основні перспективні технології збагачення залізних руд пов'язані з процесами прямого термічного відновлення руд та концентратів до чавуну, минаючи виробництво високоякісних концентратів 68-70% вмісту заліза, або залізрудних окатишів. Це дозволить на тих самих виробничих площах підвищити капіталізацію збагачувальних фабрик України у кілька разів. Цим шляхом йдуть основні дослідження в європейській металургії [18].

Список літератури

1. Журавлева Е.С. Научное и экспериментальное обоснование электрохимических методов повышения технологических показателей переработки черновых магнетитовых концентратов. Диссертация. МИСИС, 2013.
2. Гзогян Т. Н. Теоретические и экспериментальные исследования получения высококачественных концентратов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2010. - №4. - С. 389–393.
3. Гзогян Т.Н., Губин С.Л. Влияние физико-химических факторов на флотационную доводку магнетитовых концентратов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2008. - № 1. - С. 118-125.
4. Гзогян Т.Н., Губин С.Л., Гзогян С.Р., Мельникова Н.Д. О формах потерь железа с отходами обогащения // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. - 2005. - № 6. - С. 100-105.
5. Садыков В.Х. Совершенствование процесса фильтрования железорудного концентрата на основе выбора рациональной структуры и параметров дисковых трубчатых вакуум-фильтров. Диссертация, Магнитогорский ТУ, 2013.
6. Козырь А.В., Кутлубаев И.М., Садыков В.Х. Опыт разработки и эксплуатации трубчатых дисковых вакуум-фильтров //Топорковские чтения. Международная научная конференция. Рудный: Рудн. индустриальный ин-т. -2008. - Выпуск VIII. Том I. - С. 178-181.
7. Campbell Q.P. The influence of coal quality on the de watering of fine coat by vacuum filtration //14 International Coal Preparation Congress and Exhibition, Sandton, 11-15 March. - 2002, Johannesburg: S. Afr. Inst.Mining and Met., 2002. -P. 199-202.
8. Жужиков В. А. Фильтрование. -М.: Химия, 1980. - 398 с.
9. Пухнатый А.Е. Исследование закономерностей и интенсификация процесса обезвоживания пульпы марганцевых и железорудных концентратов. - М.: ИПКОН РАН, 1993. - 17с.
10. Жужиков В.А. Фильтрование. Теория и практика разделения суспензий. - 4-е изд., перераб. и доп. - М.: Химия, 1980. - 440 .
11. Состояние и перспективы применения дисковых фильтров с керамическими фильтрующими элементами в технологии обезвоживания обогатительных производств /В.В.Бондарь, Р.К.Дохов, В.Т. Ефремов и др. // Материалы VI Конгресса обогатителей стран СНГ, Москва, 19-21 марта 2007г. Т.2. - М.: Альтекс, 2007. -С. 58-61.
12. Красный Б.Л. Новые возможности фильтровальных агрегатов с керамическими фильтрующими элементами// Цветные металлы. - 2003.-№8-9.-С.68-71.
13. Красный Б.Л., Бондарь В.В., Буртовой А.Г. Опыт промышленного применения дисковых вакуум-фильтров нового поколения// Черная металлургия: Бюл. НТ и ЭИ /Ин-т “Черметинформация”2004.-№8.- С.22-25.
14. Разработка и освоение производства дисковых фильтров нового поколения с использованием керамических фильтрующих элементов для обезвоживания продуктов переработки горнорудного сырья //Материалы IV Конгресса обогатителей стран СНГ, Москва, 19-21 марта 2003г. Т.2. - М.: Альтекс, 2003. -С. 161-163.
15. Применение современной фильтрующей керамики — эффективный способ энергосбережения /Б.Л. Красный, В.В. Бондарь, А.Г. Буртовой, П.Н. Рубцов // Металлург. - 2004. - № 5. - С.26-29.
16. <http://www.ftt-ing.de>. Брошюра. Современная сушка промпродуктов.
17. <http://www.ftt-ing.de>. Брошюра. Генераторы горячих газов.
18. <http://www.ftt-ing.de>. Главная ошибка при обогащении железной руды. Главная ошибка при получении металла

С.М. БОЙКО, канд. техн. наук, Національний університет «Запорізька політехніка»

І.В. КАСАТКІНА, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

О.В. ДАНИЛІН, канд. техн. наук, доц., Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АСПЕКТИ РЕКОНФІГУРАЦІЇ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПРИ ВПРОВАДЖЕННІ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В УМОВАХ РОЗПОДІЛЬЧИХ МЕРЕЖ ПІДПРИЄМСТВ

Мета. Метою даної роботи є дослідження варіантів реконфігурації систем електропостачання при впровадженні джерел розосередженої генерації в умовах розподільчих мереж підприємств.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано сучасні аспекти побудови систем електропостачання підприємств та визначено особливості під'єднання джерел розосередженої генерації електричної енергії до діючої електричної мережі.

Тож, одним із перспективних напрямів у реалізації наукових завдань щодо реконфігурації існуючих систем електропостачання підприємств, на погляд авторів та когорти науковців, є напрям на їх декарбонізацію за рахунок впровадження джерел розосередженої генерації з подальшою інтелектуалізацією. Такий підхід має особливості щодо його практичної реалізації. Між тим, враховуючи світовий досвід інтелектуалізації та, перш за все, основні положення концепції інтелектуальних мереж, є можливість вирішити завдання оптимізації режимів функціонування генеруючих установок на базі відновлювальних джерел енергії та раціональне використання згенерованої ними електричної енергії шляхом її накопичення за рахунок водневих технологій

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених наукових задач використано аналітичні методи – для дослідження можливих варіантів реконфігурації енергетичних мереж підприємств шляхом впровадження джерел розосередженої генерації.

Наукова новизна. Вперше запропоновано варіант реконфігурації діючої системи електропостачання підприємства шляхом впровадження до її складу джерел розосередженої генерації.

Практична значимість. За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок про те що, запропонований варіант реконфігурації діючих електричних мереж підприємств надасть можливість покращити енергетичні показники мережі підприємства та допоможе у адаптації до стратегії активного споживання електричної енергії.

Результати. Реконфігурація систем електропостачання підприємств є необхідним кроком у подолання викликів сьогодення щодо надійності та якості електропостачання. Між тим, запропонований варіант реконфігурації діючих електричних мереж підприємств виконаний в аспекті декарбонізації та подальшої інтелектуалізації цих мереж, що в майбутньому надасть їм можливість адаптації до мереж побудованих за концепцією Smart Grid.

Ключові слова: система електропостачання, розосереджена генерація, розподільчі мережі, воднева енергетика, паливні комірки, відновлювані джерела енергії.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-169-174

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Як відомо, розвиток та активне впровадження відновлювальних джерел енергії потребує відповідної перебудови мережевої інфраструктури та впровадження сучасних підходів до автоматизації систем управління.

Одним із прикладів такої трансформації у світовій практиці є концепція Smart Grid для автоматизації управління потоками енергії, режимного регулювання перетоками і споживанням електроенергії з планомірним використанням маневрених потужностей [1].

Між тим, слід зазначити, що стохастичність енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії, зумовлює доцільність комплектації цих генеруючих систем акумуляторами, які можуть використовуватися для накопичення згенерованої електричної енергії з метою стабілізації рівнів згенерованої електричної енергії. Одним із пріоритетних напрямків акумуляування електричної енергії в сучасних системах генерації на сьогоднішній день є воднева енергетика, а саме паливні комірки.

Незважаючи на вагомі наукові та практичні досягнення за цим напрямом, ще залишається ряд наукових завдань, які стосуються управління генеруючими установками на базі відновлювальних джерел енергії та їх інтеграції до систем електропостачання [2].

Тож, одним із перспективних напрямів у реалізації наукових завдань щодо реконфігурації існуючих систем електропостачання підприємств, на погляд авторів та когорти науковців, є напрям на їх декарбонізацію за рахунок впровадження джерел розосередженої генерації з подальшою інтелектуалізацією. Такий підхід має особливості щодо його практичної реалізації. Між тим,

враховуючи світовий досвід інтелектуалізації та, перш за все, основні положення концепції інтелектуальних мереж, є можливість вирішити завдання оптимізації режимів функціонування генеруючих установок на базі відновлювальних джерел енергії та раціональне використання згенерованої ними електричної енергії шляхом її накопичення за рахунок водневих технологій [2].

Аналіз досліджень і публікацій. Сучасний розвиток енергетичної галузі в контексті декарбонізації пропагує насамперед збільшення частки джерел розосередженої генерації на базі відновлюваних джерел енергії у складі діючих енергосистем.

Між тим, реалізація такої реконфігурації потребує певної модернізації досліджуваної енергосистеми. Для підвищення техніко-економічної ефективності сумісної експлуатації джерел розосередженої генерації і розподільних електричних мереж необхідно розв'язати ряд задач, що дозволять підвищити стабільність сумарної генерації в розподільчих мережах при впровадженні до їх складу відновлюваних джерел електричної енергії [1-5].

Як відзначається у працях [3-5] на даному етапі впровадження, концепція Smart Grid розглядається в тому числі в контексті декарбонізації енергетичної галузі. Міжнародне енергетичне агентство розглядає водень як один із основних складових для реалізації цієї мети [5].

Аналіз зарубіжних і вітчизняних публікацій вказують на те, що залишається до кінця не вирішеним питання забезпечення накопичення згенерованої електричної енергії, особливо при широкому впровадженні відновлювальних джерел електричної енергії, що може бути вирішено розвитком систем накопичення електричної енергії з використанням водневих технологій [6-14].

Постановка завдання. Аналіз можливих варіантів впровадження джерел розосередженої генерації в системи електропостачання підприємств.

Викладення матеріалу та результати. На сьогоднішній день архітектура системи електропостачання промислового підприємства виглядає наступним чином (рис 1).

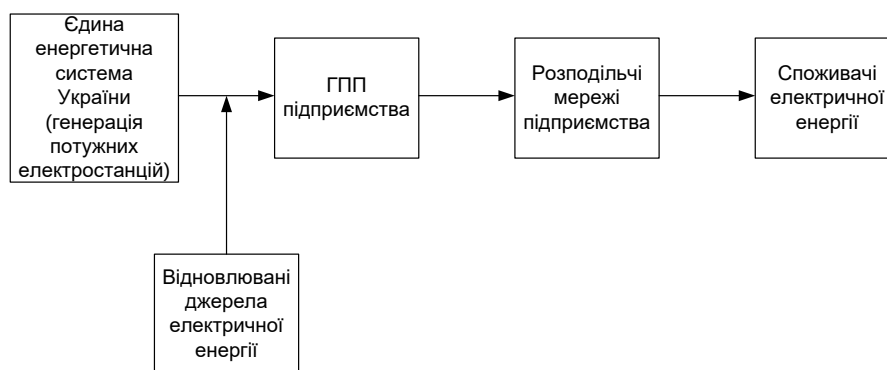


Рис. 1 Архітектура системи електропостачання промислового підприємства

До складу сучасних систем електропостачання підприємств входять такі структурні елементи, як єдина енергетична система України, що є основним і в більшості випадків, на сьогоднішній день, одним джерелом енергоресурсів. Відновлювані джерела електричної енергії приймає участь в електропостачанні підприємств як правило у складі єдиної енергетичної системи. Зовнішні джерела електричної енергії під'єднуються до електричної мережі підприємства через головну понижувальну підстанцію (ГПП), яка в свою чергу розподіляє електричну енергію між підстанціями розподільчої електричної мережі підприємства. Таким чином електрична енергія надходить до споживачів електричної енергії на підприємстві.

Між тим, такий підхід до побудови електропостачання підприємств є застарілим, та має ряд недоліків. Такий стан справ потребує реконфігурації існуючих архітектур систем електропостачання підприємств.

Перш ніж приступити до аналізу можливих варіантів реконфігурації систем електропостачання підприємств, та виокремлення серед них найбільш перспективних, слід зауважити, що сучасні технології в області енергетики мають потужний потенціал розвитку як в Україні так і у світі.

Інтелектуалізація та диджиталізація енергетичної галузі проходить у світовому масштабі, що проходить в аспекті декарбонізації енергетичного сектора світової економіки. Ці напрямки розвитку енергетичного сектору є одними з пріоритетних у світі, та є складовими сучасних концепцій розвитку розвинених країн світу.

Слід звернути увагу на розвиток відновлюваних джерел електричної енергії в аспекті проблематики їх функціонування у складі існуючих електричних мереж. Насамперед, досі не вирішеною залишається науково-практична задача стабілізації електропостачання в системах з під'єднаними енергетичними установками на базі відновлювальних джерел електричної енергії. Зважаючи на стохастичний характер генерування електричної енергії є необхідним в таких енергетичних вузлах встановлювати маневрові стабілізуючі електрогенеруючі потужності для вирівнювання стохастичного графіку електропостачання. До таких електрогенеруючих потужностей до недавнього часу відносилися вже наявні теплоелектростанції та атомні електростанції. Але зважаючи на критичний термін експлуатації існуючих потужностей теплоелектростанцій України слід вже зараз шукати їм альтернативу [4].

Між тим, враховуючи факт сучасних екстремальних режимів роботи енергетичної системи України, актуальним є впровадження додаткових електрогенеруючих потужностей.

Слід зауважити, що ре конфігурація існуючих систем електропостачання підприємств має певні особливості у порівнянні з побудовою нових систем електропостачання. При ре конфігурація існуючих систем електропостачання підприємств має бути врахована вже існуюча електрична мережа підприємства, особливості розташування енергетичного обладнання, та можливих місць встановлення нового електрогенеруючого обладнання та його під'єднання до розподільчої мережі підприємства.

Серед варіантів реконфігурації існуючих електричних мереж підприємств слід виокремити впровадження автономних енергетичних установок, резервних систем електропостачання та розосереджених джерел електричної енергії, що розташовані на території підприємства, та під'єднані до їх розподільчої мережі.

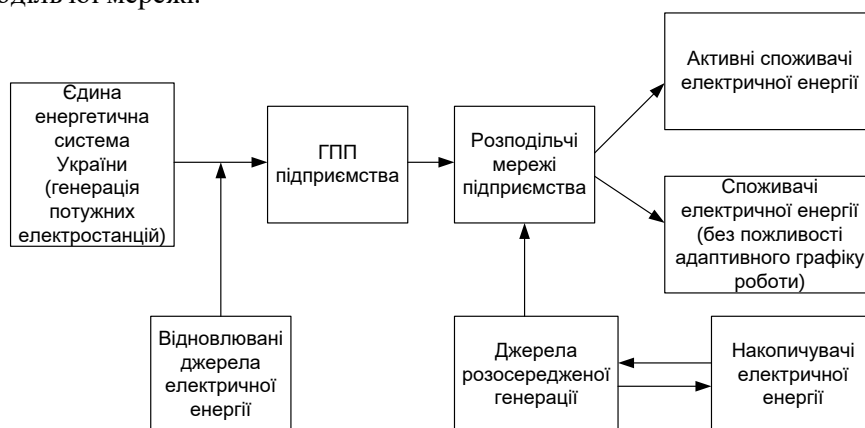


Рис. 2. Архітектура системи електропостачання промислового підприємства при реконфігурації при впровадженні джерел розосередженої генерації

Таким чином, авторами пропонується варіант під'єднання джерел розосередженої генерації електричної енергії до розподільчої мережі підприємства наступним чином (рис 2).

Слід зауважити, що джерела розосередженої генерації можуть бути виконані на базі будь-яких типів електрогенеруючих установок. Між тим, враховуючи той факт, що у статті розглядається ре конфігурація розподільчих мереж підприємств в аспекті декарбонізації, розглядаються електрогенеруючі установки на базі відновлюваних джерел енергії [7].

Свою роль у вирівнюванні графіку електроспоживання у запропонованій схемі, мають відіграти і споживачі електричної енергії. Споживачі електричної енергії, які мають можливість адаптивно змінювати графік своєї роботи можуть виконувати функцію споживачів-регуляторів.

Роль накопичувачів електричної енергії у випадку запропонованого варіанту реконфігурації можуть виконувати як електро-хімічні накопичувачі так і інші сучасні накопичувачі. Одним із перспективних варіантів накопичення електричної енергії є водневі накопичувачі, а саме паливні комірки [5].

Як відомо, поширення водневих технологій накопичення електричної енергії дає підприємствам ще один стимул для декарбонізації існуючих систем електропостачання. Використання водню як проміжного енергоносія для забезпечення збалансованого використання неконтрольованих відновлюваних джерел енергії а саме вітрової та сонячної електроенергії може орієнтуватися на відповідні обсяги генерації. Враховуючи мінливий характер їхньої генерації, на регулювання

енергобалансу вони можуть спрямувати частину своєї згенерованої потужності.

Слід зазначити якісні зміни що відбулися за останній час та стали поштовхом для розвитку водневої енергетики. Таким чином, акцент у цьому питанні змістився з технологічних і енергетичних аспектів на екологічні й економічні складові проблеми створення міжгалузевої інфраструктури, що забезпечує широкомасштабне використання водню. Ці процеси, на сьогоднішній день, притаманні і Україні, де роботи з водневої енергетики віднесено до рангу пріоритетних цільових комплексних програм наукових досліджень, які охоплюють широке коло питань, вирішення яких у комплексі забезпечує перехід на якісно новий рівень технологій виробництва, розподілу і споживання водню в енергетиці, промисловості та інших сферах економіки.

Сучасні аспекти зберігання електричної енергії за допомогою водню розглядається як частина наступних концепцій [7]:

Power-to-Power із зберіганням водню як в газоподібному стані, в тому числі в підземних газосховищах, так і в зв'язаному стані, в тому числі в гідридах металів;

Power-to-Gas, що включає додавання водню в існуючу інфраструктуру для природного газу, а також створення синтетичного метану з водню.

На сьогоднішній день концепція Power-to-Gas розглядається як найпростіший і швидкий спосіб створення глобального ринку водню. Найдешевшим способом транспортування водню є транспортування по трубопроводу в суміші з природним газом, що зменшить значні обсяги капітальних витрат.

Перевагами цього рішення є відносна дешевизна технології, використанні існуючої інфраструктури природного газу, при цьому безпеку транспортування водню знаходиться на тому ж рівні, що і природного газу.

У той же час, такий підхід не позбавлений ряду недоліків, з посеред інших, в першу чергу слід вказати на необхідність поділу газів, що призводить до витрат 20 ... 30% водню на поділ (+ 25..50% до вартості), необхідність додаткового очищення на фоні існуючих обмежень на теплотворну здатність газу.

Між тим, на сьогоднішній день на теренах провідних країн світу та Європейського союзу йде робота по створенню пілотних проектів в рамках цієї концепції.

Зважаючи на високий коефіцієнт корисної дії енергоустановок на базі паливних елементів, вони розглядаються в якості перспективних джерел енергії в кіловатному класі потужності. Такі енергоустановки потребують використання чистого водню вище 99.9%. Комплекс електролізер - паливний елемент характеризується потужним коефіцієнтом рекуперації електроенергії, який може становити більше 40%, що цілком прийнятно для енергоустановок на основі відновлюваних джерел електричної енергії. При розробці таких систем акумулювання електроенергії основними невирішеними питаннями залишаються аспекти пов'язані зі створенням енергоефективних систем очищення і зберігання водню, інтегрованих з паливними елементами [6].

Між тим, слід зауважити, що серед розроблюваних нових технологій і пристроїв очищення і зберігання водню для автономної енергетики економічно прийнятними і безпечними можуть стати пристрої та системи, засновані на використанні оборотних металогідридів - інтерметалічних сполук, здатних вибірково і оборотно поглинати водень. При цьому основна маса водню в системі знаходиться в зв'язаному твердофазном стані, що забезпечує підвищену безпеку при експлуатації. Вибірковість поглинання водню, можливість гнучко контролювати термодинамічні властивості інтерметалічних сплавів за допомогою варіації їх складу дозволяє використовувати їх не тільки для зберігання, але і для високоефективної очистки водню, створення термохімічних теплових насосів і водневих компресорів [7].

Таким чином, підвищення ефективності роботи водневих систем акумулювання енергії пов'язано зі зниженням енергетичних витрат при отриманні, очищенні та зберіганні водню. Сучасні системи зрідження водню вимагають витрат до 30-40% загальної хімічної енергії зберігається водню (по нижчій теплоті згорання), і системи компримування водню до 350- 750 бар вимагають до 20%, при цьому експлуатація таких систем в енергоустановках автономної і розподіленої енергетики ускладнена. До основних перепон можна віднести високі витрати на криогенне устаткування або трубопровідну арматуру високого тиску, забезпечення безпеки витрат на навчання і підготовку обслуговуючого персоналу.

Між тим, на сьогоднішній день світова потужність систем акумулювання енергії оцінюється в 3% від загальної генерації електроенергії, причому на 95% ці потужності забезпечуються за

рахунок єдиної технології гідроакумуючих станцій, що залишає актуальним на сьогодні питання буферних систем акумулювання електричної енергії в умовах впровадження джерел розосередженої генерації електричної енергії [8].

Слід зазначити, що авторами пропонуються до подальшої практичної реалізації в умовах промислових підприємств енерготехнологічні комплекси. При побудові систем з розосередженою генерацією вони повинні мати у своєму складі первинні приймачі енергії на базі відновлюваних джерел електричної енергії, дистиллятора з геліоколектором, електролізер, системи зберігання стиснених газів, паливного елемента. Також такі енерготехнологічні комплекси мають у своєму складі систему управління і відповідні вимірювальні датчики для збору й обробки даних щодо параметрів технологічних процесів, що реалізуються під час функціонування комплексу.

В основу енерготехнологічного комплексу покладено здатність споживання і переробки поновлюваної енергії. Нерегулярний потік первинної енергії, одержуваної від відновлюваних джерел електричної енергії, використовується в електролізері. Важливою характеристикою електролізера високого тиску є те, що в якості електроживлення може бути використана некондиційна електрична енергія. Очевидно, що такий підхід є найкращим для створення автономних електростанцій невеликої та середньої потужності. Розроблений енерготехнологічний комплекс може розглядатися як автономна станція отримання водню. У той же час отриманий водень може використовуватися для підтримання інших технологічних процесів чи пікових генерацій електричної енергії.

Дистиллятор для опріснення технічної води і води з високим вмістом солі та інших домішок з підземних джерел та ґрунтових вод є одним із споживачів енергії та складовим елементом енерготехнологічного комплексу. Дистилуючий модуль застосовується як складовий елемент енерготехнологічного комплексу, а також як окремий об'єкт із можливим енергопостачанням від традиційних джерел енергії. Під час теплової перегонки відбувається повна демінералізація і стерилізація води. Отримана таким чином вода може бути використана для технічного водопостачання, дистильована вода частково подається в електролізер [9].

На підставі викладеної інформації можна зазначити, що буферна воднева система, яка складається з електролізера і системи зберігання водню, органічно вписується в енерготехнологічну схему системи розосередженої генерації на базі відновлюваних джерел електричної енергії, забезпечуючи вирішення проблеми подачі енергії споживачеві у період відсутності генерації електричної енергії. Перспективними вважаються енерготехнологічні схеми автономних водневих станцій на базі використання відновлюваних джерел енергії [10].

Водневе акумулювання енергії у вигляді ланцюжка, що зв'язує первинний джерело енергії, виробництво водню, систему зберігання водню і водневу енергоустановку дозволяє здійснювати довгострокове акумулювання енергії без втрат, доповнюючи в мегаватного класу потужності гідроакумуючі системи і конкуруючи в області малих потужностей з акумуляторними системами [11].

Потенційна перевага електролізу полягає в тому, що його досить легко організувати в умовах маломасштабного виробництва, наблизивши його до споживачів. Це дозволяє відмовитися від споруди дорогих систем розподілу водню. Електролізери забезпечують виробництво особливо чистого водню. До недоліків електролізу відносяться низька сумарна енергетична ефективність процесу і відносно високі капітальні витрати. В даний час застосовується і розробляються нові типи електролізерів, що дозволяють збільшити ефективність і комерційну привабливість процесу електролізу (твердополімерним електролізери, високотемпературні і інші) [12].

Найбільш широко використовувана технологія електролізу заснована на застосуванні лужних електролітів. Вдосконалені лужні електролізери можуть бути використані для великомасштабного виробництва водню з води з відносно високою сумарною ефективністю перетворення первинної енергії, рівній 28-36% з урахуванням коефіцієнту корисної дії електростанції на рівні 35-40% [13].

Тим часом, перспективи електролізу пов'язані із застосуванням твердо-полімерних електролізерів з платиновими каталізаторами, які забезпечують більш високий вихід водню. Останнім часом ведуться розробки електролізерів з твердо-полімерних електролізерів, що не містять дорогі металів, хоча, незважаючи на деякі успіхи в рішенні цієї задачі для спеціальних електролізерів з малим ресурсом роботи, прийнятного рішення для промислових електролізерів поки не знайдено. Твердо-полімерних електролізери характеризуються значно більшими питомими

капітальними витратами, ніж лужні, але ці витрати зменшаться при переході до великих обсягів виробництва [14].

Висновки та напрямок подальших досліджень. Реконфігурація систем електропостачання підприємств є необхідним кроком у подолання викликів сьогодення щодо надійності та якості електропостачання. Між тим, запропонований варіант реконфігурації діючих електричних мереж підприємств виконаний в аспекті декарбонізації та подальшої інтелектуалізації цих мереж, що в майбутньому надасть їм можливість адаптації до мереж побудованих за концепцією Smart Grid.

Список літератури

1. Енергетичні ресурси та потоки / під заг. ред. **А.К. Шидловського**. – Київ: Українські енциклопедичні знання, 2003. – 472 с.
2. World Energy Outlook –2021, OECD/IEA, Paris.
3. **Бойко С.М.** Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств. Монографія, під редакцією доктора техн. наук, професора **О.М. Сінчука**. – Кременчук, 2020. – 263с.
4. **Stognii B., Kyrylenko O., Prakhovnyk A., Denysiuk S.** The evolution of intelligent electrical networks and their prospects in Ukraine // Tekhnichna elektrodynamika. – 2012. – № 5. – pp. 52–67.
5. **Buchholz B., Styczynski Z.** Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer – 2014. – 396 p.
6. **Ogden, Joan.** 2004. “Transition Strategies for Hydrogen and Fuel Cells.” University of California, Davis
7. **Philibert, Cédric.** 2017. “Commentary: Producing Industrial Hydrogen from Renewable Energy.” IEA news release, April 18.
8. **S. Timmerberg, M. Kaltschmitt, and M. Finkbeiner,** “Hydrogen and hydrogen-derived fuels through methane decomposition of natural gas – GHG emissions and costs,” Energy Convers. Manag. X, vol. 7, no. May, p. 100043, 2020.
9. ESMAP. 2020. Green Hydrogen in Developing Countries. Washington, DC: World Bank.
10. Досвід розбудови розумних енергетичних мереж на міжнародному рівні : монографія / **І. А. Вакуленко, С. І. Колосок, О. В. Кубатко та ін.** ; за ред. **С. І. Колосок**. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 109 с.
11. **Русанов А.В., Соловей В.В., Зіпунніков М.М., Шевченко А.А.** Термогазодинаміка фізико-енергетичних процесів в альтернативних технологіях в 3-х т.: т. 1. Термогазодинаміка фізико-енергетичних процесів в водневих технологіях / під загальною редакцією чл.-кор. НАНУ А.В. Русанова; НАН України, Інститут проблем машинобудування. – Харків: Видавництво та друкарня «Технологічний Центр», 2018. – 336 с.
12. **Malysenko S.P., Borzenko V.I., Dunikov D.O., Nazarova O.V.** Metal hydride technologies of hydrogen energy storage for independent power supply systems constructed on the basis of renewable sources of energy // Thermal Engineering (English translation of Teploenergetika). 2012. T. 59. № 6. — С. 468-478.
13. **Emonts B., Schiebahn S., Göner K., Lindenberg D., Markewitz P., Merten F., Stolten D.** Reenergizing energy supply: Electrolytically-produced hydrogen as a flexible energy storage medium and fuel for road transport // Journal of Power Sources. 2017. T. 342. — С. 320-326.
14. **Felgenhauer M., Hamacher T.** State-of-the-art of commercial electrolyzers and on-site hydrogen generation for logistic vehicles in South Carolina // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. T. 40. № 5. — С. 2084-2090.

УДК 624.131:624.15

Р.О. ТИМЧЕНКО, д-р техн., наук., проф., **Д.А. КРІШКО**, канд. техн., наук, ст. викладач,
Т.А. МАРІНОВА, **В.А. ГАНЖЕНКО**, магістранти
Криворізький національний університет

ВЗАЄМОДІЯ ФУНДАМЕНТНИХ КОНСТРУКЦІЙ І НЕРІВНОМІРНО-ДЕФОРМОВАНОЇ ОСНОВИ

Мета. Виконати аналіз і класифікувати причини виникнення нерівномірних деформацій основ, методи захисту від їхнього впливу, розробити метод розв'язання контактної задачі.

Методи дослідження. Математичне моделювання впливу різних чинників на роботу фундаментних плит. Метод кінцевих елементів, класичні методи будівельної механіки (початкових параметрів, сил, переміщень) для розрахунку взаємодії фундаментної конструкції та основи. Метод коефіцієнта жорсткості у розв'язанні контактної задачі взаємодії фундаментної плити і нерівномірно-деформованої основи.

Наукова новизна. Напружено-деформований стан фундаментної конструкції та основи за їхньої контактної взаємодії в особливих умовах роботи.

Практична значимість. Нерівномірні осідання, спричинені деформаціями основи в складних інженерно-геологічних умовах, як правило, значно перевищують відповідні величини, які мають місце у звичайних інженерно-

геологічних умовах. Наслідком нерівномірних вертикальних переміщень основи є спостережувані крени споруд, різні форми деформацій вигину, зсуву, крутіння та утворення тріщин. Нерівномірні горизонтальні переміщення основи спричиняють впливи на підземні частини споруд у вигляді зсувних сил на бічних поверхнях і підшвах фундаментів, а також унаслідок нормального тиску ґрунту, що зсувається, на стіни заглиблених у ґрунт частин споруди.

Результати. Проведені дослідження дали змогу розкрити важливість питань прогнозування перерозподілу реакцій по підшві фундаментів і визначення додаткових зусиль, що виникають при цьому в конструкціях і вони належать до контактної задачі механіки ґрунтів, яку можна розглядати як задачу, що перебуває на стику механіки ґрунтів, будівельної механіки, теорії пружності та пластичності. Для розрахунків фундаментних конструкцій як діаграми деформування, за якими визначають коефіцієнти жорсткості основи, застосовують кусково-лінійну, гіперболічну або ступінчасту залежності, які лише якісно відображають характер деформування ґрунту під час його навантаження. Залежність між осіданням і тиском під час розвантаження основи приймають у вигляді прямої, що проходить через ту точку діаграми деформування, з якої відбулося її розвантаження

Ключові слова: нерівномірні деформації основ, ґрунти, фундаменти, впливи.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-174-180

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Економічний і соціальний розвиток України значною мірою буде пов'язаний зі зростанням капітального будівництва, реконструкцією та модернізацією будівель, що розміщені в складних інженерно-геологічних умовах, зокрема на підроблюваних територіях. При цьому важливим є завдання поліпшення якості проектування відповідальних будівель і споруд за раціонального використання та захисту території. В умовах зростання населення та обмеженості земельних ресурсів, перетворення підземних виробок на підземні приміщення та інфраструктуру стає дедалі більш актуальним. Це може бути економічно вигідним, оскільки відновлення існуючих об'єктів може бути менш витратним, ніж побудова нових будівель на поверхні. Однак, варто зазначити, що будівництво на підроблюваних територіях пов'язане з певними технічними та безпечнісними ризиками, які потребують уважного підходу під час проектування та будівництва [1-3].

Розрахунки споруд з урахуванням деформованості основ виконуються зазвичай у лінійній постановці. Використання в розрахунках різних розрахункових схем основ і методів врахування нелінійної деформованості ґрунтів призводить до того, що одержувані розрахунковим шляхом величини зусиль у фундаментах і конструкціях верхньої будови відрізняються від лінійного розрахунку в 2-3 рази [4, 5].

Аналіз досліджень і публікацій. До теперішнього часу не вивчено роботу масивних плитних фундаментів будівель і споруд з можливістю регулювання контактних тисків у складних інженерно-геологічних умовах, що не дає змоги з достатньою точністю оцінити їхню роботу за нерівномірних деформацій основи. Це обґрунтовує актуальність наукових досліджень, спрямованих на вивчення спільної роботи плитних фундаментів із нерівномірно деформованою основою та вдосконалення конструкцій фундаментів цього типу.

Теоретичному розробленню й експериментальному обґрунтуванню нелінійних моделей ґрунтового середовища, що дають змогу описувати процес його деформування на всіх етапах навантаження, присвячено праці І.П. Бойка, Є.Ф. Винокурова, Ю.Л. Віннікова, О.Л. Гольдіна, О.Є. Дельника, Б.І. Дідуха, Ю.К. Зарецького, М.Л. Зоценка, В.А. Іллічова, С.Н. Клепікова, М.В. Корнієнка, О.О. Крижанівського, І.В. Крижанівського, І.А. Іллічева, С.Н. Клепікова, А.Л. Крижанівського, І.Я. Лучковського, В.А. Микулича, Ю.М. Мурзенка, В.М. Миколаївського, А.А. Петракова, В.Д. Петренка, А.М. Рижова, В.Л. Седіна, Ю.А. Соболевського, Ю.М. Соловйова, В.І. Соломіна, Є.А. Сорочана, А.С. Строганова, В.Г. Таранова, Р.О. Тімченко, З.Г. Тер-Мартиросяна, С.Б. Ухова, В.Г. Федоровського, Д.М. Шапіро, В.Г. Шаповала, В.Б. Швеца, В.М. Широкова, А.В. Школи та інших. Із зарубіжних учених слід відзначити роботи А.У. Бішопа, Д. Друккера, В. Прагера, К. Роско, П. Роу, А. Скофілда та інших [6-18].

Постановка задачі. Виконати аналіз і класифікувати причини виникнення нерівномірних деформацій основ, методи захисту від їхнього впливу, розробити метод розв'язання контактної задачі.

Викладення матеріалу та результати. У складних ґрунтових умовах фундаменти піддаються впливам не тільки силових чинників, а й нерівномірних деформацій основи. До складних ґрунтових умов слід віднести: просідаючі лесові ґрунти; підроблювані та закарстовані території; набухаючі, неоднорідні, мерзлі, слабкі водонасичені ґрунти тощо. Особливістю цих ґрунтів як основи є їхня нерівномірна деформація під час експлуатації, внаслідок чого в конструкціях

(передусім у фундаментах) будівель і споруд виникають додаткові зусилля. Причини цих нерівномірних деформацій різні.

Нерівномірна деформація основи може бути спричинена або її неоднорідністю, пов'язаною з геологічною будовою, або іншими зовнішніми причинами, наприклад гірничими виробками, замочуванням ґрунту тощо.

Численні дослідження поведінки різних ґрунтів (лесових, просідних, загіпсованих, заторфованих, карстових тощо) під час замочування показали, що їхня несуча здатність і податливість (жорсткість) перебувають у тісній залежності від ступеня їхньої вологості. При цьому підвищення вологості супроводжується зниженням жорсткісних характеристик основи, що може викликати нерівномірне осідання.

Під впливом гірничих робіт відбувається зсув ґрунтового масиву, що спричиняє деформації земної поверхні, яка слугує основою будівель і споруд, унаслідок чого змінюються фізико-механічні властивості ґрунту, знижуються жорсткість і несуча здатність основи.

Нерівномірні осідання, спричинені деформаціями основи в складних інженерно-геологічних умовах, як правило, значно перевищують відповідні величини, які мають місце у звичайних інженерно-геологічних умовах. Це осідання лесових просідних ґрунтів під час замочування, осідання під час відтавання льодових прошарків у замерзлому ґрунті, підйоми поверхні ґрунту під час набрякання або морозного здимання, осідання земної поверхні під час підземних гірничих робіт або прояві карстово-суфозійних процесів та ін. Під час проєктування будівель і споруд у таких інженерно-геологічних умовах передбачають спеціальні заходи, що забезпечують необхідні експлуатаційні якості та довговічність об'єктів. Це досягається або шляхом створення надійної основи, що унеможливує появу неприпустимих для конструкцій деформацій, або застосуванням конструктивних заходів захисту щодо пристосування будівлі або споруди до сприйняття нерівномірних деформацій основи. Необхідні посилення конструкцій і, насамперед, фундаментів визначаються розрахунком будівлі або споруди на нерівномірні деформації основи (осідання, просідання, підйоми).

Впливи на будівлі та споруди підрозділяються на силові та деформаційні.

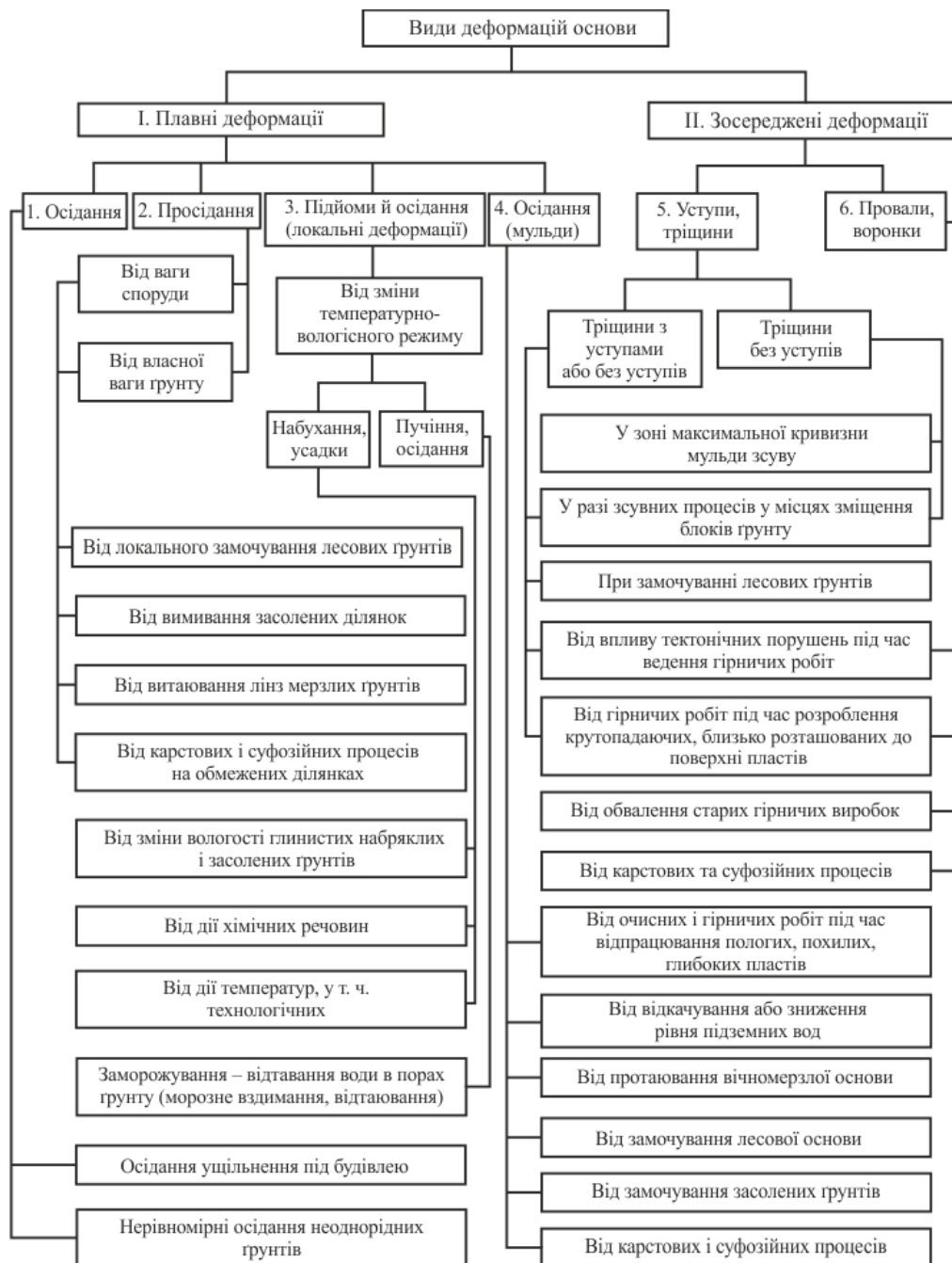
Деформаційні впливи проявляються у вигляді складного деформування земної поверхні – викривлень опуклості – увігнутості з певним радіусом (осідаючі і підроблювальні території, карсти) або деформування локального характеру – уступів, провалів, воронок, тріщин (підроблювальні території, карсти). Розподіл вертикальних і горизонтальних переміщень основи може мати плавний або зосереджений характер.

Плавні деформації характерні під час викривлення земної поверхні внаслідок плавного зсуву під час підробітки пологих і похилих пластів корисних копалин, під час просідань від замочування лесових просідаючих ґрунтів, карстово-суфозійних процесів на великій глибині. Деформації зосередженого характеру у вигляді тріщин з уступами або без них проявляються в разі оброблення крутопадаючих пластів або в разі підробітки пологих пластів на невеликих глибинах, в разі інтенсивного замочування просідаючих ґрунтів. Деформації зосередженого характеру у вигляді провалів і лійок проявляються в разі карстово-суфозійних процесів або в місцях старих гірничих виробок.

Незважаючи на те, що природа нерівномірної деформованості ґрунтів різна, всі ці деформаційні впливи, зрештою, зводяться до нерівномірних вертикальних і горизонтальних переміщень поверхні основи (рис. 1), тобто їхні дії на будівлі та споруди ідентичні.

Найнебезпечніші види деформаційних впливів з боку основи такі: викривлення поверхні основи з певним радіусом кривизни опуклості або увігнутості; утворення уступів певної величини; різні провали; тріщини.

Деформаційні впливи можна розділити на постійні та змінні. До постійних належать умовно-миттєве утворення карстових провалів, провалів у місцях старих гірничих виробок, а також деформації земної поверхні при великій швидкості замочування просідання просідаючих ґрунтів; до змінних – деформації земної поверхні (мульди, западини), спричинені підробкою, просіданням і карстово-суфозійними процесами на великих площах.



Наявний досвід проектування, будівництва та експлуатації будівель і споруд у складних інженерно-геологічних умовах, а також результати натурних досліджень споруд на різних видах деформованих основ свідчать про ефективність у багатьох випадках практики пристосування конструкцій споруд до повного або часткового сприйняття нерівномірних деформацій основи. Більш того, під час будівництва, наприклад, на підроблюваних територіях конструктивні заходи захисту часто є єдино прийнятними, а в інших інженерно-геологічних умовах мають у багатьох випадках доповнювати заходи з підготовки основ.

Якщо нерівномірні деформації основи виникають у період експлуатації споруди, що, як правило, має місце в складних інженерно-геологічних умовах, то вони спричиняють більш-менш істотний перерозподіл контактних напружень, які називаються також реакціями основи. Поле реакцій основи (просідань, осідань тощо), що існувало до появи впливів основи (просідань, осідань тощо), змінюється таким чином, що на одних ділянках відбувається збільшення реакцій, а на інших – зменшення, оскільки реакції основи мають врівноважувати зовнішні, прикладені до

споруди сили. При цьому можуть мати місце і локальна втрата несучої здатності ґрунту під фундаментом, і його відрив від ґрунту, але загальний обсяг епюр реакцій не змінюється, оскільки зовнішнє навантаження залишається незмінним.

Повна інтерпретація взаємодії споруди і нерівномірно-деформованої основи дана в роботі С.М. Клепікова. Розглядається вплив ступінчастого осідання основи на споруду, що характерно для підроблюваних територій із крутим заляганням вугільних пластів або наявністю старих гірничих виробок і тектонічних порушень, а також для закарстованих територій.

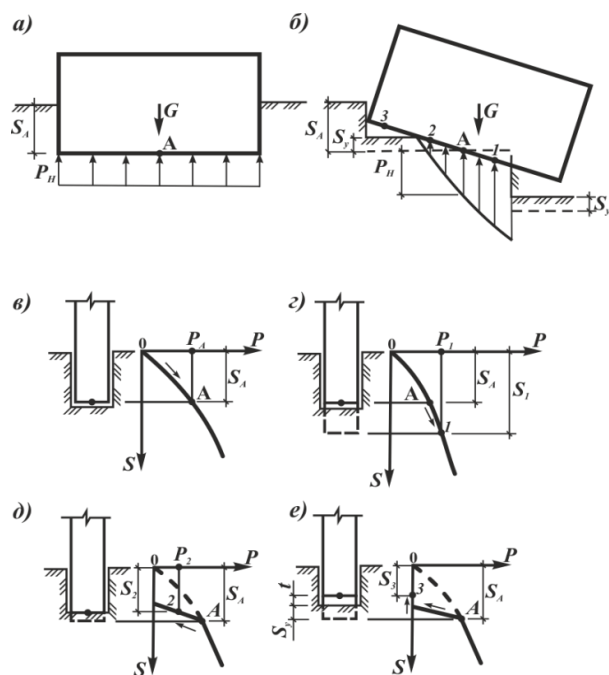


Рис. 2. Взаємодія фундаменту з нелінійною основою: а – початковий стан споруди; б – під час впливів осідання основи; в, г, д, е – поперечні перерізи фундаменту відповідно в початковому стані та в точках 1, 2, 3 за ступінчастого осідання основи

На рис. 2а схематично показано споруду вагою G і реакції основи P_n , які рівномірно розподілені по підшві фундаменту. Назвемо цей стан споруди початковим. У період експлуатації споруда піддається впливу ступінчастого осідання основи такої величини, що утворюються консольні звиси з обох торців. Епюра реакцій основи набуває вигляду, зображеного на рис. 2б. Найбільше збільшення реакцій основи має місце біля краю уступу. Зі збільшенням вильоту лівої консолі крайова ордината епюри зростає. У разі наближення крайового тиску на ґрунт до граничного в крайовій зоні розвиваються великі деформації, які можуть призвести до втрати рівноваги споруди.

Споруда, що втратила рівновагу, переміщаючись, обіпреться лівою консольною частиною на основу і відновить свою рівновагу.

У площині підшви фундаменту можна виділити три характерні ділянки:

- ділянку збільшення реакцій порівняно з початковим станом (зона, прилегла до точки 1);
- ділянку зменшення реакцій порівняно з початковим станом (зона, прилегла до точки 2);
- ділянки відриву підшви фундаменту від ґрунту (зона біля точки 3).

На рис. 2в-е зображено поперечні перерізи фундаменту в початковому стані та в точках 1, 2 і 3 у разі ступінчастого осідання основи. Поруч із кожним перерізом наведено діаграму деформування поверхні основи, на якій стрілками вказано шляхи навантаження або розвантаження основи.

Рис. 2в відображає початкове положення фундаменту. Від початку до закінчення будівництва споруди деформування відбувається по лінії OA ; осідання фундаменту дорівнює S_A , реактивний тиск основи (нормальна контактна напруга) – P_n .

Додаткове осідання фундаменту в точці 1 після осідання основи показано на рис. 2г. Тут відбувається подальше зростання навантаження на основу, і деформування відбувається від точки A вниз до точки 1. Осідання і реактивний тиск у цій точці дорівнюють S_1 і P_1 .

У точці 2 має місце часткове розвантаження основи, і шлях розвантаження на діаграмі деформування зображується відрізком $A - 2$. Осадка і реактивний тиск у точці 2 дорівнюють S_2 і P_2 .

У точці 3 відбувається повне розвантаження основи з відривом підшви фундаменту від основи. Реактивний тиск у цьому випадку дорівнює нулю, а між основою і підшвою фундаменту утворюється зазор величиною $t = S_A - (S_3 + S_y)$. Тут S_y – пружна (відновлювана) частина осідання.

На наведених схемах показано контактну взаємодію фундаменту зі ступінчасто-осідаючою основою. Низка точок фундаменту перебуває в зоні контакту, інші точки – поза контактом (відрив від основи).

У міру проходження уступу зони контакту змінюються, що вказує на необхідність врахування під час проєктування фундаментів і споруди загалом нелінійної залежності між навантаженням і осіданням основи, а також відмінності в деформації ґрунту під час навантаження і

розвантаження.

Якщо під час проектування основ і споруд не враховано особливостей інженерно-геологічних умов будівництва та можливих їхніх змін у процесі експлуатації споруди, то виникають деформації, а іноді й аварії об'єктів. Багато авторів, як вітчизняних, так і закордонних, приводять численні приклади деформацій споруд, що виникають через недооцінку складних інженерно-геологічних умов будівництва. Наслідком нерівномірних вертикальних переміщень основи є спостережувані крени споруд, різні форми деформацій вигину, зсуву, крутіння та утворення тріщин. Нерівномірні горизонтальні переміщення основи спричиняють впливи на підземні частини споруд у вигляді зсувних сил на бічних поверхнях і підшвах фундаментів, а також унаслідок нормального тиску ґрунту, що зсувається, на стіни заглиблених у ґрунт частин споруди.

Сказане свідчить про важливість питань прогнозування перерозподілу реакцій по підшві фундаментів і визначення додаткових зусиль, що виникають при цьому в конструкціях. Ці питання належать до контактної задачі механіки ґрунтів, яку можна розглядати як задачу, що перебуває на стику механіки ґрунтів, будівельної механіки, теорії пружності та пластичності.

Чинні норми проектування основи будівель і споруд вимагають, щоб міцність і тріщиностійкість фундаментів і надфундаментних конструкцій перевіряли розрахунком, що враховує зусилля, які виникають під час взаємодії споруди з основою. Споруди або конструкції на деформованій основі розраховують залежно від прийнятої розрахункової схеми (моделі) основи.

Нині найбільшого розвитку набули методи розрахунку для моделей лінійно-пружних основ: вінклерівської, напівпростору, застосовно до звичайних інженерно-геологічних умов. Для моделей нелінійно-деформованих основ, які необхідно використовувати під час розрахунку споруд у складних інженерно-геологічних умовах, відповідні методи розрахунку поки що розроблено недостатньо і мало застосовують у проєктній практиці. Найсуттєвішою перешкодою до широкого впровадження методів розрахунку споруд на нелінійно-деформованій основі є поки що недостатня точність прогнозу осідань за тисків, що перевищують розрахунковий опір ґрунту основи.

Висновки та напрямок подальших досліджень: Для розрахунків фундаментних конструкцій як діаграми деформування, за якими визначають коефіцієнти жорсткості основи, застосовують кусково-лінійну, гіперболічну або ступінчасту залежності, які лише якісно відображають характер деформування ґрунту під час його навантаження. Залежність між осіданням і тиском під час розвантаження основи приймають у вигляді прямої, що проходить через ту точку діаграми деформування, з якої відбулося її розвантаження.

Список літератури

1. Крутов В. И., Багдасаров Ю. А. Устройство подземных этажей на просадочных и насыпных грунтах // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2005. – № 5. – С. 22–27.
2. Применение геоинформационных систем в инженерно-геологических изысканиях / Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, С. О. Попов, М. О. Кравченко, Ю. В. Чугай // 36. наук. ст. "Галузеве машинобудування, будівництво". – Полтава: ПолтНТУ, 2013. – Вип. 3 (38). – Т.2. – С. 359–367.
3. Применение математического моделирования для оценки напряженно-деформированного состояния системы „основание – фундамент – верхнее строение” в сложных инженерно-геологических условиях / Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, С. О. Попов, О. П. Сухан // 36. наук. ст. "Строительство. Материаловедение. Машиностроение". Серия: Компьютерные системы и информационные технологии в образовании, науке и управлении. – Дн-ск: ПДАБА, 2014. – Вип. 78. – С. 263–269.
4. Тімченко Р. О., Крішко Д. А., Седін В. Л. Розрахунок фундаментів-оболонки для споруд баштового типу на вплив нерівномірних осідань основи // «Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури» – Дн-ск: ПДАБА, 2015. – № 7. – С. 34–40.
5. Математичне моделювання нелінійно-непружних контактних задач / Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, А. В. Богатинський, В. О. Савенко // «Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури» – Дн-ск: ПДАБА, 2015. – № 8. – С. 50–58.
6. Застосування програмного комплексу LIRA 9.6 для моделювання роботи системи «основа – інженерна споруда» / Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, В. О. Савенко, І. В. Хоруженко // Тези доповідей VI Міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерні системи та інформаційні технології в освіті, науці та управлінні» – Дн-ск: ПДАБА, 2019. – С. 48–49.
7. Швец В. Б., Феклин В. И., Гинзбург А. К. Усиление и реконструкция фундаментов. – М.: Стройиздат, 1985. – 204 с.
8. Coduto Donald P. Foundation Design: Principles and Practices. – New Jersey: Prentice Hall, 2001. – 883 p.
9. Frank R. Some aspects of soil-structure interaction according to Eurocode 7 «Geotechnical design» // Engenharia Civil. – Vol. 25, 2006. – PP. 5–16.
10. Tomlinson, M. J., Boorman R. Foundation design and construction. – Edinburgh: Prentice Hall, 2001. – 583 p.

11. ДБН В.1.1-45:2017. Будівлі і споруди в складних інженерно-геологічних умовах. Загальні положення – К.: Мінрегіонбуд, 2017. – 35 с.
12. ДБН В.2.1-10:2018. Основи і фундаменти будівель та споруд. – К.: Мінрегіонбуд, 2018. – 40 с.
13. ДБН В.2.2-15:2019. Житлові будинки. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд, 2019. – 42 с.
14. Подготовка оснований зданий и сооружений, строящихся на замедленнопросадочных грунтах I и II типа по просадочности / А.Н. Богомолов, Ю.И. Олянский, Л.А. Анисимов, Е.В. Щекочихина, А.Ф. Алексеев // Вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2015. – № 41 (60). – С. 14–23.
15. Проблемы строительства и эксплуатации зданий на лессовых грунтах Северного Причерноморья / А.Н. Богомолов, Ю.И. Олянский, С.В. Кузнецова, И.Ю. Кузьменко, Е.В. Щекочихина, С.А. Чарыкова // Вестник Волгоград. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2016. – № 44-2. – С31-39.
16. Соколов Н.А. Проблема лессов// Соросовский образовательный журнал. – 1996. – №9. – С. 86–93.
17. Lavrusevich A.A., Lavrusevich S.A., Gorshkova O.G. Technogenesis and behavior of the loessial rocks // In book: Proceedings of International Scientific Conf. – Vladivostok: Dalnauka, 2009. – P. 130–131.
18. Пантюшина Е.В. Лессовые грунты и инженерные методы устранения их просадочных свойств// Ползуновский вестник. – 2011. – №1. – С. 127–130.

УДК 622.1:528.02

О. В. ДОЛГІХ, канд. техн. наук, доц., О. А. КРЕМЕР, аспірант
Криворізький національний університет

ВИКОРИСТАННЯ БПЛА ТА GPS В МАРКШЕЙДЕРСЬКІЙ СПРАВІ

Мета. Метою роботи є дослідження питання доцільності використання GPS-обладнання та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) при виконанні знімальних робіт на промислових майданчиках та інших об'єктах гірничодобувних підприємств, що дозволяє вирішувати нагальні задачі маркшейдерського забезпечення гірничих робіт.

Методи дослідження. Поставлені завдання та мета для дослідження, зумовили використання нових підходів та методів виконання маркшейдерських вимірів та обчислень з необхідною точністю. Методи дослідження засновані на аналізі матеріалів, отриманих з різних наукових літературних джерел: наукових робіт іноземних та вітчизняних вчених, опублікованих у журналах та збірниках; інформації з Інтернету; офіційної нормативної бази, що регламентує проведення польових та камеральних робіт.

Наукова новизна. За результатами аналізу сучасних методів виконання знімальних робіт за допомогою безпілотних літальних апаратів та GPS та порівняння їх з традиційними методами виконання таких задач, обґрунтовано вибір найбільш доцільних та ефективних методів виконання маркшейдерських знімальних робіт з подальшим опрацюванням отриманих даних, використовуючи для цього спеціальне програмне забезпечення.

Практична значимість виконаних досліджень спрямована для задоволення потреб маркшейдерських відділів гірничодобувних підприємств Криворізького басейну, для удосконалення практики виконання знімальних робіт на різних гірничодобувних об'єктах: хвостосховищах, кар'єрах, відвалах, проммайданчиках підприємств відкритої та підземної розробки родовищ корисних копалин. Досліджені сучасні методи знімання за допомогою БПЛА та GPS, мають суттєву перевагу порівняно з традиційними за рядом характеристик. Вони не поступаються за точністю, виконуються у короткий термін часу та потребують значно меншої кількості задіяних працівників маркшейдерського відділу.

Результати. У роботі розглянуто точність, яку дають традиційні та досліджені сучасні методи виконання маркшейдерських знімальних робіт, також результати опрацювання даних зйомок, отримані шляхом опрацювання їх в різнному програмному забезпеченні. Досліджено результати впровадження сучасних методів на гірничодобувних підприємствах України та зарубіжжя.

Ключові слова: маркшейдерія, БПЛА та GPS, програмне забезпечення, 3D моделі.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-180-184

Проблема та її зв'язок з науковим і практичним завданням. Оскільки маркшейдерські роботи переплітаються з багатьма галузями – мають багатофункціональне призначення, то є необхідність у забезпеченні якісного та одночасно швидкого обслуговування [4,6]. За останні роки впровадження GPS-обладнання та БПЛА для виконання маркшейдерських робіт – створення опорної маркшейдерсько-геодезичної мережі, виконання детальних зйомок гірничих об'єктів (котлованів на хвостосховищах, проммайданчиків шахт, екскаваторних вибоїв тощо) – набуло широкого спектру використання за рахунок високої точності та короткий проміжок часу виконання. Завдяки системам позиціонування в реальному часі, є можливість створювати автоматизовані системи, які включатимуть в себе систему розмічування сітки свердловин, керування

вантажообігу підприємства та планування поверхні, контролювання процесу зсувів та деформацій [11].

Аналіз досліджень та публікацій. Методи знімання за допомогою GPS та БПЛА підвищують ефективність маркшейдерського забезпечення [5]. Про можливість використання даного маркшейдерського приладдя відображено у роботах В. М. Глотова, А. В. Гуніна, С. І. Скубієва та інших [2,3,8]. Всі маркшейдерські роботи повинні бути виконанні згідно правил [10], що дозволяє контролювати проведення будь-якого виду гірничих робіт з певними для цього допусками виконання.

У роботах В. М. Глотова та А. В. Гуніна розглянуто перспективи застосування БПЛА для аерофотознімання та його переваги над традиційними методами знімання. Основними такими перевагами є виконання зйомок з невеликих висот і конкретно поряд з об'єктом, внаслідок чого знімки отримуються з високою роздільною здатністю, зі зменшенням ризику для життя та здоров'я працівника під час знімання у важкодоступних місцях. Під час вибору БПЛА для виконання маркшейдерських знімальних робіт слід проаналізувати параметри та конструкцію самого інструменту, вбудованої камери та ділянки, на якій необхідно виконати зйомку.

У виконаній науково-оглядовій роботі В. М. Глотова, А.В. Гуніної, В.Б. Колесніченка, О.В. Прохорчука, М.І. Юрківа «Розробка та дослідження БПЛА для аерознімання» було проведено дослід з виконання зйомки з декількох різних типів безпілотників, але більшість з них, під час проведення дослідів мала такі недоліки: не повне покриття отриманих знімків; значна різномасштабність знімків; кути нахилу, які не задовольняють умови виконання такого типу робіт; незадовільна швидкість руху носія.

Про використання досвіду застосування GPS-обладнання на відкритих гірничих роботах наведено у науковій праці Г. А. Корецької, П. І. Кузнецова, Д. А. Васил'єва [7]. В даній публікації наведено основні проблеми, які можливо усунути за допомогою використання GPS: створення та перевірка маркшейдерсько-геодезичних мереж; моніторинг за станом транспортних мереж. Але найбільша увага приділяється моніторингу зсуву (так як це може спричинити екологічну небезпеку), зніманню будівель та складів гірничої породи, проектуванню та проведенню буровибухових робіт. В роботі наводяться результати застосування GPS на вугільному родовищі. Маркшейдерський відділ даного підприємства забезпечений GPS-приймачами фірми «Leica Geosystems AG» моделі GS15. Даний тип моделі має вбудовані знімні пристрої зв'язку зі змінними SIM-картами для роботи як із бази, так і з проміжної станції в режимі RTK.

Зарубіжні науковці спрямовують свою діяльність на можливість поєднання GPS та BDS для моніторингу осідання точок різних об'єктів, не тільки для гірничої промисловості [11]. З кожним роком все більше уваги приділяється питанням щодо автоматизації маркшейдерського забезпечення гірничих робіт. Принципи створення методики роботи з геоінформаційними моделями, були розроблені шляхом проведення багатьох досліджень для різних умов залягання. Ряд досліджень вказують на проблеми, які можуть виникнути під час знімання та експлуатації гірничодобувних підприємств.

Також значна увага приділена програмному забезпеченню, яке використовується для подальшої обробки результатів даних зйомки. Аналіз та порівняння програм Agisoft PhotoScan, Pix4d, Trimble INPHO, TrimbleUASMaster, ENVI OneButton, Reality Capture наведено у роботі авторів А. А. Тихонова та Д. Ж. Акматова [9]. Більшість програм можуть опрацьовувати дані, отримані інструментами різних виробників геодезичного обладнання, та обмінюватися між собою (експорт форматів). Програми для вирішення маркшейдерських задач значно спрощують роботу виконавця, але потрібно велику увагу приділяти даним, які завантажуються, так як можлива невідповідність висотної позначки дійсній, розворот в плані всієї хмари точок.

Постановка задачі. На сьогоднішній час існує багато приладів різних виробників з різними характеристиками для маркшейдерсько-геодезичних робіт на гірничодобувних підприємствах, що дає змогу проаналізувати їх відносно виконання робіт традиційними методами, та вибрати більш доцільні для їх виконання.

Викладення матеріалу та результати. На сьогоднішній час значно збільшилась кількість маркшейдерсько-геодезичного обладнання для виконання робіт. Багато фірм з виробництва маркшейдерського приладдя доволі часто випускають нові модифікації з вищою точністю, з простотою в експлуатації, але не завжди є можливість використати їх при виконання робіт за певних умов розташування гірничих об'єктів.

При виконанні маркшейдерських зйомок, все більший попит на користування становить сучасне обладнання, таке як GPS та БПЛА, так як виконання зйомок за допомогою електронних тахеометрів на хвостосховищах, кар'єрах, проммайданчиках шахт не дає можливості завжди зняти все необхідне з однієї точки, так як один об'єкт може перекривати інший, і для цього необхідно змінити станцію стояння. Для цього необхідно знову визначати координати мінімум з 3-х точок, що займає доволі багато часу, так як опорні точки можуть бути далеко одна від одної. Таких станцій стояння для виконання певної зйомки може бути багато, що не доцільно з огляду продуктивності роботи, так як в даний період на гірничодобувних підприємствах, маркшейдерський відділ має значно меншу кількість штатних одиниць, порівняно з попереднім десятиліттям, а кількість поставлених задач іноді навіть і більша, і потребує швидкого вирішення та результату у вигляді графічної документації.

Використання GPS-обладнання дозволяє оновлювати та створювати опорні і знімальні маркшейдерські мережі, без участі підрядних організацій, що є економічно вигідним для гірничодобувних підприємств [1]. Такі роботи виконуються часто, так як гірничі роботи, з часом, мають вплив на стан опорних та знімальних мереж, що часто спричиняє масове відкачування підземних вод депресійних вирв, в середині яких відбувається осідання та інші деформації товщі гірських порід, деформація масиву бортів кар'єру внаслідок відпрацювання окремих блоків. На хвостосховищах та відвалах, на пункти маркшейдерських мереж впливає тиск від складованої гірської маси, яка спричиняє як ущільнення дамб, так і піднімання на самих нижніх позначках. За результатами таких досліджень на рудних та вугільних родовищах, розроблені способи виявлення пунктів, на які не впливають гірничі роботи та ті, які все ж таки змінюють своє положення в плані та у висотних позначках. За рахунок впровадження розглянутого методу, очікується оптимізація витрат на закладання нових пунктів опорних і знімальних мереж, використовуючи для зрівнювання виявлені стабільні чи умовно стабільні вже існуючі пункти.

Одним із важливих напрямків застосування GPS на гірничодобувних підприємствах, є спостереження за зсувами та деформаціями поверхні, на якій розташовані об'єкти, які необхідно контролювати з метою запобігання виникненню екологічної небезпеки та передчасної появи зсувів та виходу вирв на поверхню. Постійно повинні виконуватися спостереження за станом денної поверхні та спорудами, розташованими на ній, а також із розрахованою періодичністю. При цьому, виконання зйомок теодолітами та нівелірами зазнає певного ускладнення, так як необхідно визначати координати певної кількості точок, відстані між реперами та висотні позначки, що складає значний об'єм польових та камеральних робіт, і це значно зменшує продуктивність та збільшує час на виконання маркшейдерським відділом даної роботи. На сьогоднішній час, спостереження ведуться у тривимірній системі координат. Наукові роботи вітчизняних та закордонних дослідників у сфері маркшейдерсько-геодезичного забезпечення гірничих робіт, присвячені також способам спостереження в режимі реального часу, та з відображенням різними кольорами на плані місця відповідно з більшими та меншими величинами осідання. Це дозволяє відразу виявити ділянки можливого зсуву та виконати ряд заходів щодо уникнення негативних наслідків.

Методи супутникової геодезії дозволяють виконувати зйомки, за результатами яких можна отримати повний вектор зміщення реперів, а не тільки зміщення у напрямках профільних ліній на кар'єрах та відвалах, та вивчити процес деформації земної поверхні, спричинений техногенними процесами більшою за площею територією. Нажаль GPS-обладнання не може бути впроваджене та використовуватися в підземних гірничих виробках. Для хвостосховищ, кар'єрів, відвалів, проммайданчиків цей метод економічно вигідний.

Для маркшейдерських робіт аерознімання на сьогодні є рентабельним, так як є можливість виконувати моніторинг великих ділянок. Факторами, через які застосування БПЛА на гірничих підприємствах набуло широкого використання, стало: знімання з невеликої висоти та в режимі стеження; простота при запуску (відсутність спеціальної смуги для злету та посадки); можливість стежити за об'єктом не тільки з повітря, а й знімати його з різних ракурсів з землі; можливість створення ортофотоплану (рис. 1а) та повної 3D-моделі об'єкту (рис.1б); плавне і стабільне переміщення фотокамери. Недоліком використання БПЛА, на сьогоднішній час, є нетривалий час виконання самого процесу знімання (польоту), так як потребує перезарядки або заміни батареї.

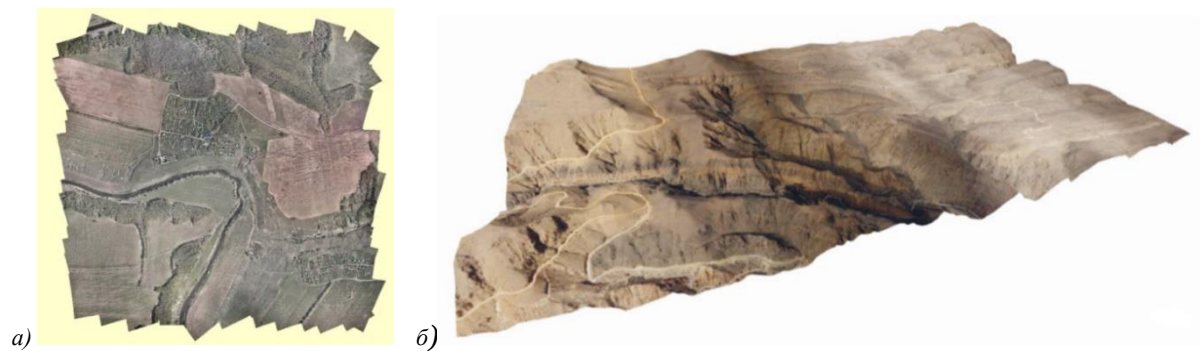


Рис. 1. Дані отримані зі знімання БПЛА : *а* – ортофотоплан; *б* – 3D модель об'єкта за даними зйомки з БПЛА «GateWing X100»

Для виконання маркшейдерської зйомки, БПЛА повинен бути оснащений камерою, спеціальною системою керування з землі та GPS-прив'язку для можливості прив'язки отриманих даних до місцевості. Вибір камери напряму залежить від точності отримання даних в подальшому. Чим менша фокусна відстань тим більше спотворення зображення. Коефіцієнт спотворення зображення на краях є більшим, що при підрахунку об'єму гірської маси впливає на точність, викликає помилки, але, згідно з вимогами відповідних інструкцій та настанов, вони не повинні перевищувати норм допустимих похибок [10].

На сьогодні існує безліч програм для обробки даних, отриманих під час маркшейдерських замірів. Майже всі вони мають автоматичне внесення польових даних у програму для подальшої обробки, та можливість створення 3D-моделі, що дозволяє досліджувати створену модель з усіх сторін. Деякі програми дозволяють експортувати файли з одного формату в інший. Кожна програма для опрацювання даних, отриманих з польових робіт, має свої недоліки та переваги. Початком обробки отриманих результатів знімання є видалення непотрібних кадрів (низької якості), а також введення даних про положення об'єкту. Після цього виконується вирівнювання фотографії і створюється хмара точок за якою будується об'ємна модель знятої ділянки.

В Кривбасі була виконана зйомка ділянки місцевості за допомогою БПЛА EBEE SENSEFLY, на якому було встановлено GPS-приймач, який за допомогою бортового комп'ютера записував координати. Під час виконання зйомки було отримано 844 знімків з висоти 203 м за допомогою камери senseFly Aeria X (18.5mm). Дозвіл камери 6000x4000. Перекриття знімків даної території було гіршим на краях, ніж в центрі. Дисторсія проявилась більшою мірою на краях знімків.

На сьогодні, виконати калібрування камери можна за допомогою такого програмного забезпечення як: Agisoft Metashape, Photomod, 3DF Zephyr, PhotoModeler Premium та інших [5]. Камера senseFly Aeria X (18.5mm) дає можливість отримати знімки високої якості з чітким фотозображенням, не залежно від освітлення. Елементи камер, які важливі для отримання необхідних даних при виконанні маркшейдерського заміру, постійно удосконалюються, що дозволяє підвищити якість результатів вирішення задач, за рахунок їх покращення. Цими елементами є: кількість пікселів та розмір матриці, схема об'єктива тощо. Знімки отримуються у форматі DNG, але кінцевим результатом для подальшої обробки є формат JPEG. Дані опрацьовувалися в програмі Agisoft Metashape. На сьогодні, навіть камери мобільних телефонів набули перспектив при виконанні зйомок. Такі дослідження виконувалися і у Криворізькому національному університеті.

Ділянка земної поверхні, для якої виконувалося зйомка, не була одноманітною по висоті, були значні перевищення, що дає можливість зробити висновок про можливість застосовувати такий вид зйомки на кар'єрах Кривбасу. Для хвостосховищ необхідно удосконалити методику зйомки, враховуючи пласкі поверхні води. На хвостосховищах маркшейдерською службою виконуються роботи з визначення контурів води, регулярного замиву карт (секцій), забезпечення нарощування дамб, здійснення контролю за станом стійкості тіла і основи хвостосховища для унеможливлення екологічної небезпеки. Маркшейдерські роботи, виконані з використанням традиційних зйомок, значно поступають за ефективністю тим, що виконуються з використанням сучасних приладів та технологій. Ефективність полягає у зменшенні часу на виконання робіт та кількості задіяного персоналу, також у можливості виконувати зйомки важкодоступних ділянок, якими є чаші карт, де йде налив.

Висновки та напрям подальших досліджень. Виконаний аналіз сучасного приладдя, доводить можливість використання його при маркшейдерсько-геодезичних зйомках, з метою підвищення продуктивності праці на шламосховищах, кар'єрах, проммайданчиках гірничодобувних підприємств. Основною метою подальших досліджень є вибір та розробка ефективного методу виконання зйомки для забезпечення робіт на хвостосховищах.

Список літератури

1. Антонович, К.М. Использование спутниковых радионавигационных систем в геодезии. В 2 т. Т. 1. Монография. ГОУ ВПО «Сибирская государственная геодезическая академия». – М.: ФГУП «Картгеоцентр», 2005. – 334 с.
2. Глотов В. М., Гуніна А. В. Аналіз можливостей застосування безпілотних літальних апаратів для аерознімальних процесів. Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва, 2014. – вип. II(28).
3. Глотов В. М., Гуніна А. В., Колесніченко О. В., Прохорчук О. В., Юрків М. І. Розробка та дослідження БПЛА для аерознімання. Національний університет «Львівська політехніка» – 10 с.
4. Долгіх Л. В., Діхтяр С. В., Томашевська А. О. Використання методів цифрової фотограмметрії в умовах підземних гірничих виробок. Вісник Криворізького національного університету, 2021. – вип. 52, – С. 85- 89.
5. Долгіх О.В. Вибір типу знімальної камери для маркшейдерського забезпечення гірничодобувних підприємств. Вісник Криворізького національного університету, 2022. – вип. 54, С. – 63-69.
6. Карпінський Ю. О., А. А. Ляшенко, М. В. Горковчук. Концептуальні засади оцінювання та забезпечення якості геопросторових даних. Вісник геодезії та картографії, 2012. – вип. 4. – С. 33-42.
7. Корецька Г. А., Кузнецов П. І., Васил'єв Д. А. Опыт применения GPS-технологий на открытых горных работах. VIII міжнародна науково-практична конференція « СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ИННОВАЦИИ В НАУКЕ И ПРОИЗВОДСТВЕ », 2019. С. 121
8. Скубієв С.І., Использование беспилотных летательных аппаратов для целей картографии. Тезиси Х Ювілейної міжнародної науково-технічної конференції «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии». Гаэта, Італія. – 2010.
9. Тихонов А. А. Акматов Д. Ж. Обзор программ для обработки данных аэрофотосъемки. Гірничий інформаційно-аналітичний бюлетень, 2018. – вип. 12. С. 192–198.
10. Правила виконання маркшейдерських робіт під час розробки родовищ рудних та нерудних корисних копалин [Електронний ресурс] – Наказ Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України 31 березня 2021 року № 669. Режим доступу - <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0884-21#Text>
11. International mining – October, 2018. – P. 26-29.

УДК 624.131:624.15

Р.О. ТИМЧЕНКО, д-р техн. наук., проф., Д.А. КРІШКО, канд. техн. наук, ст. викладач,
Т.М. СЛИНЬКО, С.А. ГЛУХАНЬКО, О.О. БЕРЕЗКА, Р.В. БОРАК, магістранти
Криворізький національний університет

МЕТОД ОЦІНКИ СТАНУ БАГАТОШАРОВИХ ОГОРОДЖУВАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Мета. Встановлення закономірностей зміни паропроникності різних матеріалів від їхньої вологості та розроблення на цій основі методу оцінки вологісного стану багатошарових огороджувальних конструкцій.

Методи дослідження. В якості теоретичної бази для дослідження використано фундаментальні закони нерівноважної термодинаміки (закон ентропії, лінійні закони Фур'є та Фіка) і результати відомих наукових досліджень з розрахунку вологісного стану огороджувальних конструкцій.

Наукова новизна. Для випробуваних у роботі матеріалів встановлено, що при збільшенні відносної вологості повітря в порах матеріалів від 20 до 80 % коефіцієнт паропроникності зростає в 1,5-2,5 раза; отримано емпіричні рівняння цієї залежності. Розроблено метод визначення коефіцієнта паропроникності матеріалів у складі багатошарових зовнішніх стін, який ґрунтується на математичному методі простих ітерацій і полягає в послідовному перерахунку коефіцієнтів паропроникності матеріалів за значеннями відносної вологості повітря у відповідних матеріальних шарах зовнішніх стін до встановлення збіжності із заданою похибкою.

Практична значимість. Розроблено метод оцінювання вологісного стану зовнішніх стін з урахуванням коефіцієнтів паропроникності матеріальних шарів, що змінюються протягом року, що дає змогу визначати параметри вологості зовнішніх стін на стадії їхнього проектування.

Результати. Розширення досліджень зі збільшення спектра будівельних матеріалів, конструктивних рішень багатошарових зовнішніх стін і систематизації характеристик масопереносу під час експлуатаційних впливів. Результати роботи можуть бути використані під час дослідження закономірностей паропроникності традиційних і новостворюваних матеріалів під час різних експлуатаційних впливів (метод для оцінювання паропроникності матеріалів), а також для прогнозного оцінювання вологістийкого стану зовнішніх стін на стадії їхнього проектування для різних

кліматичних районів (метод оцінювання вологостійкого стану зовнішніх стін із урахуванням мінливості коефіцієнта паропроникності матеріалів під час експлуатації).

Ключові слова: багатошарова огорожувальна конструкція, паропроникність, вологісний стан зовнішніх стін, відносна вологість повітря.

doi: 10.31721/2306-5451-2023-1-56-184-191

Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями. Від вологісного стану залежить ефективність та довговічність теплозахисту огорожувальних конструкцій. Захист від перезволоження конструкції забезпечується згідно з чинним нормативом [1]: своєчасним видаленням вологи з конструкції, запобіганням накопиченню вологи в конструкції за річний період експлуатації. Однією з визначальних характеристик для забезпечення необхідного вологісного стану огорожувальних конструкцій є коефіцієнт паропроникності використовуваних матеріалів. Існуючі інженерні методи визначення вологісного стану конструкції використовують постійне значення коефіцієнта паропроникності і не враховують його зміну від режиму експлуатації. Однак відомо, що значення коефіцієнта паропроникності матеріалів значною мірою залежать від їхньої вологості.

Численні дослідження зовнішніх стін вказують на широкий діапазон експлуатаційної вологості використовуваних матеріалів. На етапі проектування огорожень із різними конструктивними рішеннями відсутні методи оцінювання дійсної експлуатаційної вологості матеріалів, які використовуються. Відсутність методів і недостатня експериментальна база дослідження характеристик паропроникності матеріалів за різних умов експлуатації не дає змоги теоретично обґрунтувати залежність паропроникності матеріалу від його вологості та враховувати її на етапі проектування огорожувальних конструкцій. Отже, наявні інженерні методи визначення вологісного стану конструкцій недостатньо точно відображають закономірності масопереносу в реальних експлуатаційних умовах. У зв'язку з цим актуальним завданням є дослідження закономірностей зміни паропроникності матеріалів в експлуатаційних умовах і розробка на цій основі розрахункових методів для визначення вологісного стану огорожувальних конструкцій [2-6].

Аналіз досліджень і публікацій. Дослідженням і розробкою методів визначення вологісного стану огорожувальних конструкцій займалися: В.М. Богословський, В.Г. Гагарін, В.М. Іллінський, Н. Klopfer, К. Kiehl, К.М. Künzel, В.В. Козлов, В.А. Ликов, В.Д. Мачинський, А.Г. Перехожєнцев, С.В. Федосов, К.Ф. Фокін, А.У. Франчук, А.С. Епштейн та ін. Дослідження вологісних характеристик матеріалів проводилися такими вченими як: Б.В. Дерягін, В. Вайцекаускас, Ц.Г. Іогансон, Е.Е. Монствілас, В. Планскін, Н.В. Чураєв, Х.Г. Еденхольм, А.С. Епштейн та ін. Наразі ступінь розробленості проблеми з оцінювання вологісного стану огорожувальних конструкцій виявився недостатнім через відсутність бази даних щодо випробування паропроникності багатошарових конструкцій зовнішніх стін під час різних експлуатаційних впливів, великого розмаїття сучасних матеріалів та їхніх комбінацій в огорожувальних конструкціях [7-21].

Постановка задачі. Встановлення закономірностей зміни паропроникності різних матеріалів від їхньої вологості та розроблення на цій основі методу оцінки вологісного стану багатошарових огорожувальних конструкцій.

Викладення матеріалу та результати. Порівняльний аналіз наявних методів визначення паропроникності матеріалів дозволив виявити відсутність комплексного врахування низки експлуатаційних впливів: зміна вологості матеріалу; взаємне розташування шарів матеріалів відносно один одного; наявність градієнту температур за перерізом зразка; вплив вітрових впливів на фасади будівель.

Таким чином, виникає необхідність у створенні розрахункових методів визначення паропроникності фасадних конструкцій з урахуванням їхніх конструктивних особливостей і експлуатаційних впливів. Аналіз існуючих методів дав змогу встановити, що коефіцієнт паропроникності в них приймається постійним, розрахунки не враховують його залежність від зміни температурно-вологісних умов експлуатації.

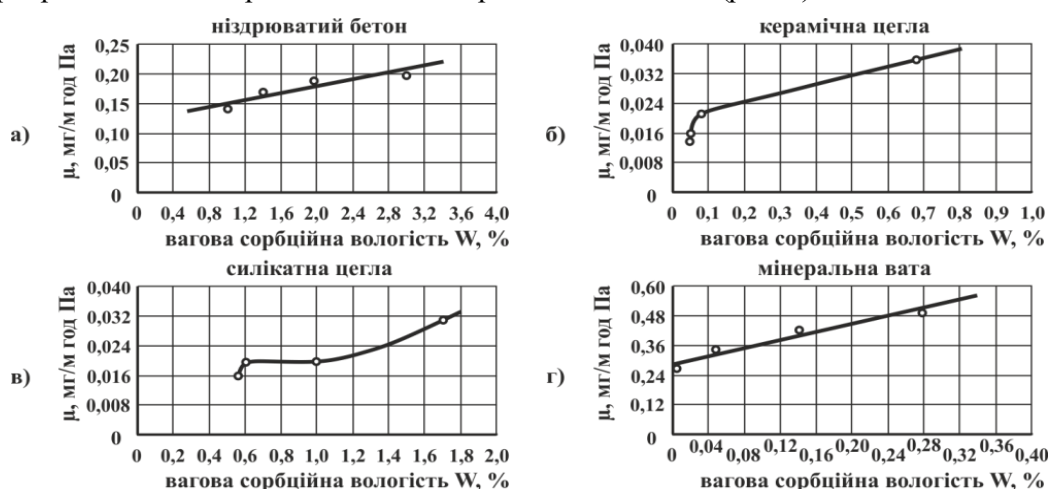
Дослідження паропроникності матеріалів за різних значень відносної вологості повітря в зразках проводили згідно з нормативом з тією різницею, що зразки поміщали між середовищами з різною відносною вологістю повітря (20, 35, 50 і 80 % за температури 20°C) до досягнення стаціонарного стану. Результати вимірювань занесені в табл. 1.

Таблиця 1

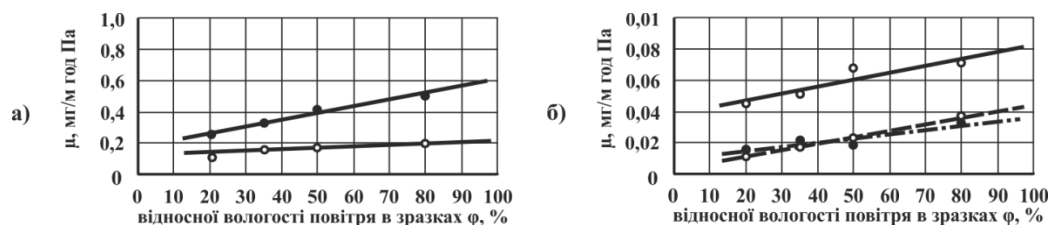
Значення коефіцієнта паропроникності μ (мг/м-год-Па) за середньої відносної вологості повітря $\varphi_{\text{сер}}$ % у зразку

Середня відносна вологість повітря у зразку $\varphi_{\text{сер}}$ %	20 %	35 %	50 %	80 %
Матеріал				
ніздрюватий бетон ($\rho = 500 \text{ кг/м}^3$)	0,137	0,170	0,186	0,199
керамічна цегла	0,014	0,016	0,022	0,036
силікатна цегла	0,016	0,020	0,019	0,031
мінеральна вата ($\rho = 90 \text{ кг/м}^3$)	0,264	0,339	0,414	0,514
пінополістирол ($\rho = 10 \text{ кг/м}^3$)	0,044	0,051	0,067	0,069

Можна бачити, що паропроникність матеріалів збільшується з підвищенням відносної вологості повітря в зразку. Найсуттєвішу зміну встановлено в керамічній цеглі (у 2,4 раза), силікатній цеглі (в 1,92 раза) і мінеральній ваті (в 1,94 раза). З метою встановлення залежності паропроникності матеріалів від сорбційної вологості було експериментально визначено їхні ізотерми сорбції згідно з нормативом. За отриманими даними було побудовано графіки залежності коефіцієнтів паропроникності матеріалів від їхньої сорбційної вологості (рис. 1).

Рис. 1. Залежність коефіцієнта паропроникності μ (мг/м-год-Па) матеріалу від його сорбційної вологості W , %

Можна бачити, що паропроникність ніздрюватого бетону та мінеральної вати лінійно залежить від їхньої сорбційної вологості, в той час як у зразках із силікатної та керамічної цегли ці залежності не є лінійними (рис. 1б,в). Також можна бачити, що суттєві зміни паропроникності цих матеріалів відбуваються на "коротких" ділянках ізотерм сорбції (0,045-0,08 і 0,55-0,6 % для керамічної та силікатної цегли, відповідно), що може суттєво підвищити ефективність при практичному застосуванні цієї закономірності. Представлення отриманих результатів у вигляді залежності μ від відносної вологості повітря у зразках φ показало, що для всіх випробуваних матеріалів залежність паропроникності від відносної вологості повітря виявилася лінійною (рис. 2а,б).

Рис. 2. Залежність коефіцієнту паропроникності μ (мг/м-год-Па) матеріала від середньої відносної вологості повітря у зразку $\varphi_{\text{сер}}$ %

Цей факт дозволив обґрунтувати використання цієї залежності під час розроблення методу визначення паропроникності багатошарових зовнішніх стін в експлуатаційних умовах. Емпіричні рівняння цієї залежності для досліджених матеріалів наведено в табл. 2.

Емпірично отримані рівняння залежності коефіцієнту паропроникності від відносної вологості повітря у порах матеріалу

Матеріал	Щільність, ρ , кг/м ³	Рівняння
Ніздрюватий бетон	500	$\mu = 0,00098 \cdot \varphi + 0,12806$, мг / (м · год · Па)
Керамічна цегла	1500	$\mu = 0,00025 \cdot \varphi + 0,01057$, мг / (м · год · Па)
Силікатна цегла	1400	$\mu = 0,00038 \cdot \varphi + 0,00504$, мг / (м · год · Па)
Мінеральна вата	90	$\mu = 0,00415 \cdot \varphi + 0,19149$, мг / (м · год · Па)
Пінополістирол (ППС)	8,6	$\mu = 0,00043 \cdot \varphi + 0,03825$, мг / (м · год · Па)

Розрахункові значення за табличними значеннями коефіцієнтів паропроникності однакові для обох конструкцій, тому що наявний метод розрахунку не враховує взаємного розташування матеріальних шарів конструкції, а визначається простою сумою шарів. Таким чином, виявлено, що значення характеристик паропроникності багатошарових конструкцій залежать від взаємного розташування матеріальних шарів відносно один одного.

Результати дослідження лягли в основу розроблення методу визначення значень паропроникності використовуваних матеріалів в огорожувальній конструкції за експлуатаційних умов.

На основі виявленої закономірності паропроникності від відносної вологості повітря створено метод визначення паропроникності матеріалів у конструкціях зовнішніх стін за експлуатаційних впливів.

З метою використання кліматичних даних, які широко представлені в довідковій літературі, експлуатаційні впливи чисельно приведені до середньомісячних параметрів відносної вологості й температури повітря місця будівництва, і параметрів мікроклімату приміщень. Вхідними параметрами для розрахунку є кліматичні параметри зовнішнього і внутрішнього повітря, теплофізичні характеристики матеріалів, що використовуються, і товщини матеріальних шарів зовнішніх стін (рис. 3, поз. 1).

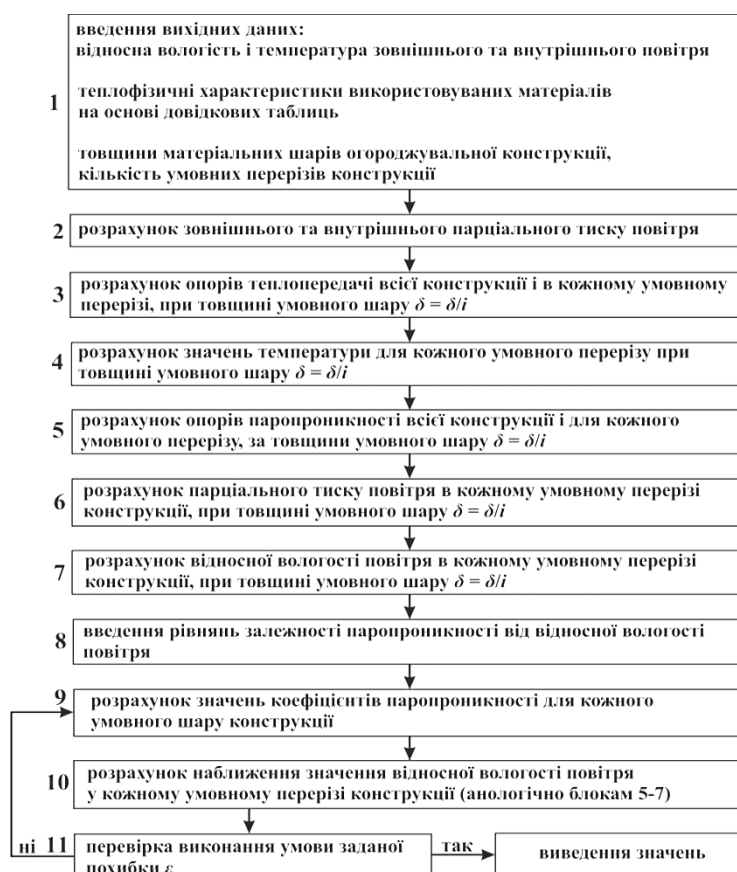


Рис. 3. Алгоритм методу розрахунку паропроникності матеріальних шарів конструкції

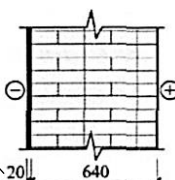
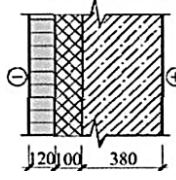
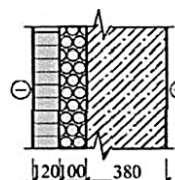
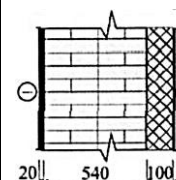
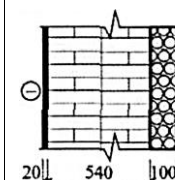
Метод ґрунтується на математичному методі простих ітерацій і полягає в послідовному перерахунку значень паропроникності за значеннями відносної вологості повітря в перерізі огорожувальної конструкції до встановлення збіжності із заданою похибкою.

Цей метод можна розбити на три етапи:
 розрахунок відносної вологості повітря в шарах конструкції за табличними значеннями паропроникності (рис. 3, поз. 1-7);
 визначення паропроникності матеріалів і відносної вологості повітря з використанням експериментально виявленої закономірності (рис. 3, поз. 8-10);
 перерахунок відносної вологості і паропроникності до отримання збіжності результатів із заданою похибкою (рис. 3, поз. 11).

При цьому виходимо з припущення, що паропроникність не залежить від температури. За розробленим методом було виконано розрахунок щомісячних значень опору паропроникненню основних типів конструкцій: одношарових, двошарових із зовнішнім теплоізоляційним шаром, двошарових із внутрішнім теплоізоляційним шаром, тришарових із теплоізоляційним шаром по середині. Результати значень опору паропроникненню конструкцій відображено в табл. 3.

Можна бачити, що опір паропроникненню конструкцій змінюється протягом року. Максимальне значення для даних конструкцій досягається в травні, а мінімальне - у січні. Відношення максимального і мінімального значення дає змогу визначити відсоток зміни конструкції за річний період експлуатації (передостанній рядок табл. 3). У табл. 3 наведено результати за тими дослідженими конструкціями, в яких відбуваються найістотніші зміни відносної вологості повітря в матеріальних шарах за річний період. Найменшу зміну встановлено у двошаровій конструкції за системою вентиляований фасад із ніздрюватого бетону та зовнішнього шару мінеральної вати (відсоток зміни – 5,5 %). Таким чином, встановлено, що відсоток зміни досліджених конструкцій зовнішніх стін протягом року перебуває в межах від 5,5 до 85,4 %. Порівняльні розрахунки вологісного стану зовнішніх стін за постійного (табличного) значення коефіцієнтів паропроникності матеріалів і значень коефіцієнтів паропроникності, що змінюються в експлуатаційних умовах.

Таблиця 3

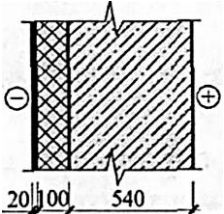
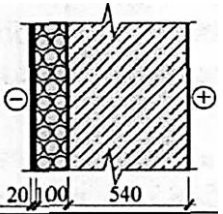
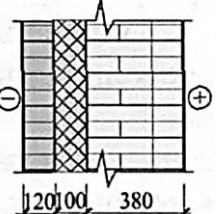
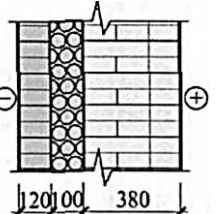
Значення опору паропроникненню $R_{\text{п}}$ ($\text{м}^2 \text{ год Па/мг}$) конструкцій зовнішніх стін з найбільшими змінами $R_{\text{п}}$					
Тип кон- струкції стіни					
Місяці	20 640	20 380	20 380	20 540 100	20 540 100
Листопад	13,91	4,04	5,15	8,49	9,80
Грудень	12,72	3,92	4,95	8,29	9,48
Січень	11,61	3,88	4,87	8,24	9,42
Лютий	11,97	3,90	4,90	8,30	9,48
Березень	14,43	4,15	5,28	8,73	10,08
Квітень	16,18	4,58	5,89	9,80	11,62
Травень	19,32	5,77	7,24	15,29	16,98
Червень	17,64	5,34	6,73	14,13	15,65
Липень	18,19	5,57	6,98	15,09	16,58
Серпень	17,66	5,52	6,90	15,23	16,59
Відсоток зміни $R_{\text{п}}$	66,4 %	48,7 %	48,6 %	85,4 %	80,25 %
 – мін. вата  – ніздр. бетон  – ППС  – кладка з цегли  – штук. шар  – облиц. цегла					

За основу розробленого методу було прийнято вдосконалений метод Фокіна, який дає змогу оцінити температуру початку конденсації, календарний період вологонакопичення і кількість конденсату, що утворюється за період вологонакопичення. Результати розрахунків деяких досліджених конструкцій представлені в табл. 4. Можна бачити, що змінне значення паропроникності істотно впливає як на кількісну оцінку вологонакопичення в конструкції, так і на температури початку конденсації і тривалості календарного періоду вологонакопичення.

З таблиці випливає, що в розрахунках з постійним значенням μ проявляється вплив типу утеплювача на параметр g . Так, під час порівняння стовпців 3 з 4 видно, що під час розрахунків з постійним значенням μ величина g для конструкції з мінеральною ватою втричі перевищує величину g у конструкції з пінополістиролом. Під час розрахунків зі змінним значенням коефіцієнта паропроникності μ величина g практично не залежить від виду утеплювача. Результати, отримані в роботі, дають змогу стверджувати, що врахування змінного значення паропроникності дає змогу найоб'єктивніше оцінити і прогнозувати вологісний стан огорожувальних конструкцій на етапі проектування.

Таблиця 4

Характеристики вологісного стану деяких багатошарових огорожень з урахуванням змінного значення паропроникності μ^* і при постійному μ

Тип кон- струкції стін	Вологісні характерис- тики стін			1	2	3	4
							
$t_{нк}, ^\circ\text{C}$	μ^*			-8,7	-10,8	-4,19	-5,7
	μ			-6,3	-9,2	1,76	0,06
T , доба	μ^*			38	—	75	60
	μ			60	27	135	105
G_k (мг / м ² · год)	μ^*			20,27	—	9,05	11,25
	μ			54,24	8,84	56,9	22,57
g , г / м ²	μ^*			18,49	—	16	16
	μ			78,1	5,73	180	60

 – мін. вата
  – ніздр. бетон
  – ППС
  – кладка з цегли
  – штукатур. шар
  – облиц. цегла

Висновки та напрямок подальших досліджень: Основним результатом проведених досліджень є встановлення факту мінливості коефіцієнта паропроникності матеріальних шарів у багатошарових зовнішніх стінах упродовж року відповідно до зміни відносної вологості повітря в порах матеріалів під час експлуатаційних впливів. Метод визначення паропроникності матеріальних шарів і опору паропроникненню зовнішніх стін під час експлуатаційних впливів, вихідними параметрами якого є: теплофізичні властивості матеріалів (табличні), середньомісячні параметри клімату (довідкові) та встановлені в роботі емпіричні залежності коефіцієнта паропроникності від відносної вологості повітря в порах матеріалу. Величина опору паропроникненню конструкцій зовнішніх стін змінюється на 5-85 % залежно від параметрів клімату, конструктивного рішення зовнішніх стін і властивостей матеріалів. Метод оцінки вологісного стану зовнішніх стін, заснований на вдосконаленому графоаналітичному методі Фокіна К.Ф. з урахуванням мінливості коефіцієнта паропроникності матеріалів у річному циклі експлуатації.

Список літератури

- ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель – К.: Мінрегіонбуд, 2019. – 59 с.
- Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Плужнік А.В. Використання передових технологій і матеріалів для реконструкції житлової забудови // Актуальні питання проблеми створення та експлуатації технічних систем – 2017: Матеріали Міжвузівської науково-практичної конференції молодих вчених та студентів (21 квітня 2017 р.). – Кривий Ріг, 2017. – С. 104-107.
- Тімченко Р.А., Кришко Д.А., Буренкова А.В. Принципы формирования архитектурных решений энергоэффективных жилых зданий // Сталий розвиток промисловості та суспільства: Матеріали міжнародної науковотехнічної конференції (22-25 травня 2015 р.). – Кривий Ріг, 2015. – С. 122-123.

4. **Тимченко Р.А.** Теплоизоляционные отделочные системы и нормируемые параметры энергоэффективности зданий // Вісник КТУ. – Кривий Ріг, 2007 – Вип. 19, С. 147-151.
5. Нові підходи в проектуванні енергоефективних будівель / **Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, О. В. Шевчук, Л. В. Петрова** // Вісник КНУ. – Кривий Ріг, 2012 – Вип. 31. – С. 95-99.
6. Використання сучасних ефективних утеплювачів для підвищення енергоефективності громадських будівель / **Р. О. Тімченко, Д. А. Крішко, В. О. Савенко, В. М. Яблонська** // Вісник КНУ – Кривий Ріг, 2022 – Вип. 54 – С. 153-159.
7. **Куприянов В.Н.** Паропроницаемость материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным // Известия КазГАСУ. – 2013. – № 2 (24). – С. 126-131.
8. Архітектурно-конструктивні енергоефективні оболонки будівель та споруд// **В. А. Лісенко, В. Г. Суханов, Ю. О. Закорчемний, С. Є. Верьовкіна.** – Одеса, 2015. – 254 с.
9. **Саницький М.А., Позняк О.Р., Марущак У.Д.** Енергозберігаючі технології в будівництві. – Львів, 2013. – 236 с.
10. Посібник з муніципального енергетичного менеджменту // **Є. М. Іншеков, Є. Є. Нікітін, М. В. Тарновский, А. В. Чернявський.** – Київ, 2014. – 247 с.
11. **Барзилович Д.В., Фаренюк Г.Г.** Розвиток системи нормативних документів України із забезпечення енергозбереження та енергоефективності будівель // Будівельні конструкції. – 2013. – Вип. 77. – С. 3-9.
12. **Агєєва Т.П.** Методичні основи оцінки енергозбереження та прогнозування енергоспоживання в сфері житлового та комунально-побутового обслуговування населення України: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук. – 2002. — 20 с.
13. **Волынский Б. Н.** Конструктивные решения энергосберегающих зданий // Энергосбережение. – 2001. – № 3. – С 67.
14. **Гагарин В. Г.** К обоснованию повышения теплозащиты ограждающих конструкций зданий // Стройпрофиль. – 2010. – № 1. – С. 21-23.
15. **Алоян Р.М., Федосов С.В., Опарина Л.А.** Энергоэффективные здания – состояние, проблемы и пути решения. – Иваново, 2016. – 276 с.
16. **Афанасьева А.В.** Проектирование наружных стен зданий с учетом энергосбережения. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – 2002. – 148 с.
17. **Дмитриев А.Н.** Энергосберегающие ограждающие конструкции гражданских зданий с эффективными утеплителями. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – 2001. – 374 с.
18. **Малявина Е. Г.** Строительная теплофизика: учебное пособие – М.: МГСУ, 2011. – 152 с.
19. **Гагарин В.Г., Козлов В.В.** Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Строительные материалы – 2010. – № 12 – С. 4-12.
20. **Хоменко О.Г.** Енергозберігаючі технології в будівництві. – Глухів, 2019. – 118 с.
21. **Куприянов В.И., Петров А.С.** Влияние различной скорости движения воздуха на паропроницаемость теплоизоляционных материалов // Строительные материалы. – 2013. – № 6. – С. 20-21

АНОТАЦІЇ

УДК 622.6:622.27

Ступнік М.І., Федько М. Б., Грищенко М.А., Калініченко О.В., Калініченко В.О., Письменний С.В. Вплив форми компенсаційних камер на їх стійкість, технологічні параметри та якість видобутої рудної маси

Мета. Теоретичне обґрунтування оптимальних форм і розмірів компенсаційних камер, визначення їх стійкості та впливу на якість видобутої рудної маси. Україна посідає провідне місце у світі з видобутку залізорудної сировини. Переважна частина багатих залізних руд видобувається підземним способом. Встановлено, що зі збільшенням глибини розробки продуктивність шахт падає, погіршується якість видобутої рудної маси. Причиною цього є погіршення гірничо-геологічних умов відпрацювання родовищ. Видобуток багатих залізних руд характеризується значними втратами та засміченням руди досягаючи, в окремих випадках, відповідно 14-20% і 12-18%. Дані показники втрат є наслідком того, що видобуток ведеться застарілою технікою і технологіями. В роботі досліджені та запропоновані удосконалені форми компенсаційних камер, які дозволяють збільшити об'єм компенсаційного простору, видобути більшу кількість чистої руди та підвищити якість видобутої сировини

Методи дослідження. Функціональний аналіз вимог світової металургійної промисловості до якості залізних руд підземного видобутку на шахтах України. Моделювання гірського масиву методом кінцевих елементів (МКЕ) з використанням спеціалізованої комп'ютерної програми Ansys 2021-P2.

Наукова новизна. Встановлені нові залежності впливу форми компенсаційних камер на їх стійкість, технологічні параметри та якість видобутої рудної маси.

Практична значимість. Застосування компенсаційних камер високої стійкості дасть можливість збільшити їх об'єм, що дозволить підвищити кількість вилученої чистої руди, зменшити її засмічення та досягти зростання якості видобутої рудної маси, що матиме позитивний вплив на підвищення її ціни та конкурентоспроможність товарної продукції.

Результати. Доведено, що найвищу стійкість має вертикальна компенсаційна камера трапецієвидної форми, яка буде стійкою у діапазоні усіх розглянутих глибин (1400-2000 м) навіть у рудах невисокої міцності та стійкості. Дещо меншу стійкість мають вертикальні компенсаційні камери та камери склепистої форми, де вивали різної інтенсивності будуть мати місце в нижній частині оголень у рудах низької міцності на глибинах понад 1750 м

Ключові слова: залізна руда, підземна розробка, компенсаційні камери, напружено-деформований стан, стійкість, якість

Stupnik M.I., Fedko M.B., Hryshchenko M.A., Kalinichenko O.V., Kalinichenko V.O., Pysmennyi S.V. Influence of technological parameters of compensation chambers on its stability and quality of extracted ore

Purpose. A theoretical substantiation of the optimal shapes and sizes of compensation chambers, determination of their stability and influence on the quality of the mined ore mass. Ukraine occupies a leading position in the world in the production of iron ore. The vast majority of rich steel ores are mined underground. It has been established that with an increase in the depth of development, the productivity of mines decreases, and the quality of the mined ore mass deteriorates. The prerequisite is the deterioration of the mining and geological conditions of the development of deposits. The extraction of rich iron ores is characterized by significant losses and clogging of the ore, reaching, in some cases, 14-20% and 12-18%, respectively. These loss indicators are a consequence of the fact that the work is carried out with outdated equipment and technologies. In this work, improved forms of compensation chambers are investigated and proposed, which allow increasing the volume of compensation space, obtaining purer ore and improving the quality of the extracted raw materials.

Research methods. Functional analysis of the requirements of the world metallurgical industry for the quality of iron ore underground mining in the mines of Ukraine. Modeling of a rock mass by the end element method (FEM) using the specialized computer program Ansys 2021-P2.

Scientific novelty. New dependences of the influence of the shape of compensation chambers on their stability, technological parameters and quality of the mined ore have been established.

Practical significance. The use of highly stable compensation chambers will increase their volume, which increases the amount of seized pure ore, reduce its clogging and achieve an increase in the quality of the mined ore mass, which will have a positive effect on increasing its price and competitiveness of marketable products.

Results. It has been proven that the vertical compensation chamber of a trapezoidal shape has the highest resistance, which will be stable in the range of all considered depths (1400-2000 m) even in ores of low strength and stability. Vertical compensation chambers and vaulted chambers have somewhat less stability, where fallouts of varying intensity will take place in the lower part of outcrops in low-strength ores at depths of more than 1750 m.

Key words: iron ore, underground mining, compensation chambers, stress-strain state, stability, quality.

УДК 004.4:622.142:622.271

Зеленський О.С., Лисенко В.С. Розробка програмного забезпечення повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів на рудних родовищах з використанням об'ємної інтерполяції

Мета. Розробка методики та програмного забезпечення повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів з використанням моделювання денної поверхні кар'єру та вперше запропонованої об'ємної інтерполяції для рудних родовищ.

Методи дослідження. Методика реалізації повного підрахунку запасів методом вертикальних перерізів складається з наступних етапів: обробка свердловин детальної розвідки; побудова поверхонь кар'єру на початок і кінець відпрацювання; отримання контурів вертикальних перерізів; оконтурювання (визначення площ і якісних показників типів руд) в вертикальних перерізах; повний підрахунок запасів.

Наукова новизна. Вперше запропоновано використання об'ємної інтерполяції у 3D-просторі. По кожному вертикальному перерізу формується контур відпрацювання, який покривається інтерполяційною сіткою. Кожен вузол сітки визначається у 3D просторі відносно найближчих кернів свердловин сфери заданого радіусу пошуку. Це дозволяє

підвищити оперативність та точність розрахунків. Такий підхід дозволяє враховувати рельєф поверхонь на відміну від кубічних моделей, які застосовуються у стандартних закордонних пакетах.

Практична значимість. Запропонована методика реалізації методів вертикальних перерізів для повного підрахунку запасів, яка може бути використана на кар'єрах Криворізького басейну. Вона представлена на прикладі кар'єру Південного ГЗКа. Відповідне програмне забезпечення може бути використано на родовищах зі складною структурою.

Результати. У якості інструментарію з розробки програмного забезпечення вибрано мову C++ на базі бібліотеки MFC інтегрованого середовища Microsoft Visual Studio 2019. Для обробки баз даних використано технологію ADO, для роботи з 3D-графікою – відкриту графічну бібліотеку OpenGL. Крім того, розроблено 3D-модуль аналізу кожного вузла сітки відносно найближчих кернів свердловин та організоване поповнення результуючої інформації по довільним профілям кар'єру, які задаються двома параметрами: відстань між профілями та кут нахилу. Це дає можливість порівняти результати при різних параметрах кутів та відстані між профілями та оцінити отримані результати.

Ключові слова: B-сплайн, NURBS-поверхня, повний підрахунок запасів, інтерполяція, OpenGL.

Zelensky O.S., Lysenko V.S. Development of software for complete calculation of reserves by the method of vertical sections in ore deposits using volume interpolation

Purpose. Development of a methodology and software for a complete calculation of reserves by the method of vertical sections using the modeling of the day surface of the pit and the first proposed volumetric interpolation for ore deposits.

Research methods. The method of implementing a complete calculation of reserves by the method of vertical sections consists of the following stages: processing wells of detailed exploration; construction of quarry surfaces at the beginning and end of working; obtaining contours of vertical sections; contouring (determination of areas and quality indicators of ore types) in vertical sections; complete inventory count.

Scientific novelty. The use of volumetric interpolation in 3D space is proposed for the first time. On each vertical cross-section, a working contour is formed, which is covered with an interpolation grid. Each node of the grid is defined in 3D space relative to the nearest well cores of the sphere of the given search radius. This makes it possible to increase the efficiency and accuracy of calculations. This approach allows you to take into account the relief of surfaces, unlike the cubic models that are used in standard foreign packages.

Practical significance. The method of implementation of vertical cross-section methods for the complete calculation of reserves, which can be used in quarries of the Kryvyi Rih Basin, is proposed. It is presented on the example of the quarry of the Southern GZK. Appropriate software can be used in deposits with a complex structure.

Results. The C++ language based on the MFC library of the Microsoft Visual Studio 2019 integrated environment was chosen as the software development toolkit. The ADO technology was used for database processing, and the OpenGL open graphics library was used for working with 3D graphics. In addition, a 3D analysis module of each grid node relative to the nearest well cores has been developed and the resulting information replenishment is organized according to arbitrary profiles of the pit, which are set by two parameters: the distance between the profiles and the angle of inclination. This makes it possible to compare the results with different parameters of the angles and distance between the profiles and evaluate the obtained results.

Key words: B-spline, NURBS-surface, full stock count, interpolation, OpenGL

УДК 621.62-1+62-93+681.6

Yarova I. A., Tsyvinda N. I., Yarovy Yu. V., Bondar O. A. The analysis of working environment in operation of 3d printers for fused deposition modelling

Purpose. The creation of safe working environment and the overall environmental footprint of 3D printing process is the relevant issue for the industry and other fields of human activity. The urgency of the research is due to the need to explore the working environment in operation of 3D printers for fused deposition modelling technology (FDM) as one of the most widespread.

Research methods. General theoretical methods (analysis, generalization, synthesis) are used in the study.

Scientific novelty. A comprehensive analytical study of occupational safety of 3D printing as a manufacturing process of processing materials was carried out. It reveals that despite of the digital focus of 3D printing, it is a mistake to apply to it the requirements of safety related only to digital technologies. The negative effects of the equipment for FDM-based 3D printing are of low intensity, but under condition of long-term impact they can have a cumulative effect.

Practical significance. The study identifies hazardous and harmful factors of working environment and the labor process, generated in FDM-based 3D printing with two of the most common type of plastic: ABS and PLA. Harmful chemicals emitted during the printing process by these plastics and their effects are considered. The means of collective protection both for the professional operators and for surrounding persons are suggested.

Results. Hazardous and harmful production factors inherent in fused deposition modelling technology as a method for processing materials were considered. The preference of using PLA plastic for 3D printing in the non-production sphere is substantiated. The suggestions on occupational safety to optimize working environment for FDM-based 3D printing are represented.

Key words: 3D printing, fused deposition modelling, ABS plastic, PLA plastic, occupational safety, working environment, hazardous and harmful production factors, harmful chemical

Ярова І. А., Цивінда Н. І., Яровий Ю. В., Бондар О. А.

Аналіз умов праці при експлуатації 3D принтерів для технології пошарового наплавлення

Мета. Створення безпечного робочого середовища та загальний рівень екологічності процесу 3D друку є актуальним питанням для промисловості та інших сфер людської діяльності. Актуальність дослідження обумовлена необхідністю вивчення робочого середовища при експлуатації 3D принтерів для технології пошарового наплавлення (FDM) як однієї з найбільш розповсюджених. Метою дослідження є ідентифікація небезпечних та шкідливих виробничих факторів 3D друку за технологією пошарового наплавлення та оцінка їх рівнів з метою подальшого зниження виробничих та екологічних ризиків.

Методи досліджень. У дослідженні використовуються загальні теоретичні методи (аналіз, узагальнення, синтез).

Наукова новизна. Проведено комплексне аналітичне дослідження виробничої безпеки 3D друку як технологічного процесу обробки матеріалів. Показано, що незважаючи на діджитал-орієнтованість 3D друку, помилковим є обмежуватися і не застосовувати до нього вимоги безпеки, пов'язані лише з цифровими технологіями. Негативні впливи, утворювані устаткуванням для 3D друку моделей, мають невисоку інтенсивність, але в умовах тривалої дії можуть мати накопичувальний ефект.

Практичне значення. Виявлено небезпечні та шкідливі фактори робочого середовища та трудового процесу, що утворюються під час 3D-друку за технологією FDM двома найпоширенішими типами пластику: ABS та PLA. Розглянуто шкідливі речовини, що виділяються в процесі друку цими пластиками та їх впливи на людину. Запропоновано засоби колективного захисту для професійних операторів і для оточуючих осіб.

Результати. Розглянуто небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що характерні для технології пошарового наплавлення як методу обробки матеріалів. Обґрунтовано перевагу використання пластику PLA для 3D друку в невиробничій сфері. Представлені пропозиції щодо безпеки праці для оптимізації робочого середовища для 3D друку за технологією FDM.

Ключові слова: 3D друк, технологія пошарового наплавлення, пластик ABS, пластик PLA, безпека праці, робоче середовище, небезпечні та шкідливі виробничі фактори, шкідливі речовини, повітря робочої зони

УДК [330.4:004]:378.22

Ковальчук В.А., Ковальчук Т.М.

Застосування методу динамічного програмування при виконанні магістерських кваліфікаційних робіт з економіки

Мета. Підвищення якості підготовки магістрів з економіки в системі вищої освіти ґрунтується не тільки на глибокому засвоєнні фахових, але й фундаментальних дисциплін. Саме практичне застосування набутих знань з математичного програмування при виконанні кваліфікаційних робіт з економіки дозволяє вирішувати конкретні виробничі завдання в умовах невизначеності та ризику прийняття рішень. Тому вільне володіння оптимізаційними методами, зокрема методом динамічного програмування, є необхідною передумовою досягнення поставленої мети.

Методи дослідження. В статті використана багаторівнева методологія пізнання за рівнем загальності, а саме загальнонауковий та частковий методи наук. Зокрема, при аналізі сучасних наукових напрацювань з проблеми застосування оптимізаційних методів використані методи аналізу і узагальнення. Методи емпіричного дослідження використано при встановленні взаємозв'язків між показниками виробничо-господарської діяльності суб'єктів господарювання і параметрами функціонування їх структурних підрозділів. Методи оптимізації застосовано при розробці найбільш ефективної програми відновлення та заміни екскаваторного парку, при розподілі інвестицій у розвиток підприємства та при розподілі заохочувального фонду стимулювання робітників цеху технологічного автотранспорту.

Наукова новизна досліджень полягає у поширенні уявлень про області застосування методу динамічного програмування з вирішення прикладних завдань при підготовці магістрів з економіки і виконанні кваліфікаційних робіт.

Практична значимість результатів дослідження, викладених у статті, полягає у посиленні фахових компетентностей, які набувають магістри в процесі навчання і виконання кваліфікаційної роботи. Ці компетентності дозволяють ставити та вирішувати конкретні виробничі завдання з використанням методів динамічного програмування, що в сучасних умовах виробничої та економічної діяльності підприємств є актуальними. Важливим елементом є можливість впровадження результатів дослідження у діяльність базових підприємств гірничо-металургійного комплексу, які є системоутворюючими і у значній мірі формують регіональний та державний бюджети.

Результати. Сутність одержаних результатів полягає у кваліфікаційній складовій підготовки магістрів з економіки і виробничій, де вони можуть самореалізуватися і показати вміння застосовувати одержані знання і навички з оптимізації та оцінки виробничих завдань з найбільшою ефективністю.

Ключові слова: економіка, магістрант, кваліфікаційна робота, економіко-математичне моделювання, динамічне програмування, ефективність

Kovalchuk V.A., Kovalchuk T.M. Application of the dynamic programming method when performing the qualification work for the master of economic sciences

Purpose. Improving the quality of master's training in economics in the system of higher education is based not only on the deep learning of professional, but also fundamental disciplines. It is the practical application of the acquired knowledge of mathematical programming, when performing qualification works in economics, that allows solving specific production tasks in conditions of uncertainty and risk of decision-making. Therefore, fluency in optimization methods, in particular the method of dynamic programming, is a necessary prerequisite for achieving the set goal.

Research methods. The article uses a multi-level methodology of cognition at the level of generality, namely, general scientific and partial methods of sciences, in this way, in the analysis of modern scientific developments on the problems of applying optimization methods of the used method of analysis and generalization. Empirical research methods were used to establish relationships between the indicators of production and economic activity of business entities and the parameters of the functioning of their structural subdivisions. Methods of optimization are used in the development of the most effective program for the restoration and replacement of the excavator fleet, in the distribution of investments in the development of the enterprise, and in the distribution of the incentive fund for the stimulation of employees of the technological motor vehicle workshop.

Scientific novelty. Spreading ideas about the areas of application of the dynamic programming method for solving applied problems in the preparation of master's degrees in economics and the performance of qualification works.

Practical significance of the research results presented in the article lies in the strengthening of professional competences acquired by masters in the process of training and performance of qualification work. These competencies allow you to set and solve specific production tasks using dynamic programming methods, which are relevant in modern conditions of production and economic activity of enterprises. An important element is the possibility of implementing the research results in

the activities of the basic enterprises of the mining and metallurgical complex, which are system-forming and to a large extent form the regional and state budgets.

Results. The gist of the obtained results lies in the qualification component of the master's training in economics and production, where they can realize themselves and show the ability to apply the acquired knowledge and skills in the optimization and evaluation of production tasks with the greatest efficiency.

Key words: economics, master, qualification work, economic-mathematical modeling, dynamic programming, efficiency

УДК 622.684: 622.271

Пахомов В.І., Гірін І.В. Оптимізація режиму роботи автотранспорту глибоких кар'єрів

Мета. Розробка методу енергетичної оцінки та практичних рекомендацій щодо зниження енергоємності транспортних систем глибоких кар'єрів за рахунок підвищення інтенсивності використання технологічних автосамоскидів шляхом оптимізації та вдосконалення планування їх продуктивності в конкретних умовах залізрудних кар'єрів.

Методи дослідження. У роботі використано методи статистичного та кореляційно-регресійного аналізу, аналітичні розрахунки, виконано узагальнення опублікованих теоретичних розробок. Наукові положення, висновки та рекомендації обґрунтовані аналізом досвіду планування продуктивності технологічних автосамоскидів на залізрудних кар'єрах; достатнім обсягом експериментальних досліджень із оцінкою точності результатів за критеріями математичної статистики; збіжністю результатів теоретичних досліджень із результатами дослідно-промислових випробувань; ефективністю впровадження на кар'єрах Криворізького басейну норм змінної продуктивності та рекомендацій щодо раціональних умов продуктивної експлуатації технологічних автосамоскидів, розроблених на основі виконаних досліджень.

Наукова новизна роботи полягає у: - розробці диференційованого методу вибору параметрів доріг, залежно від просторового розвитку поля кар'єра та вантажності автосамоскида; - встановленні схеми утворення раціональних профілів кар'єрних автошляхів; - створення нової методології для оцінки значущості та ступеня впливу факторів, що визначають економічність інформаційної панелі автомобілів на основі положень теорії планування екстремальних експериментів та дозволяють передбачити ресурсозбереження транспортних засобів в динаміці технічних умов експлуатації.

Практична значимість. Підвищенні продуктивності автотранспорту на кар'єрах Криворізького басейну за рахунок застосування: - зон ефективної роботи автотранспорту в кар'єрі залежно від його вантажопідйомності, удосконалення приводу трансмісії та рівня технічного стану автосамоскидів; - раціональних параметрів поздовжніх профілів автомобільних з'їздів; - підвищення надійності та точності планування змінної роботи транспортних засобів.

Результати. В результаті проведених теоретичних досліджень встановлено, що при застосуванні автосамоскидів великої вантажності раціональним поздовжнім профілем для автодоріг глибоких кар'єрів є увігнутий, який забезпечує швидкість руху навантажених автомобілів-самоскидів на 2-5% вище, ніж прямо похилий та на 3-9% вище, ніж опуклий.

Ключові слова: кар'єрний автосамоскид, поздовжній профіль, умови експлуатації

Pakhomov V.I., Hirin I.V. Optimization of the operation mode of deep pit vehicles

Purpose. To develop a method of energy assessment and practical recommendations for reducing the energy intensity of transport systems of deep pits by increasing the intensity of the use of technological dump trucks by optimizing and improving their productivity planning in the specific conditions of iron ore pits.

Research methods. Statistical and correlation-regression analysis, analytical calculations, and summarizes the published theoretical developments. Scientific provisions, conclusions and recommendations are based on the analysis of the experience of planning the productivity of technological dump trucks at iron ore quarries; a sufficient volume of experimental studies with an assessment of the accuracy of the results according to the criteria of mathematical statistics; convergence of the results of theoretical studies with the results of experimental and industrial tests; the effectiveness of the implementation of variable productivity norms and recommendations on rational conditions for the productive operation of technological dump trucks, developed on the basis of completed research, at the quarries of the Kryvyi Rih Basin.

Scientific novelty. Development of a differentiated method of selecting road parameters, depending on the spatial development of the quarry field and the load capacity of the dump truck; establishment of a scheme for the formation of rational profiles of career highways; creation of a new methodology for assessing the significance and degree of influence of factors that determine the economy of the information panel of cars based on the provisions of the theory of planning extreme experiments and allow predicting the resource saving of vehicles in the dynamics of technical operating conditions.

Practical significance. Increasing the productivity of motor vehicles in the quarries of the Kryvyi Rih basin due to the use of zones of efficient operation of motor vehicles in the quarry depending on its carrying capacity, improvement of the transmission drive and the level of technical condition of dump trucks; rational parameters of the longitudinal profiles of the car ramps; increasing the reliability and accuracy of planning the variable operation of vehicles.

Results. It was established that when using heavy-duty dump trucks, the rational longitudinal profile for highways in deep pits is concave, which ensures the speed of loaded dump trucks by 2-5% higher than straight inclined and 3-9% higher than convex.

Key words: quarry dump truck, longitudinal profile, operating conditions

UDC 524.382

Shvets D.V., Karabut N.O. Use the power of Arduino simulators to improve the effectiveness of IoT educating

Purpose. This paper aims to explore the role of Arduino simulators in IoT training, especially in distance learning, and to comprehensively analyze the functionality and benefits of these virtual tools.

Research methods. A combination of literature review and analysis of popular Arduino simulators by studying their advantages and disadvantages in the context of IoT learning.

Scientific novelty. An in-depth examination of the advantages of Arduino simulators as a powerful tool for teaching IoT in a distance learning environment. Providing a comprehensive analysis of their functionality and integration strategies, the importance of these virtual platforms in IoT education is justified.

Practical significance. The benefits of Arduino simulators are to demonstrate IoT education in distance learning environments. The analysis can contribute to developing effective strategies for using these virtual tools in IoT education. The potential of Arduino simulators for facilitating access to quality education and training of skilled professionals in the field of information technology is also highlighted.

Results. The study demonstrates the effectiveness of Arduino simulators in improving the quality of IoT education in distance learning. Through a detailed analysis of their functionality and benefits, the paper demonstrates the potential of these virtual platforms in developing interactive and dynamic learning experiences. The study highlights the applicability of Arduino simulators for facilitating teacher-student interaction, enhancing collaborative project development and experience sharing, and facilitating assessment of learning achievements.

Key words: Arduino simulators, IoT education, virtual platforms, pedagogical strategies, distance learning, blended learning
Швець Д.В., Карабуг Н.О. Використання можливостей симуляторів Arduino для підвищення ефективності навчання IoT

Мета. Вивчення ролі симуляторів Arduino в навчанні IoT, особливо в рамках дистанційного навчання, а також всебічний аналіз функціональності та переваг цих віртуальних інструментів.

Методи досліджень. У статті використано поєднання огляду літератури, аналізу популярних симуляторів Arduino, вивчення їхніх переваг і недоліків у контексті навчання IoT. Даний аналіз дає можливість підійти до використання переваг симуляторів та до вирішення проблем, з якими стикаються викладачі та студенти в умовах дистанційного навчання.

Наукова новизна. Поглиблений розгляд переваг симуляторів Arduino як потужного інструменту для навчання IoT в умовах дистанційного навчання. Надаючи всебічний аналіз їхньої функціональності та стратегій інтеграції, обґрунтовується важливість цих віртуальних платформ в IoT-освіті.

Практична значимість. Демонстрація переваг симуляторів Arduino для навчання IoT, особливо в умовах дистанційного навчання. Проведений аналіз може сприяти розробці ефективних стратегій використання цих віртуальних інструментів в IoT-освіті. Також підкреслюється потенціал симуляторів Arduino для спрощення доступу до якісної освіти та підготовки кваліфікованих фахівців у галузі інформаційних технологій.

Результати. Дослідження демонструє ефективність симуляторів Arduino в підвищенні якості освіти в галузі IoT в рамках дистанційного навчання. Завдяки детальному аналізу їхньої функціональності та переваг, стаття демонструє потенціал цих віртуальних платформ у розвитку інтерактивного та динамічного досвіду навчання. Дослідження підкреслює застосовність симуляторів Arduino для спрощення взаємодії викладачів і студентів, підвищення можливостей колективного розроблення проектів та обміну досвідом, спрощення оцінювання навчальних досягнень.

Ключові слова: симулятори Arduino, IoT-освіта, віртуальні платформи, педагогічні стратегії, дистанційне навчання, змішане навчання.

УДК 621.771.001

Чубенко В.А., Сaitгарсєв Л.Н., Ярош Т.П., Хіноцька А.А. Дослідження впливу режимів обтиснення на витрати енергії при холодному прокатуванні тонких листів

Мета. Дослідити процес холодного прокатування тонких сталевих листів за допомогою інженерної програми DEFORM 3D для визначення енергосилових параметрів обробки та встановити раціональні режими прокатування для підвищення енергоефективності процесу обтиснення.

Методи дослідження. Для дослідження процесів, що відбуваються при виготовленні тонкого листа зі сталевих матеріалів методом холодного прокатування, було виконано моделювання з використанням комп'ютерної програми DEFORM 3D, яка дозволяє точно визначити технологію холодного прокатування та витрати енергії на процес. Під час моделювання було створено модель процесу холодної обробки тонкого листа; задані початкові дані, режими обтиснення і температура обробки, параметри руху прокатних валків та оброблюваної смуги, коефіцієнт тертя; обрано матеріал заготовки і встановлено його властивості. Визначено тип об'єктів моделювання, де встановлено, що інструмент має жорсткий тип, а оброблюваний матеріал – пластичний. Головним призначено верхній прокатний валок. При моделюванні процесу холодного прокатування листового матеріалу використовувався аналіз Лагранжа. Було визначено кількість кроків моделювання, яка дорівнювала 100. Обробка відбувалася у системі SI.

Наукова новизна. Вперше отримані аналітичні залежності для визначення енергосилових параметрів холодного прокатування тонких сталевих листів за допомогою моделювання процесу методом дискретних елементів

Практична значимість. Визначено раціональні режими обробки металу для удосконалення технологічного процесу холодного прокатування тонких листів.

Результати. Виконано дослідження процесу пластичної деформації матеріалу за криволінійною сіткою, визначено поле векторних переміщень і встановлено, що максимальне переміщення сталевих матеріалів здійснюється під дією верхнього прокатного валка, досліджено розподіл напружено-деформованого стану оброблюваного матеріалу і визначено максимальні напруження в зоні деформації. Вивчено розподіл зусиль прокатування і крутного моменту, що дозволило визначити їхні максимальні значення, які спостерігаються на 7-9 секунд обробки. В подальшому величина цих показників зменшується через зникнення захоплюваних сил і встановлюється сталий процес холодного прокатування.

Ключові слова: моделювання, осередок деформації, прокатний валок, тонкий лист, холодна прокатка, витрати енергії, комп'ютерна програма

Chubenko V.A., Saitharieiev L.N., Khinotska A.A., Yarosh T.P. Study of reduction patterns impact on energy consumption during cold rolling of thin sheets

Purpose. Study the process of cold rolling of thin steel sheets by means of DEFORM 3D engineering software to determine process energy and power parameters and identify efficient rolling patterns to improve energy efficiency of reduction process.

Research methods. Modeling in DEFORM 3D software, enabling accurate determination of cold rolling technology and energy consumed within the process, was performed to study the processes that happen during cold rolling of thin steel sheets. Within the modeling, a model of cold-processed thin sheet was created; initial data, reduction patterns, processing temperature, movement parameters of mill roll and processed strip were set, as well as friction coefficient; billet material was selected and its properties were specified. Types of simulation objects were determined, showing that the tool was rigid-type while processed material was plastic. The upper roll was assigned the main. Lagrange's analysis was applied to model the process of cold rolling of sheet product. The number of modeling steps was set to 100. Processing was performed in SI system.

Scientific novelty. Obtained analytical dependencies for determination of energy and power parameters of cold rolling of thin steel sheets by means of process modeling using discrete component method.

Practical significance. Identified efficient metal-processing patterns to improve technological process of cold rolling of thin sheets.

Results. Studied the process of material plastic deformation using curvilinear grid, determined the field of vector displacements and found that the maximum displacement of steel material happens under the action of upper roll, studied distribution of stress-strain state of processed material and determined the maximum stresses in the deformation zone. Checked distribution of rolling forces and torque, which enabled to determine their maximum values observed at the 7-9th second of processing. Later on, the value of these indicators decreases due to lack of pushing forces, and a stable cold rolling process occurs.

Key words: modeling, deformation zone, mill roll, thin sheet, cold rolling, energy consumption, software.

УДК 669.162.26

Шмельцер К.О., Кормер М.В., Кассім Д.О., Ляхова І.А. Керування якістю коксу для стабілізації його металургійних властивостей

Мета. Підвищення показників якості коксу при обмеженні переведення доменного коксу у відсів (зниження втрат доменного коксу) за рахунок установки оптимального кута нахилу безперервно або періодично працюючого відкритого або закритого промислового циліндричного похилого барабана-стабілізатора, який забезпечує необхідне число обертів для механічної обробки коксу.

Методи дослідження. Механічна обробка коксу у барабані Мікум.

Наукова новизна. Запропоновано спосіб механічної обробки доменного коксу для поліпшення вихідних показників його якості M_{25} , M_{10} і класу >80 мм у промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі. Запропонований агрегат може замінити валковий грохот та використовуватися на коксових сортувальнях в доменному або коксовому цехах для підвищення холодних показників якості коксу для доменної плавки.

Практична значимість. Перевагою та відмінністю методу є те, що кут нахилу барабана-стабілізатора до горизонту і кількість його обертів вибирають з оптимального числа обертів випробувального барабана Мікум по динаміці поліпшення вихідних показників якості коксу за кожен 1-2 оберти барабана з урахуванням сум добуток показників якості на коефіцієнти впливу кожного показника і на величину питомої витрати коксу в доменній печі. Кількість обертів барабана-стабілізатора обмежують величиною втрат коксу для доменної плавки, не допускаючи збільшення класу <25 мм більше 3,0-3,5% від вихідної величини.

Результати. Використання процесу механічної обробки кусків коксу дозволяє не тільки стабілізувати властивості коксу, а й істотно поліпшити їх аж до отримання заданих, бажаних показників гранулометричного складу, міцності і стійкості до тертя. Вибір раціональних параметрів технології стабілізації показників якості коксу в промисловому циліндричному похилому барабані-стабілізаторі з урахуванням недопущення великих втрат доменного коксу дозволяє значно знизити собівартість чавуну в доменній плавці.

Ключові слова: технологічні властивості вугільної шихти, коксування, доменний кокс, гранулометричний склад, дробимість, стиранистість, барабан-стабілізатор.

Shmeltser K.O., Kormer M.V., Kassim D.O., Lyakhova I.A. Coke quality management for its stabilization metallurgical properties

Purpose. The improvement of the initial indexes of its quality M_{25} , M_{10} and class >80 mm in continuous or periodically working open or closed industrial cylindrical oblique stabilizer drum.

Research methods. Mechanical processing of coke in drum Mikum.

Scientific novelty. The method of mechanical treatment of blast furnace coke is proposed, which includes the improvement of the initial indexes of its quality M_{25} , M_{10} and class >80 mm in industrial cylindrical oblique stabilizer drum.

Practical significance. The advantage and difference of the method is that the angle of inclination of the drum-stabilizer to the horizon and the number of its revolutions is chosen from the optimum number of revolutions of the test drum Mikum on the dynamics of improving the initial indicators of coke quality for every 1-2 revolutions of the drum, taking into account the sums of the products of the coefficients of indices each indicator and the amount of specific consumption of coke in the blast furnace, and the number of revolutions of the drum-stabilizer limit the loss of blast furnace coke not more than 3.0-3.5% of the original value.

Results. The choice of rational parameters of the technology of stabilization of coke quality indices in an industrial cylindrical oblique stabilizer drum, taking into account the high losses of blast furnace coke, can significantly reduce the cost of cast iron in blast furnace.

Key words: technological properties of coal batch, coking technology, coke, granulometric composition, indices of resistance of coke abrasion and crushability, drum-stabilizer.

Олійник Т.А., Румницький Д.О., Складар Л.В. Сегрегація частинок при гравітаційній сепарації мінеральних агрегатів у водному середовищі

Мета. Аналіз механізмів сегрегації у процесі гравітаційної сепарації руди для розробки методики проведення досліджень із встановлення закономірностей процесу розділення частинок на похилій поверхні гвинтових сепараторів, які засновані на особливостях розшарування зернистого матеріалу в залежності від крупності та щільності частинок.

Методи дослідження. Узагальнення, аналіз науково-технічної інформації стосовно сегрегації частинок у гравітаційних сепараторах різного типу для дослідження процесу розшарування та концентрації частинок у потоці пульпи, що дозволить створити оптимальні умови розділення мінеральних зерен за крупністю та щільністю на похилій поверхні гвинтового сепаратору.

Наукова новизна. Запропоновано механізм розділення частинок на похилій поверхні гвинтових сепараторів, який на відміну від існуючих, враховує гідродинамічні та відцентровані сили, співвідношення яких міняється в залежності від зміння швидкості течії пульпи та перерозподілу концентрації мінеральних зерен різної крупності.

Практична значимість. Розроблено методику проведення досліджень гравітаційного збагачення магнетитових кварцитів в умовах АТ «ПІВДГЗК» з урахуванням особливостей сегрегації мінеральних частинок, їх агрегатів на похилій поверхні гвинтового сепаратору.

Результати. В умовах АТ «Південний ГЗК» на секції №5 РЗФ-1 на однозахідному гвинтовому сепараторі проведено попереднє тестування проміжних продуктів з визначенням їх гранулометричного складу, щільності пульпи, масової частки заліза у продуктах розділення. Досліджено режим розділення за щільністю живлення (1150-1350 г/л). В результаті проведених досліджень отримано промпродукти магнітної сепарації першої стадії, в яких підвищено масову частку заліза загального на 3,6-9,8 % – з 47,7-48,7% до 51,3-58,5%. З пісків II стадії класифікації, з масовою часткою заліза загального 49,8-53,2 % за рахунок застосування гвинтової сепарації отримано товарні продукти з масовою часткою заліза загального 65,5-68,4 %.

Ключові слова. сегрегація, розшарування, сепарація гравітаційна, розділення, крупність, щільність, потік, сепаратор гвинтовий

Oliinyk, T.A., Rumnytskyi D.O., Skliar L.V. Segregation of particles during gravity separation of mineral aggregates in an aqueous environment

Purpose. To explore the segregation mechanisms in the gravity separation of ore and create research methods to uncover the laws of particle separation on spiral separators through studying the impact of particle size and density on granular material stratification.

Research methods. Literature overview and generalization, analysis of scientific and technical literature regarding the segregation of particles in gravity separators of various types to study the process of stratification and concentration of particles in the pulp flow. That will create optimal conditions for separating mineral grains by size and density on the inclined surface of the screw separator.

Scientific novelty. A mechanism for separating particles on the inclined surface of spiral separators is proposed, unlike the existing ones, considering both hydrodynamic and centrifugal forces. The ratio of these forces changes depending on the change in the pulp flow rate and the redistribution of the concentration of different-sized mineral grains.

Practical significance. The method of carrying out studies of gravity separation of magnetite quartzites in the conditions of PIVDGZK JSC, considering the peculiarities of the segregation of mineral particles and their aggregates on the inclined surface of the spiral separator, has been developed.

Results. Preliminary testing of intermediate products with the determination of their granulometric composition was carried out in the conditions of PIVDGZK JSC at section No. 5 of RZF-1 on a one-way spiral separator, pulp density, iron grade in separation products. Investigated the separation method based on feed density (1150-1350 g/l). Research results included: increased total iron grade in the first magnetic separation stage by 3.6-9.8% (from 47.7-48.7% to 51.3-58.5%). Obtained commercial products with a total iron grade of 65.5-68.4% from second-stage classification sands (49.8-53.2% total iron) through spiral separation.

Key words. Segregation, stratification, gravity separation, separation, coarseness, density, flow, spiral separator.

Моркун В. С., Моркун Н. В., Гапоненко А. А., Бобров Є. Ю. Методи формування ультразвукових хвиль у практиці безконтактних неруйнівних вимірювань

Мета. Аналіз методів формування ультразвукових хвиль для вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні використання електромагнітних ультразвукових перетворювачів та визначенні їх можливої конфігурації для вимірювання характеристик феромагнітних гірських порід.

Практичне значення полягає в тому, що використання електромагнітних ультразвукових перетворювачів запропонованої конструкції дозволить створити вимірювальну систему для мінералогічного аналізу феромагнітних руд для функціонування якої не потрібен контакт з досліджуваним середовищем.

Результати. У практиці ультразвукових вимірювань найбільшого поширення знайшли п'єзоелектричні та електромагнітні перетворювачі (ЕМАТ). Ці перетворювачі можуть працювати, як у режимі генерації ультразвуку, так і як його детектор, відрізняються порівняно невеликим споживанням енергії та малими габаритами, перекривають широкий частотний діапазон і здатні формувати різні види ультразвукових хвиль. Вимірювальні системи з ЕМАТ мають усі переваги ультразвукових вимірювань у порівнянні з іншими методами неруйнівного контролю. Як і з п'єзоелектричними датчиками, за допомогою ЕМАТ можуть бути реалізовані різні методи вимірювань: ехо-імпульсні, з танга-

жем, наскрізною передачею та ін. Порівняльна характеристика та аналіз різних методів генерації та прийому ультразвуку дозволяють зробити висновок про те, що при реалізації акустичних вимірювань характеристик ферромагнітної руди доцільно використовувати електромагнітні перетворювачі ЕМАТ з високоенергетичною імпульсною системою збудження без статичного магнітного зміщення. Це дозволить проводити вимірювання без фізичного контакту між перетворювачем та випробуваним зразком та простіше генерувати різні типи ультразвукових хвиль. Для спрощення налаштування геометрії вимірювального каналу та збільшення його функціональних можливостей, ЕМАТ можуть бути виконані з використанням технології фазованих решіток.

Ключові слова: ультразвук, вимірювання, електромагнітний перетворювач, руда, аналіз

Morkun V.S., Morkun N.V., Haponenko A.A., Bobrov Ye.Yu. Methods of ultrasonic wave generation in the practice of non-destructive measurements

Purpose. To analyze the methods of ultrasonic wave generation for measuring the characteristics of ferromagnetic rocks.

Research methods. The methods of analysis of domestic and foreign experience, as well as methods of mathematical statistics and probability theory were used to form an assessment of the research results.

Scientific novelty. The substantiation of the use of electromagnetic ultrasonic transducers and the determination of their possible configuration for measuring the characteristics of ferromagnetic rocks.

Practical meaning. The use of electromagnetic ultrasonic transducers of the proposed design will allow to create a measuring system for the mineralogical analysis of ferromagnetic ores, which does not require contact with the test medium.

Results. In the practice of ultrasonic measurements, piezoelectric and electromagnetic acoustic transducer (EMATs) are the most widely used. These transducers can operate both in the mode of ultrasound generation and as its detector, are characterized by relatively low power consumption and small dimensions, cover a wide frequency range, and are capable of generating various types of ultrasonic waves. Measuring systems with EMAT have all the advantages of ultrasonic measurements compared to other non-destructive testing methods. As with piezoelectric sensors, various measurement methods can be realized with EMAT: echo-pulse, pitch, through-transmission, etc. Comparative characterization and analysis of various methods of ultrasound generation and reception allow us to conclude that when implementing acoustic measurements of ferromagnetic ore characteristics, it is advisable to use EMAT electromagnetic transducers with a high-energy pulse excitation system without static magnetic displacement. This will allow measurements to be made without physical contact between the transducer and the test sample and will make it easier to generate different types of ultrasonic waves. To simplify the tuning of the measuring channel geometry and increase its functionality, EMATs can be made using phased array technology.

Key words: ultrasound, measurement, electromagnetic acoustic transducer, ore, analysis.

УДК 336.67.1

Турило А.М., Короленко Р.В., Святенко С.В. Фінансовий результат: сутність і оцінка його інноваційної складової для підприємств залізничної промисловості Кривбасу з позиції змісту фінансової діяльності

Мета. Метою є дослідження категорії «фінансовий результат підприємства» з позиції її сутності відносно змісту фінансової діяльності, яка визначена в національних стандартах бухгалтерського обліку і розробка на цій основі теоретико-методичних підходів щодо оцінювання інноваційно-якісної складової отриманого на підприємстві фінансового результату.

Методи дослідження. Результати і наукові положення, наведені у статті отримані з використанням певних методів (різних за напрямом і масштабом охоплення предмету дослідження): узагальнення результатів попередніх досліджень, комплексного аналізу та синтезу, логіко-структурного й логіко-динамічного аналізу, науково-аналітичний, порівняння й аналогії, економіко-математичний тощо.

Наукова новизна. Досліджено сутність фінансового результату підприємства з позиції його ув'язки зі змістом категорії «фінансова діяльність підприємства», що визначена в національних стандартах бухгалтерського обліку.

Вперше запропоновано і розроблено теоретико-методичні підходи до визначення величини інноваційно-якісної складової фінансового результату підприємства від його фінансової діяльності.

Практична значимість. Представлений матеріал виступає значним методичним підґрунтям у процесі комплексного аналізу, оцінки, планування й управління фінансовою діяльністю підприємства. Запропонована в роботі методика дозволяє оцінити фінансовий результат підприємства, по-перше, суто з фінансових позицій, а по-друге, розрахувати в загальній величині фінансового результату підприємства його інноваційно-якісну складову.

Результати. Ключовим результатом виконаного авторами дослідження є методика, що дозволяє оцінити інноваційно-якісні чинники відносно фінансової діяльності підприємства шляхом виявлення їх впливу на загальну величину фінансового результату підприємства. Визначено питому вагу інноваційно-якісних чинників фінансової діяльності для гірничо-збагачувальних комбінатів Криворізького регіону. Зазначено, що фінансовий результат і його конкретизація в показнику плати за фінансовий ресурс (капітал) є важливою складовою і важливим підґрунтям до визначення іншого поняття й іншого показника, що характеризують фінансову діяльність підприємства.

Ключові слова: фінансовий результат підприємства, інноваційно-якісна складова, фінансова діяльність, оцінка, інновації, вартість капіталу

Turilo A.M., Korolenko R.V., Svyatenko S.V. Financial result: the essence and assessment of its innovative component for enterprises of the iron ore industry of Kryvyi Rih in terms of the financial activity content

Purpose. To study "the financial result of an enterprise" as a category in terms of its essence about the content of the financial activity, which is defined in the national accounting standards, and to develop on this basis theoretical and methodological approaches to assessing the innovative and qualitative component of the financial result obtained at the enterprise.

Research methods. The results and scientific provisions presented in the article were obtained using the following research methods: summarising the results of previous studies, comprehensive analysis and synthesis, logical-structural and logical-dynamic analysis, scientific-analytical, comparison and analogy, economic and mathematical, etc.

Scientific novelty. The essence of the financial result of an enterprise is studied from the point of view of its connection with the content of the category "financial activity of an enterprise" defined in national accounting standards. For the first time, theoretical and methodological approaches to determining the value of the innovation-quality component of the financial result of an enterprise from its financial activity are proposed and developed.

Practical significance. The presented material serves as a significant methodological basis in the comprehensive analysis, evaluation, planning and management of financial activities of an enterprise.

The methodology proposed allows assessment of the financial result of an enterprise primarily from a financial perspective and calculation of its innovation and quality component in the total value of the financial result of an enterprise.

Results. The methodology allows to assess the innovative and qualitative factors in relation to the financial activity of an enterprise by identifying their impact on the total value of the financial result of an enterprise.

The share of innovative-quality factors of financial activity for mining and processing enterprises in the Kryvyi Rih region has been determined.

It is noted that the financial result and its specification in the indicator of payment for a financial resource (capital) is an important component and an important basis for defining another concept and another indicator that characterise the financial activity of an enterprise.

Key words: financial result of an enterprise, innovation and quality component, financial activity, evaluation, innovation, cost of capital

УДК 658.562:622.012

Швагер Н.Ю., Нестеренко О. В., Перчун Ю. С., Багашова Н.В. Оцінка ефективності виробничого контролю на гірничодобувних підприємствах

Мета. Метою даної статті є дослідження структури ризику та його вплив на ефективність виробничого контролю на гірничодобувному підприємстві для розробки організаційних методів, реалізація яких дозволить скоротити ризик травмування та підвищити результативність роботи персоналу.

Методи дослідження. У статті використано загальнонаукові методи дослідження. За основу при проведенні дослідження було покладено системний підхід. Проаналізовано показники, що характеризують ефективність заходів з охорони праці для забезпечення допустимої тяжкості праці. Структурування ризику травмування працівників гірничодобувного підприємства за даною ознакою дозволяє встановити три види ризику травмування операційного персоналу. Встановлено характерні ризики для гірничодобувних підприємств, що виникають у технічній, технологічній, організаційній, управлінській та економічній системах. Для усунення ризиків, обумовлених недоліками організаційної системи підприємства, необхідно застосовувати методи, що ґрунтуються на системних рішеннях.

Наукова новизна. Можна стверджувати, що управління ризиками вимагає диференційованого підходу, оскільки методи організації та здійснення виробничого контролю підприємства достатні для роботи з фоновим ризиком травмування та доданим індивідуальним ризиком, і недостатні для роботи з доданим ризиком.

Практична значимість. Оскільки система виробничого контролю націлена на дотримання вимог промислової безпеки та охорони праці та об'єктом її контролю є порушення вимог безпеки, то для підвищення ефективності системи виробничого контролю запропоновано класифікація ризику травмування працівників.

Результати. Проведено аналіз причин травмування операційного персоналу. Встановлено, що методи здійснення виробничого контролю достатні для роботи з фоновим ризиком травмування та доданим ризиком, зумовленим порушеннями через низьку кваліфікацію та дисципліну працівника, і недостатні для роботи з доданим ризиком, обумовленим порушеннями вимог безпеки через системні дефекти. Необхідно застосування диференційованого підходу до ризику травмування операційного персоналу для підвищення результативності системи виробничого контролю гірничодобувного підприємства.

Ключові слова: виробничий травматизм, аналіз, контроль, безпека праці, ризик, порушення, контроль

Shvager N.Yu., Nesterenko O.W., Perchun Yu. S., Bahashova N.W. Assessment of the effectiveness of production control at mining enterprises

Purpose. To study the structure of risk and its impact on the effectiveness of production control at a mining enterprise for the development of organizational methods, the implementation of which reduces the risk of injury and increase the effectiveness of personnel.

Research methods. The article uses general scientific research methods based on a systematic approach. Indicators characterizing the effectiveness of occupational health and safety measures to ensure acceptable labor intensity were analyzed. Structuring the risk of injury to employees of a mining enterprise based on this feature allows establishing three types of risk of injury to operational personnel. Specific risks for mining enterprises arising in technical, technological, organizational, management and economic systems have been established. To eliminate risks caused by the shortcomings of the enterprise's organizational system, it is necessary to apply methods based on system solutions.

Scientific novelty. It can be argued that risk management requires a differentiated approach, because the methods of organization and implementation of production control of the enterprise are sufficient to work with the background risk of injury and added individual risk, and are insufficient to work with added risk.

Practical significance. Since the production control system is aimed at compliance with the requirements of industrial safety and occupational health and the object of its control is the violation of safety requirements, the classification of the risk of injury to workers is proposed to increase the efficiency of the production control system.

Results. An analysis of the causes of injury to operating personnel was carried out. It has been established that the methods of implementing production control are sufficient to work with the background risk of injury and the added risk caused by violations due to the low qualification and discipline of the employee, and are insufficient to work with the added risk caused by violations of safety requirements due to system defects. It is necessary to apply a differentiated approach to the risk of injury to operational personnel in order to increase the effectiveness of the production control system of the mining enterprise.

Key words: industrial injuries, analysis, control, occupational safety, risk, violation, control

УДК 658.589.1

Турило А.М., Турило А.А., Короленко Р.В., Короленко С.М. Методологія комплексного оцінювання інноваційного розвитку і його фінансово-економічний аспект на прикладі підприємств гірничо-збагачувального профілю

Мета. Метою є удосконалення методології комплексного оцінювання інновацій, інноваційних заходів та інноваційного розвитку в цілому з врахуванням їх впливу на фінансово-економічні аспекти розвитку будь-якого суб'єкта господарювання (підприємства) і здійснити таку оцінку за окремими показниками на прикладі підприємств гірничо-збагачувального профілю.

Методи дослідження. Результати і наукові положення, наведені у статті отримані з використанням певних методів (різних за напрямом і масштабом охоплення предмету дослідження): узагальнення результатів попередніх досліджень, комплексного аналізу та синтезу, логіко-структурного й логіко-динамічного аналізу, науково-аналітичний, порівняння й аналогії тощо.

Наукова новизна. Виявлено недосконалість існуючих в економічній літературі підходів до оцінювання інновацій та інноваційного розвитку, як явища на рівні суб'єкта господарювання і запропоновано з цього приводу сукупність показників і критеріїв, які відрізняються комплексністю та системністю, мають пріоритетність в оцінюванні процесу інноватизації та дозволяють класифікувати інноваційний розвиток підприємств за типами.

Практична значимість. Представлена авторами методологія оцінювання інноваційного розвитку є універсальною і може бути прийнята до використання будь-яким суб'єктом господарювання.

Запропонована система показників і критеріїв оцінки інноваційного розвитку є достатньо простою, і в той же час достатньо ефективною, для практичного використання в загальній оцінці діяльності суб'єкта господарювання.

Запропонована система оцінки інноваційного розвитку суб'єкта господарювання може бути легко адаптована в систему планування й управління суб'єктом господарювання.

Результати. Визначено підходи і розроблено комплексну систему показників і критеріїв щодо комплексного оцінювання інновацій, інноваційних заходів й інноваційного розвитку будь-якого суб'єкта господарювання, які відображають головні характеристики інновацій. За критеріальний показник для класифікації типів інноваційного розвитку підприємства рекомендується показник «питома вага інноваційних чинників у розвитку підприємства».

Ключові слова: оцінка, інновації, інноваційний розвиток, показники, типи інноваційного розвитку, суб'єкти господарювання, комплексне оцінювання

Turilo A.M., Turilo A.A., Korolenko R.V., Korolenko S.M. Methodology for Comprehensive Assessment of Innovative Development and its Financial and Economic Aspect on the Example of Mining and Processing Enterprises

Purpose. To improve the methodology of a comprehensive assessment of innovations, innovative measures, and innovative development in general, taking into account their impact on the financial and economic aspects of the development of a business entity (enterprise) and to carry out such an assessment by individual indicators on the example of mining and processing enterprises.

Research methods. Generalisation of the results of previous studies, comprehensive analysis and synthesis, logical-structural and logical-dynamic analysis, scientific-analytical, comparison and analogy.

Scientific novelty. The imperfection of the existing approaches in the economic literature to assessing innovation and innovative development as a phenomenon at the level of an economic entity is revealed and a set of indicators and criteria is proposed in this regard, which are complex and systematic, have priority in assessing the process of innovation and allow classifying the innovative development of enterprises by type.

Practical significance. The methodology for assessing innovation development presented is universal and can be used by any business entity. The proposed system of indicators and criteria for assessing innovation development is simple and effective for practical use in the overall assessment of the business entity's activities.

The proposed system for assessing the innovative development of an enterprise can be easily adapted to the planning and management system of an enterprise.

Results. Approaches have been identified and a comprehensive system of indicators and criteria for a comprehensive assessment of innovations, innovative activities, and innovative development of any business entity has been developed, which reflect the main characteristics of innovations. The indicator of "share of innovative factors in the development of enterprise" is recommended as a criterion indicator for classifying types of innovative development of enterprise.

Key words: assessment, innovation, innovative development, indicators, types of innovative development, business entities, integrated assessment.

УДК 622.7: 534

Моркун В. С., Моркун Н. В., Гапоненко А. А., Бобров Є. Ю. Моделювання процесів гірничого виробництва із застосуванням характеристик акустичної емісії енергоємної контактної взаємодії

Мета. Моделювання процесів гірничого виробництва, як контактної взаємодії породоруйнівного органу з середовищем, на прикладі буріння свердловин із застосуванням енергетичних характеристик технологічних агрегатів та параметрів акустичної емісії.

Методи дослідження. У роботі використані методи аналізу вітчизняного та зарубіжного досвіду, методи математичного моделювання та кепстрального аналізу, а також методи математичної статистики і теорії ймовірності для формування оцінки результатів дослідження.

Наукова новизна полягає в обґрунтуванні застосування кепстральної технології обробки енергетичного спектру акустичної емісії енергоємної контактної взаємодії для визначення фізико-механічних властивостей гірської породи в процесі буріння свердловин.

Практичне значення полягає у формуванні та аналізі комбінації інформативних характеристик процесу буріння свердловин для підвищення якості його моделювання та керування.

Результати. Проблема підвищення якості моделей та ефективності процесу буріння свердловин пов'язана з дослідженням методу оперативного визначення чи уточнення (бажано безпосередньо в процесі буріння) фізико-механічних властивостей гірських порід, що складають родовище, яке розробляється. Метою моделювання процесу буріння є встановлення залежності режимних параметрів бурової установки та характеристик гірської породи, які б дозволили сформулювати оптимальну з точки зору витрат швидкість проходки. Важливим етапом вирішення цієї задачі є вибір і аналіз інформативних параметрів, що характеризують процес. Для моделювання енергоємної контактної взаємодії породоруйнівного органу з гірською породою при бурінні свердловин використано комплекс енергетичних характеристик процесу та акустичної емісії. Для кількісної оцінки характеристики акустичної емісії застосовується технологія кепстрального аналізу, яка базується на результатах побудови дискретних значень часового ряду вимірювань амплітуди коливань. Розрахунково-аналітична модель забезпечує визначення обмеженої кількості результатуючих сплесків енергії, рознесених по осі кепстрального часу. Отриманий результат не залежить від форми акустичного сигналу, його фази та напрямів поширення у досліджуваному середовищі. Модель реалізована за допомогою адаптивної нейро-нечіткої структури ANFIS, що навчається. Наведений метод може бути використаний також для оцінки стану бурового обладнання.

Ключові слова: контактна взаємодія, буріння свердловин, енергетичні характеристики, акустична емісія, кепстр.

Morkun V. S., Morkun N. V., Gaponenko A. A., Bobrov Ye. Yu. Modelling of mining production processes with the use of acoustic emission characteristics of energy-intensive contact interaction

Purpose. To model the processes of mining production as a contact interaction of the working tool with the environment, on the example of well drilling using the energy characteristics of technological units and acoustic emission parameters.

Research methods. The paper uses methods of analyzing national and international experience, methods of mathematical modelling and cepstral analysis, as well as methods of mathematical statistics and probability theory to form an assessment of the research results.

Scientific novelty. The substantiation of the use of the cepstral technology for processing the energy spectrum of acoustic emission of energy-intensive contact interaction to determine the physical and mechanical properties of rock.

Practical significance. The formation and analysis of a combination of informative characteristics of the well drilling process to improve the quality of its modelling and control.

Results. The problem of improving the quality of models and the efficiency of the well drilling process is associated with the study of a method for prompt determination or refinement (preferably directly during drilling) of the physical and mechanical properties of the rocks that make up the field being developed. The purpose of modelling the drilling process is to establish the dependence of the operating parameters of the drilling rig and the characteristics of the rock, which would allow to form the optimal rate of penetration in terms of costs. An important step in solving this problem is the selection and analysis of informative parameters that characterize the process. To model the energy-intensive contact interaction of a rock-breaking tool with rock during well drilling, a set of energy characteristics of the process and acoustic emission was used. To quantify the acoustic emission characteristics, the technology of cepstral analysis is used, which is based on the results of constructing discrete values of the time series of oscillation amplitude measurements. The computational and analytical model provides for the determination of a limited number of resulting energy bursts spaced along the cepstral time axis. The result obtained does not depend on the shape of the acoustic signal, its phase and propagation direction in the medium under study. The model is implemented using the adaptive learning neuro-fuzzy structure ANFIS. This method can also be used to assess the condition of drilling equipment.

Key words: contact interaction, well drilling, energy characteristics, acoustic emission, cepstral

УДК 331.56; 656.13

Цопа В.А., Чеберячко С.І., Дерюгін О.В., Пищикова О.В. Особливості оцінки ризику дорожньо-транспортної пригоди при автомобільних перевезеннях

Мета. Розробка методу для оцінки ризиків дорожньо-транспортної пригоди при виконанні автомобільних перевезень.

Методи дослідження. Використано методом "Краватка-Метелик", який дозволяє врахувати на появу небезпечної події всі зовнішні та внутрішні небезпечні (безпечні) чинники, які можуть як збільшити, так і зменшити вірогідність небезпечної події. Для ранжування небезпечних чинників застосовано метод "Decision Making Trial and Evaluation" (далі - Dematel), який базується на парних інструментах порівняння та прийняття рішень на основі теорії графів.

Наукова новизна. Запропоновано механізм для визначення найвпливовіших небезпечних чинників, який встановлюється за умови, що рівень впливу небезпечного чинника, який отримується виходячи з розрахунку матриці кінцевого впливу методом Dematel є більшим за 20 % встановленого максимального значення.

Практична значимість. Запропоновано восьми кроковий алгоритм з розрахунку ризику настання дорожньо-транспортної пригоди.

Результати. Розроблений реєстр небезпечних чинників, які включають шість типів факторів: людський, організаційний, технічний, операційний, соціальний, ергономічний та збільшують вірогідність настання небезпечної події дорожньо-транспортної пригоди. Запропоновано алгоритм для оцінки професійних ризиків водіїв автомобіля, який складається з восьми основних кроків, перші три присвячені процедурі ідентифікації небезпек, небезпечних чинників та ранжуванню останніх для виявлення чинників, які є причинами настання небезпечної події й тих, які будуть наслідками перших. Проведено оцінку професійних ризиків водія автомобіля, в якій виявлено, що основними небезпечними чинниками, які впливають на настання дорожньої пригоди є брак навичок розуміння системи та навичок прийняття рішення, недбалість дотримання перевіроч безпеки на різних етапах роботи маніпулятора, відсутність ефективного контролю за безпекою праці та відсутність належного передрейсового медичного контролю стану водія, усунення яких значно зменшить рівень ризику під час перевезення.

Ключові слова: водій, безпека, професійний ризик, метод DEMATEL

Tsopa V.A., Cheberyachko S.I., Deryugin O.V., Pyshchykova O.V. Features of road accident risk assessment in vehicle transportation

Purpose. Development of a method for assessing the risks of a traffic accident during road transport.

Research methods. The "Bowtie-Butterfly" method is used, which allows to take into account all external and internal dangerous (safe) factors that can both increase and decrease the probability of a dangerous event. The "Decision Making Trial and Evaluation" (hereinafter - Dematel) method, which is based on paired comparison and decision-making tools based on graph theory, is used to rank dangerous factors.

Scientific novelty. A mechanism for determining the most influential dangerous factors is proposed, which is established under the condition that the level of influence of the dangerous factor, which is obtained based on the calculation of the final impact matrix by the Dematel method, is greater than 20% of the established maximum value.

Practical significance. An eight-step algorithm for calculating the risk of a traffic accident is proposed.

Results. A register of dangerous factors has been developed, which includes six types of factors: human, organizational, technical, operational, social, ergonomic, and increase the likelihood of the occurrence of a dangerous traffic accident. An algorithm for assessing the professional risks of car drivers is proposed, which consists of eight main steps, the first three are devoted to the procedure of identifying hazards, dangerous factors and ranking the latter to identify factors that are the causes of the occurrence of a dangerous event and those that will be the consequences of the first. An assessment of the professional risks of the car driver was carried out, in which it was found that the main dangerous factors that affect the occurrence of a road accident are a lack of system understanding skills and decision-making skills, negligence in observing safety checks at various stages of the manipulator's work, lack of effective control over occupational safety and lack of proper pre-trip medical control of the driver's health, the elimination of which will significantly reduce the level of risk during transportation.

Key words: driver, safety, professional risk, DEMATEL method

УДК 621.316.925

Пироженко А.В., Модло Е.О., Шерстньов Ю.В. Мінімізація електричного потенціалу корпусу кар'єрного екскаватора при позаштатному торканні його ковшем контактної дроти

Мета. У статті розглянуто стан, необхідність та пропонуємо авторське рішення щодо способу зменшення електричного потенціалу корпусу екскаватора, котрий грузить видобуту гірничу масу в думкари при торканні його ковшем контактної дроти кар'єрної тягової електромережі з напругою живлення 10 кВ змінного струму.

Методи дослідження. В основі способу зменшення потенціалу запропоновано пристрій багаторазової дії з безконтактним тиристорним ключем.

Наукова новизна. Для захисту тиристорного ключа, з метою збільшення його стійкості від можливих амплітудних імпульсів перенапруги, запропоновано структурне включення в схему пристрою конденсатора, ємкість якого вибирається за умови, що за час включення тиристора напруга на ньому не повинна перевищувати максимально допустимий рівень за умови пробою тиристора, тобто повинна бути менше імпульса перенапруги.

Практична значимість. З метою недопущення негативного впливу конденсатора на процес відключення живлення при контакті і ковш екскаватора-контактна мережа запропоновано метод вибору відповідного рівня ємкості, що, в свою чергу, дозволяє визначити мінімально необхідне його значення, котре не буде впливати на швидкодію пристрою. Згідно необхідності дотримання відповідних пунктів правил безпеки в якості критерія відповідності взято той факт, що пристрій повинен витримувати струм короткого замикання, котрий потенційно може протікати через корпус екскаватора під час несанкціонованого торкання його ковшем контактної дроти на протязі часу спрацювання на відключення вимикача фідера тягової підстанції котра живить дану ділянку тягової мережі. Для цього, а також з метою запобігання виходу з ладу силових комутуючих тиристорів відповідного ключа від струмів коротких замикань, пропонується паралельне включення двох тиристорів в кожному його плечі з максимально допустимим значенням середнього струму не менше 1 кА.

Результати. Пропонуємо схемотехнічне рішення дозволяє пристрою захисту забезпечити необхідний рівень швидкодії – до $30 \cdot 10^{-6}$ с., що відповідає нормам електробезпеки.

Ключові слова: електробезпека, екскаватор, тягова електрична мережа, пристрій, захист, кар'єр

Pyrozhenko A.V., Modlo E.O., Sherstniyov Yu.V. Minimising the electrical potential of the excavator body when the bucket touches the contact wire in an unauthorised manner

Purpose. To discuss the current state, necessity, and proposed authorial solution for reducing the electric potential of the excavator body that loads mined material into dump trucks when its bucket touches the contact wire of the quarry power grid with a voltage of 10 kV AC.

Research methods. The proposed method for reducing the potential is based on a device with a non-contact thyristor switch that operates repeatedly.

Scientific novelty. To protect the thyristor switch and increase its stability from possible amplitude surges, the inclusion of a capacitor in the device's circuit is proposed, whose capacity is selected on the condition that during the thyristor's turn-on time, the voltage on it should not exceed the maximum permissible level for thyristor breakdown, i.e., it should be less than the surge pulse.

Practical significance. In order to prevent the negative impact of the capacitor on the power-off process during contact between the excavator bucket and the contact network of the traction electrical network, a method for selecting an appropriate capacitance level is proposed, which in turn allows determining the minimum necessary value that will not affect the device's performance. In accordance with the need to comply with safety regulations, the criterion for compliance is the device's ability to withstand short-circuit current potentially flowing through the excavator body when its bucket contacts the contact wire during the time it takes for the feeder switch of the traction substation that powers the given section of the traction network to trip. To achieve this, and to prevent the power switching thyristors of the corresponding key from being damaged by short-circuit currents, it is proposed to parallel connect two thyristors in each branch with a maximum permissible average current value of no less than 1 kA.

Results. The proposed circuit solution allows the protection device to provide the necessary response time - up to $30 \cdot 10^{-6}$ s, which meets electrical safety standards.

Key words: electrical safety, excavator, traction electrical network, device, protection, quarry

УДК 622.34: 658.38

Лапшин О.Є., Коваленко С.Л. Підвищення безпеки праці при обслуговуванні майданчика вивантаження руди та ремонті конусних дробарок в кар'єрі

Мета. Зниження впливу шкідливих та небезпечних виробничих факторів на робочих місцях ремонтно-технологічного персоналу, підвищення безпеки праці під час ремонту конусних дробарок в кар'єрі.

Методи дослідження. Наукове узагальнення і аналіз літературних джерел, промислові дослідження, використання прийнятих законодавчих актів, настанов і виконання регламентованих положень з безпеки праці в гірництві.

Наукова новизна. Наведено наукове обґрунтування параметрів системи коагуляції рудникового пилу гідродисперсним аерозолем у вигляді туману та способу механізованого очищення приймального бункера з використанням пневмогідролічної щітки.

Практичне значення полягає в розробці куполоподібного укриття, обладнаного системою утворення гідродисперсного аерозолу над приймальним бункером дробарки для запобігання виділення пилу та механізованого способу очищення приймального бункера конусної дробарки за допомогою пневмогідролічної щітки. В проєкті організації робіт розроблені заходи, що дозволяють зменшити забруднення повітря, поліпшити умови праці і підвищити рівень безпеки на промисловому майданчику вивантаження гірської маси в кар'єрі.

Економічна доцільність від впровадження розроблених комплексних заходів полягає у зменшенні грошових витрат, пов'язаних з простоем основного виробничого обладнання.

Технічний результат від використання запропонованих заходів полягає в поліпшенні умов праці на території промислового майданчика вивантаження гірської маси та підвищення безпеки при ремонті конусних дробарок в кар'єрі.

Результати. Розроблено проєкт куполоподібного укриття, обладнаного системою утворення гідродисперсного аерозолу над приймальним бункером дробарки.

Розроблено механізований метод очищення приймального бункера конусної дробарки від шару налиплої гірничої маси з використанням пневмогідролічної щітки.

Розроблено проєкт організації робіт, який містить опис технології виконання робіт та комплекс організаційно-технічних заходів, спрямованих на поліпшення умов праці та підвищення безпеки під час виконання робіт з ремонту конусних дробарок в кар'єрі.

Визначена економічна доцільність впровадження розроблених заходів у виробництво.

Ключові слова: безпека, майданчик, конусна дробарка, приймальний бункер, забруднення повітря

Lapshyn O.Ye., Kovalenko S.L. Improving labor safety during the maintenance of the ore unloading site and the repair of cone crushers in the quarry

Purpose. Reducing the impact of harmful and dangerous production factors at the workplaces of repair and technological personnel, improving occupational safety during the repair of cone crushers in the quarry.

Research methods. Scientific generalization and analysis of literary sources, industrial research, use of adopted legislative acts, guidelines and implementation of regulated provisions on labor safety in mining.

Scientific novelty. Scientific substantiation of the parameters of the system of coagulation of mine dust with hydrodispersed aerosol in the form of fog and the method of mechanized cleaning of the receiving hopper with the use of a pneumohydraulic shield is provided.

Practical significance. The development of a dome-shaped shelter equipped with a hydrodispersion aerosol formation system over the receiving hopper of the crusher to prevent the release of dust and a mechanized method of cleaning the receiving hopper of the cone crusher using a pneumohydraulic brush. In the work organization project, measures have been developed to reduce air pollution, improve working conditions and increase the level of safety at the industrial site of unloading rock mass in the quarry. The economic expediency of the implementation of the developed complex measures consists in reducing the monetary costs associated with the downtime of the main production equipment. The technical result of the use of the proposed measures is the improvement of working conditions on the territory of the industrial site of rock mass unloading and the improvement of safety during the repair of cone crushers in the quarry.

Results. A project of a dome-shaped shelter equipped with a hydrodispersing aerosol formation system over the receiving hopper of the crusher has been developed. A mechanized method of cleaning the receiving hopper of a cone crusher from a layer of sticky mining mass using a pneumohydraulic shield has been developed. A work organization project has been developed, which includes a description of the work performance technology and a set of organizational and technical measures aimed at improving working conditions and increasing safety during the repair of cone crushers in the quarry. The economic feasibility of implementing the developed measures into production is determined.

Key words: safety, site, cone crusher, receiving bunker, air pollution.

УДК 628.8

Савін В.В., Кіріченко П.С. Рекуператори як шлях підвищення ефективності систем механічної вентиляції в питанні енергозбереження будинків

Мета. Стаття присвячена вивченню рекуператорів у ролі забезпечення ефективності системи вентиляції в будинках з погляду енергозбереження. Метою є представлення результатів технічного огляду деяких видів рекуперативних припливно-витяжних систем механічної вентиляції, відповідно до концепції та класифікації на основі будови рекуператора і напрямку руху потоку повітря, які допомагають зменшити споживання енергії та, з точки зору санітарно-гігієнічних норм, повністю забезпечують баланс тепла і холоду, вуглекислого газу та кисню в будинку під час опалювального сезону.

Методи дослідження. Результати, наведені у статті, отримані з використанням методів, різних за напрямом і масштабом охоплення предмету дослідження: узагальнення результатів попередніх досліджень, комплексного аналізу, логіко-структурного аналізу, науково-аналітичного аналізу тощо.

Наукова новизна. Огляд типів рекуператорів тепла, їх переваг та недоліків, дозволяє систематизувати наявні дані та тенденції застосування у використанні рекуператорів у вентиляційних системах будинків, дає можливість фахівцям швидко ознайомитися з можливими варіантами в одному джерелі та допоможе дослідникам розширити основні типи рекуператорів.

Практична значимість. Представлена стаття виступає значним методичним підґрунтям при виборі найбільш ефективних рекуператорів тепла для припливно-витяжних систем вентиляції та надає змогу зрозуміти, який рекуператор краще підходить для конкретного типу будинку або приміщення залежно від особливостей, умов використання, вимог до якості повітря та енергоефективності. Викладена інформація допоможе визначитись з оптимальним типом рекуператора для будинку з вимогами до якості повітря та енергоефективності, що дозволить забезпечити максимально комфортні умови для проживання, та з формуванням порівняльної бази для розроблюваних конструкцій рекуператорів тепла вентиляційного повітря.

Результати. Наведено основні переваги та недоліки найбільш популярних на ринку України рекуператорів теплоти, що дозволяє підібрати оптимальний варіант для конкретної ситуації. Стаття буде корисною для будівельників, проєктувальників, інженерів та всіх, хто цікавиться ефективним використанням енергії та зменшенням витрат на опалення та кондиціонування приміщень.

Ключові слова: вентиляція, рекуператор, тепло, теплообмінник, енергоощадність, енергоефективність

Savin V.V., Kirichenko P.S. Recuperators as a way to improve the efficiency of systems mechanical ventilation systems in terms of energy saving in buildings

Purpose. To study recuperators ensuring the efficiency of the ventilation system in buildings in terms of energy saving; to present the results of a technical review of some types of recuperative supply and exhaust mechanical ventilation systems, in accordance with the concept and classification based on the structure of the recuperator and the direction of air flow, which help to reduce energy consumption and, from the point of view of sanitary and hygienic standards, fully ensure the balance of heat and cold, carbon dioxide and oxygen in the house during the heating season.

Research methods. The results presented in the article were obtained using methods that differ in the direction and scope of the subject matter: generalization of the results of previous studies, comprehensive analysis, logical and structural analysis, scientific and analytical analysis, etc.

Scientific novelty. A review of the types of heat recuperators, their advantages and disadvantages allows us to systematize the available data and trends in the use of recuperators in building ventilation systems, enables specialists to quickly familiarize themselves with possible options in one source, and will help researchers expand the main types of recuperators.

Practical significance. The presented article is a significant methodological basis for selecting the most efficient heat recuperators for supply and exhaust ventilation systems and allows us to understand which recuperator is best suited for a particular type of building or room, depending on the characteristics, conditions of use, air quality and energy efficiency requirements. The information presented will help to determine the optimal type of recuperator for a building with air quality and energy efficiency requirements, which will ensure the most comfortable living conditions, and to form a comparative basis for the development of ventilation air heat recovery designs.

Results. The main advantages and disadvantages of the most popular heat recovery units on the Ukrainian market are presented, which allows us to choose the best option for a particular situation. The article is useful for builders, designers, engineers, and anyone interested in efficient energy use and reducing the cost of heating and air conditioning.

Key words: ventilation, recuperator, heat, heat exchanger, energy saving, energy efficiency.

УДК 621.311.214: 622.5

Михайленко О.Ю., Сінчук І.О., Будніков К.В., Коломіц Г.В. До проблеми доцільності створення на базі головних водовідливних комплексів шахт пікових гідроакумуючих електростанцій

Мета. Мета роботи полягає в аналізі доцільності створення на базі головних водовідливних комплексів шахт пікових гідроакумуючих електростанцій (ПГАЕС) шляхом визначення рівня виробництва електроенергії гідротурбінами для різних витрат води через неї, обчислення собівартості генерації та встановлення умов, коли використання ПГАЕС буде виправданим з економічної точки зору, залежно від тарифу на електроенергію, що встановлює оператор розподілу, та поточного рівня енергоспоживання електроприймачами шахти.

Методи дослідження. Для проведення даного дослідження були використані такі методи: аналіз, систематизація, узагальнення – з метою вивчення та узагальнення досвіду побудови гідроакумуючих електростанцій з використанням водозбірників головних водовідливних комплексів шахт; синтез – для розробки моделі системи розосередженої генерації з гідроакумуючими електростанціями; комп'ютерне моделювання для визначення чисельних значень економічних показників роботи промислової енергосистеми при впровадженні у її структуру гідроакумуючих електростанцій.

Наукова новизна. Розроблено систему розосередженої генерації електроенергії в структурі енергосистем шахт, що використовує елементи головного водовідливного комплексу для побудови локальних пікових гідроакумуючих електростанцій.

Практична значимість. Результати можуть бути використані для покращення енергоефективності роботи наявних систем електропостачання гірничорудних підприємств, що видобувають залізорудну сировину.

Результати. Виконано аналіз доцільності створення на базі головних водовідливних комплексів шахт пікових гідроакумуючих електростанцій. При цьому розглядалися три різні конфігурації ПГАЕС у складі водовідливу шахти «Криворізька» АТ «Кривбасзалізрудком»: зі встановленням однієї гідротурбіни на горизонті 500 м, двох гідротурбін на тому ж горизонті 500 м, а також встановлення чотирьох гідротурбін – окремо по дві на горизонтах 500 м і 940 м, відповідно. З точки зору вартості електроенергії найсприятливішими умовами для впровадження системи розподіленої генерації продемонстрував випадок зі встановленням однієї гідротурбіни на горизонті 500 метрів. У такому випадку приведена вартість електроенергії перевищувала діючий тариф практично для всіх розглянутих умов функціонування, окрім випадків з дуже малими витратами води через гідроагрегат. Це зумовлюється оптимальним співвідношенням між, з одного

боку, капіталовкладеннями на придбання обладнання ПГАЕС та вартістю його обслуговування і планово-попереджувальних ремонтів, з іншого – рівнем покриття потреб споживачів згенерованою електроенергією.

Ключові слова: гірничорудне підприємство, енергосистема, розосереджена генерація, головний водовідливний комплекс, гідроакumuлююча електростанція, собівартість

Mykhaylenko O.Yu., Sinchuk I.O., Budnikov K.V., Kolomits H.V. On feasibility of creating peak pumped-storage hydro-power plants on the basis of the main drainage complexes of mines

Purpose. To analyze the feasibility of creating peak pumped-storage hydroelectricity power plants (PPSHPP) on the basis of the main water discharge complexes of mines by determining the power production by hydroturbines for various water flows through it, calculating the cost of generation and establishing the conditions when the use of PPSHPP will be justified from an economic point of view, depending on the tariff for power set by the distribution operator and the current level of energy consumption by the mine's power receivers.

Research methods. Analysis, systematization, generalization in order to study and generalize the experience of building pumped-storage hydroelectricity power plants using water reservoirs of the main drainage complexes of mines; synthesis for the development of a model of a distributed generation system with pumped-storage hydroelectricity power plants; computer modeling to determine the numerical values of the economic indicators of the industrial energy system when pumped-storage hydroelectricity power plants are introduced into its structure.

Scientific novelty. A system of distributed power generation in the structure of energy systems of mines has been developed, which uses elements of the main water discharge complex for the construction of local peak pumped-storage hydroelectricity power plants.

Practical significance. The results can be used to improve the energy efficiency of the existing power supply systems of mining enterprises that extract iron ore raw materials.

Results. An analysis of the feasibility of creating peak pumped-storage hydroelectricity power plants on the basis of the main water discharge complexes of mines was carried out. At the same time, three different configurations of the gas power plant were considered as part of the drainage of the mine "Kryvorizka" JSC "Kryvbaszalizrudkom": with the installation of one hydro turbine at a horizon of 500 m, two hydro turbines at the same horizon of 500 m, as well as the installation of four hydro turbines - two separately at horizons of 500 m and 940 m, respectively. From the point of view of the cost of electricity, the most favorable conditions for the implementation of the distributed generation system were demonstrated by the case of installing one hydro turbine at a horizon of 500 meters. In this case, the reduced cost of power exceeded the current tariff for almost all considered operating conditions, except for cases with very small water consumption through the hydro unit. This is due to the optimal ratio between, on the one hand, capital investments for the purchase of PPSHPP equipment and the cost of its maintenance and scheduled preventive repairs, on the other hand, the level of coverage of consumers' needs by the generated power.

Key words: mining enterprise, power system, distributed generation, main water discharge complex, pumped-storage hydro-electricity power plant, cost price.

УДК 622.8

Гацький А.К., Гацький І.А. Математичне моделювання повітрообміну в підземних камерах аварійного повітропостачання

Мета. Розробка та впровадження математичної моделі процесу повітрообміну для забезпечення відповідних умов життєдіяльності в підземних камерах аварійного повітропостачання, які відповідають санітарно-гігієнічним умовам праці.

Метод дослідження. При створенні математичної моделі застосовується комплексний метод, що передбачає структурний синтез, критичний аналіз і узагальнення літературних джерел, аналіз вітчизняного та зарубіжного досвіду, а також метод Бернуллі та застосовується задача Коші.

Наукова новизна. Запропонована математична модель дозволяє реалізувати процес управління аеродинамічними параметрами повітрообміну, а саме визначати кратність повітрообміну в камері аварійного повітропостачання в залежності від концентрації шкідливих газів, які надходять в КАПП. Математичне моделювання підтвердило основні показники здійснення повітрообміну в підземних камерах аварійного повітропостачання в певний час, та при певній концентрації. Створена математична модель повітрообміну в підземних камерах аварійного повітропостачання, яка дозволить не тільки спрогнозувати стан повітрообміну, але й розрахувати його ефективність.

Практична значимість. Впровадження математичного моделювання надасть можливість реалізувати ефективний повітрообмін як одну із головних складових мікроклімату в камерах аварійного повітропостачання, а також дозволяє прогнозувати належні умови праці при повітрообміні.

Результати. Розроблена математична модель надає можливість швидкого та точного розрахунку процесів повітрообміну і нормалізації мікроклімату для підземних камер аварійного повітропостачання, що дозволить підвищити рівень безпеки та нормалізації умов життєдіяльності робітників, які знаходяться в камері. Математично сформульовані і розроблені алгоритми структурної і параметричної ідентифікації повітрообміну в підземній КАПП шляхом обґрунтованого вибору структури повітряних потоків у вигляді моделей ідеального перемішування з їх корекцією по статистичним даним. Отримано аналітичні формули, які дозволяють реалізувати синтез систем управління повітрообміном підземної камери аварійного повітропостачання в такі властивості, які є обов'язковими для систем управління, як спостережливість, керованість і досяжність.

Ключові слова: математичне моделювання, повітрообмін, камера аварійного повітропостачання, мікроклімат, параметризація, концентрація, кратність, ефективність.

Hatskyi A.K., Hatskyi I.A. Mathematical modeling of air exchange in underground chambers of emergency air supply

Purpose. Development and implementation of a mathematical model of the air exchange process to ensure appropriate living conditions in the underground chambers of emergency air supply, meeting the sanitary and hygienic working conditions.

Research methods. When creating a mathematical model, a complex method is used, which provides for structural synthesis, critical analysis and generalization of literature sources, analysis of domestic and foreign experience, as well as the Cauchy problem and the Bernoulli method.

Scientific novelty. The proposed mathematical model allows to implement the process of control of aerodynamic parameters of air exchange, namely to determine the multiplicity of air exchange in the emergency air supply chamber depending on the concentration of harmful gases entering the underground chambers of emergency air supply (UCEAS). Mathematical modeling confirmed the main indicators of air exchange in the underground chambers of emergency air supply at a certain time and at a certain concentration. A mathematical model of air exchange in underground chambers of emergency air supply has been created, which allows not only to predict the state of air exchange, but also to calculate its efficiency.

Practical significance. The introduction of mathematical modeling will allow the implementation of efficient air exchange as one of the main components of the microclimate in emergency air supply chambers, and also allows predicting the appropriate working conditions for air exchange.

Results. The developed mathematical model makes it possible to quickly and accurately calculate the processes of air exchange and normalization of the microclimate for underground emergency air supply chambers, which will increase the level of safety and normalization of living conditions of workers in the chamber. Algorithms for structural and parametric identification of air exchange in the underground chamber of emergency air supply by reasoned selection of the structure of air flows in the form of ideal mixing models with their correction according to statistical data were mathematically formulated and developed. Analytical formulas have been obtained that allow to realize the synthesis of air exchange control systems of the underground emergency air supply chamber into such properties, which are mandatory for control systems, such as observability, controllability and reachability.

Key words: mathematical modeling, air exchange, emergency air supply chamber, microclimate, parameterization, concentration, multiplicity, efficiency.

УДК 691.32

Астахова Н. В., Астахов В. І. Дослідження властивостей бетонів на шлакових матеріалах раціональних модифікацій для одношарових конструкцій даху з теплим горищем та безрулонною покрівлею

Створення одношарової панелі даху з безрулонною покрівлею і теплим горищем з легкого бетону на пористих заповнювачах дозволить значно спростити технологію заводського виробництва конструкцій і підвищити їх експлуатаційну надійність.

Мета. Отримання шлакопемзобетону і шлакобетону, який задовольняє вимогам, що пред'являються до бетону одношарової панелі даху з теплим горищем і безрулонною покрівлею щодо міцності при стиску і водопроникнення, при відносно низьких значеннях коефіцієнта теплопровідності та щільності.

Методи дослідження. При дослідженнях були використані руйнуючі методи оцінки міцності при стиску бетону стандартних зразків та визначення водопроникнення за стандартною методикою. Також шлакопемзобетон досліджуваних структур був підданий випробуванню на водонепроникність при високих тисках.

Наукова новизна. Розроблені бетони на шлакових матеріалах раціональних модифікацій, які характеризуються показниками призмної міцності та модуля пружності, які перевищують нормативні значення, а також володіють підвищеними значеннями граничної розтяжності.

Практичне значення. Отримані шлакопемзобетон та шлакобетон зі зниженою водопроникністю, які мають високі значення міцності на розтяг при розколюванні, призмної міцності і модуля пружності. Все це визначає підвищену граничну розтяжність бетону на шлаковій пемзі в порівнянні з нормативними значеннями. Ці властивості є дуже важливими для бетону, що використовується в конструкціях даху з безрулонною кровлею та теплим горищем.

Результати. Розроблені та досліджені види шлакопемзобетону, які задовольняють вимогам, що пред'являються до бетону одношарової панелі даху з теплим горищем і безрулонною покрівлею щодо міцності при стиску і водопроникнення при відносно низьких значеннях коефіцієнта теплопровідності і щільності, характеризуються граничною розтяжністю і призмною міцністю, що перевищують нормативне значення.

Розроблений шлакобетон, який у віці 28 діб після пропарювання характеризується більш високими показниками міцності в порівнянні з дослідженими модифікаціями шлакопемзобетону та характеризується граничною розтяжністю, що значно перевищує нормативне значення.

Ключові слова: конструкції даху з безрулонною покрівлею над теплим горищем, шлакопемзобетон, шлакобетон, мелений гранульований шлак, вхідний ГЗК

Astakhova N. V., Astakhov V. I. Study of properties of rational modifications of slag concretes for single-layer non-roll roof structures with a warm attic

Creation of lightweight porous aggregate concrete panels for a single-layer non-roll roof with a warm attic significantly simplifies the technology for producing prefabricated structures and increase their operational reliability.

Purpose. Production of slag-pumice concrete and slag concrete that meet the requirements for concrete of a single-layer non-roll roof panel with a warm attic in respect of compressive strength, water permeability, thermal conductivity and density.

Research methods. Standard destructive methods for assessing compressive strength of standard concrete samples and determining water permeability are used in the course of the research. The slag-pumice concrete of the structures under study is also subjected to water impermeability tests at high pressures.

Scientific novelty. There have been developed rational modifications of slag concretes characterized by prismatic strength and the elasticity modulus exceeding the standard values, as well as increased tensile strength.

Practical significance. The obtained slag-pumice concrete and slag concrete possess reduced water permeability and high values of tensile splitting strength, prismatic strength, and elasticity modulus. All of the above determines the increased ultimate tensile strength of slag-pumice concrete compared to the standard values. These properties are of great importance for the concrete of non-roll roof structures with a warm attic.

Results. Slag-pumice concrete types have been developed and studied to meet the requirements of concrete for single-layer non-roll roof panels with warm attics in respect of compressive strength, permeability, thermal conductivity and density, and they are characterized by tensile strength and prismatic strength that exceed standard values.

After steaming, the developed 28-day-old slag concrete is characterized by higher strength indicators compared to the studied modifications of slag-pumice concrete and by ultimate tensile strength that significantly exceeds the standard value.

Key words: non-roll roof structures above a warm attic, slag-pumice concrete, slag concrete, ground granulated slag, mining waste

УДК 622.271

Біленко П.В., Єременко Г.І., Жуков С.О., Перегудов В.В. Перспективи та чинники застосування безпілотного роботизованого автотранспорту в кар'єрах України

Мета дослідження полягає в аналітичному огляді сучасного стану кар'єрного автотранспорту й ІТ-орієнтованих тенденцій щодо його подальшого розвитку в умовах глибоких залізрудних кар'єрів значної потужності з виділенням перспективних моделей, потенційно придатних до умов Кривбасу.

Методи дослідження. Актуальний та компаративний аналіз основних статистичних показників щодо гірничотранспортних систем найбільш масштабних відкритих гірничих розробок рудних родовищ з наступним прогнозуванням перспективності технічного переозброєння крупних залізрудних кар'єрів України в напрямку роботизованого рухомого складу.

Наукова новизна дослідження полягає в установленні сучасних тенденцій та закономірностей в еволюції кар'єрного автотранспорту зі зростанням глибини гірничих робіт.

Практична значимість: можливість прогнозування ефективності й обґрунтування параметричного діапазону технічного переозброєння вантажопотоків рудних кар'єрів при проектуванні розвитку їх глибоких горизонтів.

Результати. На підставі виконаного авторами аналізу стану транспортно-технологічних комплексів рудних кар'єрів аргументовано стверджується, що впровадження роботизованого автотранспорту у виробничі процеси залізрудних кар'єрів України є найбільш перспективним і реальним напрямком у технічному й економічному вирішенні питань удосконалення переміщення гірничої маси. Застосування роботизованих кар'єрних автосамоскидів забезпечує найбільш гнучку оптимізацію будь-якої внутрішньокар'єрної системи екскавації та транспортування гірських порід, проте, гірничодобувна галузь продовжує працювати з використанням звичайних автосамоскидів. В даний час неоднозначною альтернативою роботизованому автотранспорту стає навіть використання 300-тонних і більш потужних самоскидів у зв'язку з великими експлуатаційними витратами. Життєздатність застосування роботизованого автотранспорту полягає у ступені його економічності й безпеки. Це – ті переваги, які він забезпечує порівняно зі звичайною системою доставки за допомогою автомобільного транспорту, яку він має замінити. Аналіз останніх досліджень переконливо продемонстрував повністю виправдане відродження інтересу щодо транспортування гірничої маси в глибоких рудних кар'єрах роботизованим автотранспортом та технічні й економічні переваги даного напрямку одночасно зі зменшенням негативного впливу на навколишнє середовище за умов його реалізації.

Ключові слова: гірська порода, кар'єр, роботизований автосамоскид, кар'єрний транспорт

Bilenko P.V., Yeremenko G.I., Zhukov S.O., Peregudov V.V. Prospects and factors of the use of unmanned robotic vehicles in open-pit mining in Ukraine

Purpose. An analytical review of the current state of mining vehicles and IT-oriented trends in its further development in the conditions of deep iron ore pits of significant capacity with the choice of available models potentially suitable for the conditions of Kryvbas.

Research methods. Actual and comparative analysis of statistical indicators when using mining and transport systems in large-scale open-pit mining of ore deposits, followed by a forecast of the prospects for the technical re-equipment of large iron ore open-pit mining in Ukraine in a direct transition to robotic dump trucks.

Scientific novelty. The interpretation of modern trends and regularities in the evolution of open-pit mining transport with increasing depth of mining operations.

Practical significance. Forecasting the efficiency and substantiating the parametric range of technical re-equipment of cargo flows of ore open-pit mining when designing the development of their deep horizons.

Results. On the basis of the authors' analysis of the state transport and technological complexes of ore open-pit mining, it is argued that the introduction of robotic vehicles into the production processes of iron ore open-pit mining of Ukraine is the most promising and realistic direction in the technical and economic solution of improving the movement of mining mass. The use of robotic open-pit mining dump trucks provides the most flexible optimization of any intra-pit excavation and rock transportation system, however, the mining industry continues to operate using conventional dump trucks. Currently, even the use of 300-ton and more powerful self-dumpers is becoming an ambiguous alternative to robotic vehicles due to high operating costs. The viability of using a robotic vehicle lies in the degree of its economy. This is the advantage it provides over the conventional road delivery system it is meant to replace. The analysis of recent studies convincingly demonstrated a fully justified revival of interest in the transportation of mining mass in deep ore open-pit mining by robotic vehicles and the technical and economic advantages of this direction at the same time as reducing the negative impact on the environment under the conditions of its implementation.

Key words: rock, open-pit mining, robotic vehicles, open-cast transport.

УДК 621.313.33

Толмачов С. Т., Ільченко О. В. Підвищення енергоефективності асинхронних двигунів в Україні: стан, можливості та перспективи

Мета. Дослідження основних бар'єрів на шляху підвищення енергоефективності сучасного парку короткозамкнених асинхронних двигунів (АД) на фоні постійно зростаючої вартості електричної енергії та з урахуванням традиційних технологій, організаційно-правових обмежень та техніко-економічних можливостей.

Методи дослідження. Проаналізовані головні риси проблеми, сучасний стан парку АД та особливості їх експлуатації. Основний акцент зроблено важливому економічному аспекті проблеми – постійно зростаючій вартості електроенергії у загальному балансі витрат. Проаналізовано особливості енергетичної політики країн ЄС щодо впровадження

енергоефективних АД. На основі порівняння ККД короткозамкнених АД класів енергоефективності IE2, IE3 і вітчизняних АД серії AIR в діапазоні 0,75 – 375 кВт проілюстровано перевищення в 3-5 % в діапазоні потужностей 0-5 кВт енергоефективності двигунів провідних світових фірм у порівнянні з вітчизняними аналогами. Розглянуті альтернативні підходи до модернізації АД як часткового вирішення проблеми ресурсо- та енергозбереження. Обґрунтовано важливість розробки гнучкої системи визначення життєвого циклу АД та політики формування їх вторинного ринку. Як одне з пріоритетних завдань широкого моніторингу АД визначено розробку надійних і доступних методів встановлення реального навантаження двигунів в умовах експлуатації. Як пріоритетний рекомендовано використання тензорезисторних датчиків крутного моменту. Проаналізована також можливість використання альтернативних систем виміру моменту.

Наукова новизна полягає у формулюванні комплексу недостатньо досліджених, проблемних та дискусійних питань, що безпосередньо відносяться до АД і пов'язані з підвищенням їх енергоефективності.

Практична значимість роботи витікає із актуальності і масштабу проблеми, яка має всі ознаки загальнонаціональної.

Результати роботи полягають у визначенні основних бар'єрів на шляху підвищення енергоефективності парку АД та розробці шляхів їх усунення або пом'якшення. Сформульовано тезу, що зростання вартості електричної енергії гостро ставить на порядок денний питання зміни традиційних підходів до проблеми проектування та експлуатації АД, зокрема в частині надійного техніко-економічного обґрунтування доцільності їх використання в конкретних умовах експлуатації на основі базового критерія – максимуму ефективності перетворення енергії.

Ключові слова: асинхронний двигун, класи енергоефективності, модернізація, життєвий цикл, вторинний ринок, датчики крутного моменту.

Tolmachev S. T., Ilchenko O. V. Improving energy efficiency of asynchronous motors in Ukraine: state, possibilities, and prospects

Purpose. Investigate the main barriers to improving the energy efficiency of modern short-circuit asynchronous motors (AD) against the backdrop of constantly rising electricity costs, traditional technologies, organizational and legal constraints, and techno-economic opportunities.

Research methods. The main features of the problem, the current state of the AD park, and the peculiarities of their operation are analyzed. The main focus is on the important economic aspect of the problem - the constantly rising cost of electricity in the overall cost balance. The peculiarities of the energy policy of EU countries regarding the implementation of energy-efficient AD are analyzed. Based on a comparison of the efficiency of short-circuit AD classes IE2, IE3, and domestic AD series AIR in the range of 0.75 - 375 kW, the superiority in energy efficiency of motors of leading world companies over domestic analogs is illustrated by 3-5% in the power range of 0-5 kW. Alternative approaches to modernizing AD as a partial solution to resource and energy conservation issues are considered. The importance of developing a flexible system for determining the life cycle of AD and the policy of forming their secondary market is substantiated. The development of reliable and accessible methods for determining the real load of motors in operating conditions is identified as one of the priority tasks of wide monitoring of AD. The use of strain-gauge torque sensors is recommended as a priority. The possibility of using alternative torque measurement systems was also analyzed.

Scientific novelty lies in formulating a complex of insufficiently studied, problematic, and controversial issues directly related to asynchronous motors (AD) and their energy efficiency enhancement.

Practical significance of the work arises from the relevance and scale of the problem, which has all the features of a national one.

Results. Identified the main barriers to enhancing the energy efficiency of the AD fleet and developing ways to eliminate or mitigate them. The thesis is formulated that the increase in the cost of electricity sharply raises the issue of changing traditional approaches to the design and operation of AD, particularly in terms of reliable technical and economic justification for their use in specific operating conditions based on the basic criterion - maximum energy conversion efficiency.

Key words: asynchronous motor, energy efficiency classes, modernization, life cycle, secondary market, torque sensors.

УДК 550.834

Романенко А. О., Сидоренко В.Д. Проведення досліджень з визначення фізико-механічних властивостей гірських порід по сейсмічних сигналах та виявлення мікроруїнувань масиву Глеюватського кар'єру

Мета. Визначення оптимальних частотних діапазонів та чутливості сейсмотатчиків, що необхідні для виконання замірів фізичних параметрів стану гірського масиву та провести дослідження, спрямовані на виділення мікросейсмічних подій в межах досліджуваної ділянки. У статті розглядаються напрямки напрацювань відомих українських вчених в галузі сейсмічного контролю стану масиву та звукометричних методів для визначення фізико-механічних властивостей гірських порід, що займались питаннями мікросейсмічного та розглядається можливість визначення щільності та пружності гірських порід за допомогою аналізу мікросейсмічних сигналів.

Методи дослідження використовувались при виконанні досліджень наступні: для збору і аналізу звукової інформації та вивчення стану та характеристик гірничого масиву використано методи акустичної емісії, що полягає в зборі звукових сигналів, які виникають в результаті деформації гірничого масиву; сейсмічні методи, які використовують збір звукових сигналів, що виникають в результаті сейсмічних подій, таких як землетруси, для вивчення структури та характеристик гірничого масиву; метод зондування (розміщення зонду в межах ділянки дослідження), для збору звукових сигналів, які виникають у гірничому масиві, що дозволяє вивчати структуру та характеристики гірничого масиву.

Наукова новизна статті полягає у виборі оптимальних технічних параметрів для сейсмотатчиків та визначенні частотних діапазонів для проведення досліджень в Глеюватському кар'єрі. Розробка алгоритму ідентифікації явищ та параметрів вибравки технологічних процесів дає можливість оцінювати напружено-деформований стан гірського масиву.

Практичне значимість отриманих результатів полягає в отриманні оптимальних параметрів технічного обладнання для мікросейсмічного контролю гірських порід в кар'єрах, що дозволяє підвищити ефективність виробництва та зменшити ризик аварій через оцінку напружено-деформованого стану гірського масиву.

Результати по статті включає: визначені оптимальні параметри сейсмотатчиків та частотний діапазон для досліджень сейсмічних подій в Глеюватському кар'єрі, а також плани щодо детальної класифікації явищ та розроблення алгоритму їх ідентифікації.

Ключові слова: звукометрія, кар'єр, сейсміка, явища, мікросейсми, сейсмореєстратор, гірські породи

Romanenko A.O., Sydorenko V.D. Conducting research on determining the physical and mechanical properties of rock formations through seismic signals and identifying micro-damage in the Gleyuvatsky open pit mining

Abstract. The article discusses the research directions of famous Ukrainian scientists in the field of seismic monitoring of rock masses and acoustic methods for determining the physical and mechanical properties of rocks. It focuses on microseismic issues and examines the possibility of determining the density and elasticity of rocks through the analysis of microseismic signals.

Purpose. To determine the optimal frequency ranges and sensitivity of seismometers required for measuring the physical parameters of the rock mass and conducting research aimed at identifying microseismic events within the researchment area.

Research methods. Acoustic emission methods for collecting and analyzing sound information and studying the state and characteristics of the mining mass, seismic methods for using sound signals generated by seismic events such as earthquakes to study the structure and characteristics of the mining mass, and the probing method (placement of probes within the study area) for collecting sound signals generated within the mining mass, allowing for the study of its structure and characteristics.

Scientific novelty. The choice of optimal technical parameters for seismometers and the determination of frequency ranges for research in the Gleyuvatsky quarry. The development of an algorithm for identifying phenomena and parameters of technological process selection makes it possible to assess the stress-deformed state of the mining mass.

Practical significance. Obtaining optimal technical equipment parameters for microseismic monitoring of rocks in quarries, which allows for the improvement of production efficiency and the reduction of the risk of accidents by assessing the stress-deformed state of the mining mass.

Results. The determination of optimal parameters for seismometers provides more accurate measurements of the physical and mechanical properties of rock masses. The research conducted is useful for further studies in the field of mining engineering and geophysics.

Key words: sound measurement, quarry, seismics, phenomena, microseisms, seismograph, rock formations.

УДК 658.5:334.012.6

Шахно А.Ю. Стан та проблеми розвитку бізнесу в умовах інноваційної діяльності

Мета. Визначення сучасного стану розвитку вітчизняного бізнесу та проблем його розвитку, розробка комплексу заходів щодо забезпечення ефективного розвитку бізнес-структур в умовах інноваційної діяльності й трансформації глобалізаційних процесів.

Методи дослідження. Результати і наукові положення отримані з використанням певних методів: узагальнення результатів попередніх досліджень, комплексного аналізу та синтезу, логіко-структурного й логіко-динамічного аналізу, науково-аналітичного, порівняння й аналогії, табличного тощо.

Наукова новизна. В ході дослідження надано оцінку стану функціонування вітчизняного бізнесу та визначено основні проблеми його розвитку, що дало можливість представити авторське бачення стратегічно-орієнтованої моделі державного управління розвитку бізнесу та запропонувати комплекс заходів щодо ефективного формування сприятливого бізнес-середовища з боку держави, що позитивно вплине на соціально-економічний розвиток країни, де важливим напрямом є розвиток інноваційного підприємництва.

Практична значимість. Результати дослідження можуть бути використані при формуванні стратегії розвитку інноваційного бізнесу та комплексу інструментів державного регулювання його розвитку. Впровадження запропонованих заходів сприятиме поліпшенню бізнес-клімату в Україні, підвищенню якості людського капіталу та підвищенню конкурентних переваг національної економіки в глобалізованому світі, де прискорюється розвиток цифрових технологій та креативних галузей.

Результати. В науковому дослідженні визначено сучасний стан розвитку бізнесу в Україні. Проаналізовано динаміку кількості суб'єктів господарювання України за період 2010 – 2021рр., визначено обсяги фінансування з державного бюджету інноваційної підприємств та проаналізовано інноваційну активність суб'єктів підприємницької діяльності. Представлено рейтинг України серед інших країн світу за показником Doing Business Index та Індексом економічної свободи, проаналізовано динаміку обсягів інвестування в українські стартапи. Визначено основні проблеми формування бізнес-середовища. За результатами наукових досліджень представлено авторське бачення стратегічно-орієнтованої моделі державного управління розвитку бізнесу та запропоновано комплекс заходів щодо формування ефективного бізнес-середовища для створення сприятливих умов ведення бізнесу в умовах інноваційної діяльності.

Ключові слова: бізнес, підприємство, розвиток, управління, інновації, інвестиції, підприємництво, держава.

Shakhno A. Yu. The state and problems of business development in the context of innovation activities

Purpose. To determine the current state of national business development and identify its problems, and elaborate a set of measures to ensure efficient development of business structures in the context of innovation activities and transformation of globalization processes.

Research methods. To obtain the scientific results, the following methods are applied: generalization of the results of previous studies, comprehensive analysis and synthesis, logical-structural and logical-dynamic analysis, scientific-analytical, comparison and analogy, tabular methods, etc.

Scientific novelty. In the course of the study, the state of the national business functioning is assessed and main problems of business development are identified to present the author's vision of a strategically oriented model of public management of business development and propose a set of measures for effective formation of a favorable business environment by the State

which will have a positive impact on the socio-economic development of the country, where development of innovative entrepreneurship is an important area.

Practical significance. The results of the study can be used to shape a strategy for development of innovative business and create a set of tools for public regulation of its development. Implementation of the proposed measures helps improve the business climate in Ukraine, enhance the quality of human capital, and increase the competitive advantages of the national economy in the globalized world which faces increasing development of digital technologies and creative industries.

Results. The research identifies the current state of business development in Ukraine. The article analyzes the dynamics of the number of business entities in Ukraine for the period 2010-2021, determines the amount of funding from the State budget for innovation activities of enterprises and analyzes innovation activities of business entities. The article presents Ukraine's ranking among other countries of the world according to the Doing Business Index and the Index of Economic Freedom, analyzes the dynamics of investment in Ukrainian startups. The main problems of business environment formation are identified as well. Based on the results of scientific research, the author's vision of a strategically oriented model of public management of business development is presented and a set of measures is proposed to form an effective business environment to create favorable conditions for doing business in the context of innovation activities.

Key words: business, enterprise, development, management, innovations, investment, entrepreneurship, state

УДК 621.7-51

Кіянівський М.В., Бондар О.В., Рязанцев А.О., Чумак А.С. Шляхи зменшення кількості простоїв верстатного обладнання

Мета. Запобігання втрати ресурсного потенціалу та забезпечення безаварійної експлуатації токарно-карусельних верстатів шляхом коригування процесів технічного обслуговування і ремонту та зміни конструктивних елементів конструкції верстату

Методи дослідження. Результати роботи по запобіганню виходу з ладу та зниженню ймовірності відмов механообробного обладнання, а саме токарно-карусельних верстатів, отримані шляхом теоретичних, економіко-математичних, статистичних і експериментальних досліджень. За допомогою яких були проаналізовано різні стратегії управління ремонтами верстатів, оцінено ефективність їх практичного використання. В якості статистичних досліджень використано дані простоїв токарно-карусельних верстатів, виділено та проаналізовано основні вузли, вихід з ладу яких спричиняє простої механічного обладнання.

Наукова новизна. Розглянуто можливості впровадження системи автоматизованого контролю стану обладнання та управління Тоір. Проаналізовано сучасні стратегії управління ремонтами та технічним обслуговування технологічного обладнання та запропоновані заходи щодо зменшення кількості простоїв через незадовільний технічний стан обладнання, які дозволять підвищити продуктивність роботи верстатів. Запропоновано застосування діагностичних систем контактних та безконтактних типів для моніторингу поточного технічного стану обладнання та проведення Тоір «за фактичним станом».

Практичне значення. Задля запобігання простоїв токарно-карусельних верстатів запропоновано нове рішення конструктивної зміни елементів верстату на основі використання гідрогайок з автоматизованим модулем. Гідрогайки оснащуються індикаторами годинного типу і манометром. Даний пристрій разом з контролером може створювати діагностичний стенд та інформувати про стан обладнання. Додатково встановлюються модулі коеебокс на двигуни, що відповідають за передачу гвинт-гайка. Були розраховані витрати на впровадження запропонованих заходів та встановлено, що в порівнянні з очікуваним результатом вони мінімальні. Розглянуто можливі шляхи впровадження не тільки для верстатів токарно-карусельної групи, а й для іншого обладнання, що має подібні конструктивні елементи, на всіх підприємствах групи МЕТІНВЕСТ.

Результати. Діюча система планово-попереджувальних ремонтів на підприємствах малоефективна та потребує змін. Виходом з цієї проблеми є перехід на ремонт обладнання «за фактичним станом», який можливий лише з використанням діагностичних систем та зміни конструктивних елементів верстату, зокрема застосування гідравлічних гайок в гвинтових передачах.

Ключові слова: простої обладнання, система Тоір, ресурсний потенціал, безаварійна експлуатація.

Kiyanovskiy M.V., Bondar O.V., Riazantsev A.O., Chumak A.S Ways to reduce the number of machine downtimes

Purpose. To prevent the loss of resource potential and ensure the trouble-free operation of lathe-carousel machines by adjusting the maintenance and repair processes and changing the structural elements of the machine structure.

Research methods. The results of the work on preventing failure and reducing the probability of failure of mechanical processing equipment, namely lathe-carousel machines, were obtained through theoretical, economic-mathematical, statistical and experimental studies. With the help of which, various strategies for managing the repair of machine tools were analyzed, and the effectiveness of their practical use was evaluated. As a statistical study, the data of downtimes of lathe-carousel machines were used, the main nodes, the failure of which causes the downtime of mechanical equipment, were selected and analyzed.

Scientific novelty. Possibilities of implementing a system of automated monitoring of the condition of equipment and management of R&D were considered. Modern strategies for managing repairs and maintenance of technological equipment are analyzed and measures are proposed to reduce the number of downtimes due to unsatisfactory technical condition of the equipment, which will allow to increase the productivity of the machines. It is proposed to use diagnostic systems of contact and non-contact types to monitor the current technical condition of the equipment and carry out maintenance and repair "according to the actual condition".

Practical significance. In order to prevent downtimes of lathe-carousel machines, a new solution to the structural change of machine elements based on the use of hydraulic nuts with an automated module is proposed. Hydraulic nuts are equipped with hour-type indicators and a pressure gauge. This device, together with the controller, can create a diagnostic stand and inform about the state of the equipment. Additionally, koebox modules are installed on the engines responsible for the screw-nut transmission. The costs of implementing the proposed measures were calculated and it was established that they are minimal

compared to the expected result. There was considered possible ways of implementation not only for machines of the lathe-carousel group, but also for other equipment with similar structural elements at all enterprises of the METINVEST LLC group.

Results. The current system of planned preventive maintenance at enterprises is inefficient and needs to be changed. The way out of this problem is the transition to repair of equipment "as is", which is possible only with the use of diagnostic systems and changes in the structural elements of the machine, in particular, the use of hydraulic nuts in screw gears.

Key words: idle equipment, maintenance and repair system, resource potential, trouble-free operation.

УДК 621.43.056:632.15

Єфіменко Л.І., Тиханський М.П., Тиханська А.М. Адаптивна система керування з еталонною моделлю котлоагрегату

Мета. Метою цієї роботи є синтез самоналагоджувальної системи з еталонною моделлю управління технологічними процесами в котлоагрегатах за рахунок автоматичного настроювання регуляторів для підвищення виробництва пари. Для цього необхідно розробити математичну модель процесу, сформулювати критерії адекватності квазістатичних процесів, що відбуваються у котлі під час пароутворення.

Методи дослідження. Для вирішення цього завдання використано: методи сучасної теорії управління; методи обробки випадкових процесів і математичного моделювання, а також наукове узагальнення раніше виконаних досліджень та аналіз літературних джерел.

Наукова новизна. Отримана адекватна математична модель з еталонною моделлю управління технологічними процесами в котлоагрегатах, що відбуваються з урахуванням перешкод різного походження та контрольованих і неkontrolьованих збурень, що дозволяє синтезувати адаптивне керування режимами роботи котла при зміні вхідних параметрів.

При цьому використана модернізована методика настроювання регуляторів адаптивної системи керування технологічним процесом пароутворення.

Практична значимість. Отримана адекватна математична модель технологічного процесу, що відбувається у котлоагрегатах з урахуванням перешкод різного походження та контрольованих і неkontrolьованих збурень, що дозволяє синтезувати адаптивне керування режимами роботи котла при зміні вхідних параметрів та за рахунок цього знизити енергоспоживання та підвищити ефективність пароутворення.

Авторами запропоновано автоматичне настроювання регуляторів адаптивної системи для підвищення виробництва пари яке відрізняється тим, що дозволяє швидко реагувати на додатну інформацію та корегувати управляючі дії за допомогою самонастроювального регулятора.

Результати. Розглянуто синтез самоналагоджувальної системи з еталонною моделлю управління технологічними процесами в котлоагрегатах за рахунок автоматичного настроювання регуляторів для підвищення виробництва пари. Автоматичне управління котлоагрегатами з адаптацією за зміною впливів, що збурюють, дозволяє підтримувати показники якості управління в заданих межах.

Ключові слова: система керування, адаптивна система, самоналагоджувальна система, еталонна модель, котлоагрегат, адаптивний регулятор, автоматична система керування.

Yefimenko L.I., Tykhanskyi M.P., Tykhanska A. M. Adaptive control system with reference model of the boiler unit

Purpose. The synthesis of a self-adjusting system with a reference model for controlling technological processes in boiler units due to the automatic adjustment of regulators to increase steam production. For this, it is necessary to develop a mathematical model of the process, to formulate criteria for the adequacy of quasi-static processes occurring in the boiler during steam generation.

Research methods. To solve this problem, the following methods were used: methods of modern management theory; methods of processing random processes and mathematical modeling, as well as scientific generalization of previously performed research and analysis of literary sources.

Scientific novelty. An adequate mathematical model was obtained with a reference model for controlling technological processes in boiler units taking into account obstacles of various origins and controlled and uncontrolled disturbances, which allows synthesizing adaptive control of boiler operating modes when input parameters change.

At the same time, a modernized method of adjusting the regulators of the adaptive control system of the technological process of vaporization was used.

Practical significance. An adequate mathematical model of the technological process that takes place in boiler units is obtained, taking into account obstacles of various origins and controlled and uncontrolled disturbances, which allows for the synthesis of adaptive control of boiler operation modes when input parameters are changed and, due to this, to reduce energy consumption and increase the efficiency of steam generation.

The authors proposed automatic adjustment of the regulators of the adaptive system to increase steam production, which is distinguished by the fact that it allows you to quickly respond to positive information and adjust control actions with the help of a self-adjusting regulator.

Results. The synthesis of a self-adjusting system with a reference model for controlling technological processes in boiler units due to automatic adjustment of regulators to increase steam production is considered. Automatic control of boiler units with adaptation to changes in disturbing influences. allows you to maintain management quality indicators within the specified limits.

Key words: control system, adaptive system, self-adjusting system, reference model, boiler unit, adaptive regulator, automatic control system.

УДК 622. 7

Гарбер В., Головань В.І., Скляр Л.В. Зневоднення залізрудних концентратів та сучасні сушильні процеси

Мета. Мета даних досліджень - аналіз використання процесів фільтрації суспензій залізрудних концентратів та сучасних методів термічного сушіння та встановлення основних тенденцій у розвитку обладнання для зневоднення залізрудних концентратів.

Методи дослідження. Обробка статичних даних технічних та економічних характеристик роботи фільтрувального обладнання механічного та термічного видалення води.

Наукова новизна. Наукова новизна результатів дослідження полягає у визначенні вартості процесів зневоднення залізрудних концентратів залежно від типу фільтрувального обладнання, кінцевої вологості після фільтрації, визначення економічно обгрунтованої межі переходу від механічного зневоднення до термічного сушіння за умов підвищення тинини помелу залізної руди при збагаченні

Практичне значення. Аналіз технологічних та економічних показників процесів механічного та термічного сушіння показав, що при зменшенні тинини помелу збільшується кінцева вологість осаду на фільтрах і частина процесу зневоднення повинна передаватися термічному сушінню.

Результати. Розглянуто тенденції у розвитку обладнання для фільтрування залізрудного концентрату. Показано можливості та недоліки використання дискових вакуум-фільтрів з керамічними секторами, що фільтрують. Проведено техніко-економічне порівняння зарубіжних фільтрів та встановлено, що вологість осаду та високі питомі енергетичні витрати зумовили тенденцію впровадження нових конструкцій фільтрів імпорного виробництва, незважаючи на незначне зниження кінцевої вологості залізрудних концентратів з 9,5 до 7,5%. Такі концентрати не можна використовувати у наступних металургійних процесах. Розраховані питомі вартості механічного зневоднення та термічного сушіння близькі, що дозволяє розраховувати зневоднення залізрудних концентратів як єдиний процес з економічно обгрунтованою межею переходу, фільтрації вологості залізрудного концентрату

Ключові слова: зневоднення, сушіння, вологість, фільтрування, фільтри, термічна сушіння

Garber V., Golovan V.I., Skylar L. V. Dewatering of iron ore concentrates and modern drying processes.

Purpose. To analyze the use of filtration processes for iron ore concentrate and modern methods of thermal drying and to establish the main trends in the development of equipment for the dewatering iron ore concentrates.

Research methods. Processing of static data of technical and economic characteristics of operation of filtering equipment for mechanical and thermal water removal.

Scientific novelty. The scientific novelty of the research results is the determination of the cost of dewatering processes of iron ore concentrates depending on the type of filtering equipment, final humidity after filtration, determination of economically justified limit of transition from mechanical dewatering to thermal drying under conditions of reducing the size of the final concentrates.

Practical significance. The possibility of reducing the moisture content of iron ore concentrates to a level of less than 2% is shown based on the consideration of economic and technical indicators of the combined use of mechanical and thermal (thermal contact drying) moisture removal processes.

Results. Studied trends in the development of equipment for filtering iron ore concentrate. The possibilities and disadvantages of using disk vacuum filters with ceramic filtering sectors are shown. A technical and economic comparison of foreign filters was carried out and it was found that the sediment moisture and high specific energy costs led to the trend of introducing new designs of imported filters, despite a slight decrease in the final moisture content of iron ore concentrates from 9.5% to 7.5%. Such concentrates cannot be used in subsequent metallurgical processes. The calculated unit costs of mechanical dewatering and thermal drying are close, which makes it possible to calculate the dewatering of iron ore concentrates as a single process.

Key words: dewatering, drying, humidity, filtration, filters, thermal drying

УДК 621.311

Бойко С.М., Касаткіна І.В., Данілін О.В. Аспекти реконфігурації систем електропостачання при впровадженні джерел розосередженої генерації в умовах розподільчих мереж підприємств

Мета. Дослідження варіантів реконфігурації систем електропостачання при впровадженні джерел розосередженої генерації в умовах розподільчих мереж підприємств.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано сучасні аспекти побудови систем електропостачання підприємств та визначено особливості під'єднання джерел розосередженої генерації електричної енергії до діючої електричної мережі. Одним із перспективних напрямів у реалізації наукових завдань щодо реконфігурації існуючих систем електропостачання підприємств, на погляд авторів та кагорти науковців, є напрям на їх декарбонізацію за рахунок впровадження джерел розосередженої генерації з подальшою інтелектуалізацією. Такий підхід має особливості щодо його практичної реалізації. Враховуючи світовий досвід інтелектуалізації та основні положення концепції інтелектуальних мереж, є можливість вирішити завдання оптимізації режимів функціонування генеруючих установок на базі відновлювальних джерел енергії та раціональне використання згенерованої ними електричної енергії шляхом її накопичення за рахунок водневих технологій

Методи дослідження. Для розв'язання поставлених наукових задач використано аналітичні методи – для дослідження можливих варіантів реконфігурації енергетичних мереж підприємств шляхом впровадження джерел розосередженої генерації.

Наукова новизна. Вперше запропоновано варіант реконфігурації діючої системи електропостачання підприємства шляхом впровадження до її складу джерел розосередженої генерації.

Практична значимість. За результатами проведеного аналізу можна зробити висновок про те що, запропонований варіант реконфігурації діючих електричної мереж підприємств надасть можливість покращити енергетичні показники мережі підприємства та допоможе у адаптації до стратегії активного споживання електричної енергії.

Результати. Реконфігурація систем електропостачання підприємств є необхідним кроком у подолання викликів сьогодення щодо надійності та якості електропостачання. Запропонований варіант реконфігурації діючих електричних мереж підприємств виконаний в аспекті декарбонізації та подальшої інтелектуалізації цих мереж, що в майбутньому надасть їм можливість адаптації до мереж побудованих за концепцією Smart Grid.

Ключові слова: система електропостачання, розосереджена генерація, розподільчі мережі, воднева енергетика, паливні комірки, відновлювані джерела енергії.

Boyko S.M., Kasatkina I.V., Danilin O.V. Aspects of reconfiguration of electrical supply systems when implementing distributed generation sources in the terms of distribution networks of enterprises

Purpose. To study the options for reconfiguring power supply systems when implementing sources of distributed generation in the conditions of distribution networks of enterprises. Modern aspects of the construction of power supply systems of enterprises were analyzed and the features of connecting sources of distributed generation of electrical energy to the existing electrical network were determined.

The promising directions in the implementation of scientific tasks regarding the reconfiguration of the existing power supply systems of enterprises, in the opinion of the authors and the cohort of scientists, is the direction of their decarbonization due to the introduction of sources of distributed generation with subsequent intellectualization. This approach has peculiarities regarding its practical implementation. Meanwhile, taking into account the world experience of intellectualization and, above all, the main provisions of the concept of intelligent networks, it is possible to solve the task of optimizing the modes of operation of generating plants based on renewable energy sources and the rational use of the electric energy generated by them by accumulating it at the expense of hydrogen technologies

Research methods. Analytical methods were used to solve the scientific problems - to investigate possible options for reconfiguring energy networks of enterprises by introducing sources of distributed generation.

Scientific novelty. For the first time, a variant of the reconfiguration of the company's current power supply system by introducing distributed generation sources into its composition was proposed.

Practical significance. Based on the results of the analysis, it can be concluded that the proposed variant of the reconfiguration of the existing electricity networks of enterprises will provide an opportunity to improve the energy indicators of the enterprise network and help in adaptation to the strategy of active consumption of electricity.

Results. Reconfiguration of the power supply systems of enterprises is a necessary step in overcoming today's challenges regarding the reliability and quality of power supply. The proposed variant of reconfiguration of the existing electrical networks of enterprises is carried out in the aspect of decarbonization and further intellectualization of these networks, which in the future will provide them with the opportunity to adapt to networks built according to the Smart Grid concept.

Key words: power supply system, distributed generation, distribution networks, hydrogen energy, fuel cells, renewable energy sources.

УДК 624.131:624.15

Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Марінова Т.А., Ганженко В.А. Взаємодія фундаментних конструкцій і нерівномірно-деформованої основи

Мета. Виконати аналіз і класифікувати причини виникнення нерівномірних деформацій основ, методи захисту від їхнього впливу, розробити метод розв'язання контактної задачі.

Методи дослідження. Математичне моделювання впливу різних чинників на роботу фундаментних плит. Метод кінцевих елементів, класичні методи будівельної механіки (початкових параметрів, сил, переміщень) для розрахунку взаємодії фундаментної конструкції та основи. Метод коефіцієнта жорсткості у розв'язанні контактної задачі взаємодії фундаментної плити і нерівномірно-деформованої основи.

Наукова новизна. Напружено-деформований стан фундаментної конструкції та основи за їхньої контактної взаємодії в особливих умовах роботи.

Практична значимість. Нерівномірні осідання, спричинені деформаціями основи в складних інженерно-геологічних умовах, як правило, значно перевищують відповідні величини, які мають місце у звичайних інженерно-геологічних умовах. Наслідком нерівномірних вертикальних переміщень основи є спостережувані крени споруд, різні форми деформацій вигину, зсуву, крутіння та утворення тріщин. Нерівномірні горизонтальні переміщення основи спричиняють впливи на підземні частини споруд у вигляді зсувних сил на бічних поверхнях і підшвах фундаментів, а також унаслідок нормального тиску ґрунту, що зсувається, на стіни заглиблених у ґрунт частин споруди.

Результати. Проведені дослідження дали змогу розкрити важливість питань прогнозування перерозподілу реакцій по підшві фундаментів і визначення додаткових зусиль, що виникають при цьому в конструкціях і вони належать до контактної задачі механіки ґрунтів, яку можна розглядати як задачу, що перебуває на стику механіки ґрунтів, будівельної механіки, теорії пружності та пластичності. Для розрахунків фундаментних конструкцій як діаграми деформування, за якими визначають коефіцієнти жорсткості основи, застосовують кусково-лінійну, гіперболічну або ступінчасту залежності, які лише якісно відображають характер деформування ґрунту під час його навантаження. Залежність між осіданням і тиском під час розвантаження основи приймають у вигляді прямої, що проходить через ту точку діаграми деформування, з якої відбулося її розвантаження

Ключові слова: нерівномірні деформації основ, ґрунти, фундаменти, впливи.

Timchenko R.O., Krishko D.A., Marinova T.A., Ganzhenko V.A. Interaction of foundation structures and unevenly deformed foundation

Purpose. To analyze and classify the causes of uneven deformations of bases, methods of protection against their influence, to develop a method for solving the contact problem.

Research methods. Mathematical modeling of the influence of various factors on the operation of foundation slabs. The finite element method, classical methods of structural mechanics (initial parameters, forces, displacements) to calculate the interaction of the foundation structure and the base. The method of stiffness coefficient in solving the contact problem of interaction between the foundation slab and unevenly deformed foundation.

Scientific novelty. The stress-strain state of the foundation structure and the base under their contact interaction in special working conditions.

Practical significance. Uneven settlements caused by deformations of the foundation in complex engineering and geological conditions, as a rule, significantly exceed the corresponding values that occur in normal engineering and geological conditions. The consequence of uneven vertical movements of the foundation is the observed rolls of structures, various

forms of bending, shear, torsion and cracking deformations. Uneven horizontal movements of the foundation cause impacts on the underground parts of structures in the form of shear forces on the lateral surfaces and footings of the foundations, as well as due to the normal pressure of the shifting soil on the walls of the buried parts of the structure.

Results. The studies made it possible to reveal the importance of predicting the redistribution of reactions along the foundation soles and determining the additional forces arising in structures, which belong to the contact problem of soil mechanics, which can be considered as a problem at the interface of soil mechanics, structural mechanics, the theory of elasticity and plasticity. For the calculation of foundation structures, piecewise linear, hyperbolic, or step dependencies are used as deformation diagrams to determine the stiffness coefficients of the foundation, which only qualitatively reflect the nature of soil deformation under load. The relationship between settlement and pressure during unloading of the foundation is taken as a straight line passing through the point of the deformation diagram from which its unloading occurred

Key words: uneven deformations of foundations, soils, foundations, impacts.

УДК 622.1:528.02

Долгіх О. В., Кремер О. А. Використання БПЛА та GPS в маркшейдерській справі

Мета. Метою роботи є дослідження питання доцільності використання GPS-обладнання та безпілотних літальних апаратів (БПЛА) при виконанні знімальних робіт на промислових майданчиках та інших об'єктах гірничодобувних підприємств, що дозволяє вирішувати нагальні задачі маркшейдерського забезпечення гірничих робіт.

Методи дослідження. Поставлені завдання та мета для дослідження, зумовили використання нових підходів та методів виконання маркшейдерських вимірів та обчислень з необхідною точністю. Методи дослідження засновані на аналізі матеріалів, отриманих з різних наукових літературних джерел: наукових робіт іноземних та вітчизняних вчених, опублікованих у журналах та збірниках; інформації з Інтернету; офіційної нормативної бази, що регламентує проведення польових та камеральних робіт.

Наукова новизна. За результатами аналізу сучасних методів виконання знімальних робіт за допомогою безпілотних літальних апаратів та GPS та порівняння їх з традиційними методами виконання таких задач, обґрунтовано вибір найбільш доцільних та ефективних методів виконання маркшейдерських знімальних робіт з подальшим опрацюванням отриманих даних, використовуючи для цього спеціальне програмне забезпечення.

Практична значимість виконаних досліджень спрямована для задоволення потреб маркшейдерських відділів гірничодобувних підприємств Криворізького басейну, для удосконалення практики виконання знімальних робіт на різних гірничодобувних об'єктах: хвостосховищах, кар'єрах, відвалах, промайданчиках підприємств відкритої та підземної розробки родовищ корисних копалин. Досліджені сучасні методи знімання за допомогою БПЛА та GPS, мають суттєву перевагу порівняно з традиційними за рядом характеристик. Вони не поступаються за точністю, виконуються у короткий термін часу та потребують значно меншої кількості задіяних працівників маркшейдерського відділу.

Результати. У роботі розглянуто точність, яку дають традиційні та досліджені сучасні методи виконання маркшейдерських знімальних робіт, також результати опрацювання даних зйомок, отримані шляхом опрацювання їх в різному програмному забезпеченні. Досліджено результати впровадження сучасних методів на гірничодобувних підприємствах України та зарубіжжя.

Ключові слова: маркшейдерія, БПЛА та GPS, програмне забезпечення, 3D моделі.

Dolgiikh O. V., Kremer O. A. Use of UAVs and GPS in surveying

Purpose. To investigate the feasibility of using GPS and unmanned aerial vehicles (UAVs) when filming at industrial sites and other facilities of mining enterprises, which allows solving urgent tasks of surveying support for mining operations.

Research methods. The tasks and purpose of the research require the use of new approaches and methods of performing surveying measurements and calculations with the necessary accuracy. Research methods are based on the analysis of materials obtained from various scientific literary sources: scientific works of foreign and Ukrainian scientists, published in journals and scientific collections; information from the Internet; of the official regulatory framework regulating field and chamber work.

Scientific novelty. The choice of the most appropriate and effective methods of performing surveying filming works with further processing of the obtained data using special software is substantiated according to the results of the analysis of modern methods of performing filming works using unmanned aerial vehicles and GPS and comparing them with traditional methods of performing such tasks.

Practical significance is aimed at meeting the needs of the surveying departments of mining enterprises of the Kryvyi Rih iron ore basin, to improve the practice of performing surveying work at various mining facilities: tailings, open-pit, dumps, industrial sites of open and underground mining enterprises. The researched modern methods of shooting with the help of UAVs and GPS have a significant advantage compared to traditional ones in a number of characteristics. They are not inferior in accuracy, are performed in a short period of time and require a much smaller number of employees of the surveying department.

Results. The scientific work examines the accuracy provided by traditional and researched modern methods of performing surveying shooting works, as well as the results of processing the shooting data, obtained by processing them in various software. The results of the implementation of modern methods at Ukrainian and foreign mining enterprises were studied.

Key words: surveying, UAVs and GPS, program software, 3D models.

УДК 624.131:624.15

Тімченко Р.О., Крішко Д.А., Слинко Т. М., Глуханько С.А., Березка О.О., Борак Р.В. Метод оцінки стану багатошарових огорожувальних конструкцій

Мета. Встановлення закономірностей зміни паропроникності різних матеріалів від їхньої вологості та розроблення на цій основі методу оцінки вологісного стану багатошарових огорожувальних конструкцій.

Методи дослідження. В якості теоретичної бази для дослідження використано фундаментальні закони нерівноваж-

ної термодинаміки (закон ентропії, лінійні закони Фур'є та Фіка) і результати відомих наукових досліджень з розрахунку вологісного стану огорожувальних конструкцій.

Наукова новизна. Для випробуваних у роботі матеріалів встановлено, що при збільшенні відносної вологості повітря в порах матеріалів від 20 до 80 % коефіцієнт паропроникності зростає в 1,5-2,5 раза; отримано емпіричні рівняння цієї залежності. Розроблено метод визначення коефіцієнта паропроникності матеріалів у складі багатошарових зовнішніх стін, який ґрунтується на математичному методі простих ітерацій і полягає в послідовному перерахунку коефіцієнтів паропроникності матеріалів за значеннями відносної вологості повітря у відповідних матеріальних шарах зовнішніх стін до встановлення збіжності із заданою похибкою.

Практична значимість. Розроблено метод оцінювання вологісного стану зовнішніх стін з урахуванням коефіцієнтів паропроникності матеріальних шарів, що змінюються протягом року, що дає змогу визначати параметри вологості зовнішніх стін на стадії їхнього проектування.

Результати. Розширення досліджень зі збільшення спектра будівельних матеріалів, конструктивних рішень багатошарових зовнішніх стін і систематизації характеристик масопереносу під час експлуатаційних впливів. Результати роботи можуть бути використані під час дослідження закономірностей паропроникності традиційних і новостворюваних матеріалів під час різних експлуатаційних впливів (метод для оцінювання паропроникності матеріалів), а також для прогнозного оцінювання вологістийкого стану зовнішніх стін на стадії їхнього проектування для різних кліматичних районів (метод оцінювання вологістийкого стану зовнішніх стін із урахуванням мінливості коефіцієнта паропроникності матеріалів під час експлуатації).

Ключові слова: багатошарова огорожувальна конструкція, паропроникність, вологісний стан зовнішніх стін, відносна вологість повітря.

Timchenko R. O., Krishko D.A., Slynko T.M., Glukhanko S.A., Berezka O.O., R Borak.V. Method for assessing the condition of multilayer enclosing structures

Purpose. Establishing patterns of changes in the vapor permeability of various materials depending on their moisture content and developing a method for assessing the moisture state of multilayer enclosing structures on this basis.

Research methods. As a theoretical basis for the study, the fundamental laws of non-equilibrium thermodynamics (the law of entropy, Fourier and Fick's linear laws) and the results of well-known scientific studies on the calculation of the moisture state of enclosing structures were used.

Scientific novelty. For the materials tested in the work, it was found that with an increase in relative humidity in the pores of materials from 20 to 80 %, the vapor permeability coefficient increases by 1.5-2.5 times; empirical equations of this dependence were obtained. A method for determining the vapor permeability coefficient of materials in the composition of multilayer exterior walls has been developed, based on the mathematical method of simple iterations and consisting in the sequential recalculation of the vapor permeability coefficients of materials by the values of relative humidity in the corresponding material layers of exterior walls until convergence with a given error is established.

Practical significance. A method for assessing the moisture state of exterior walls has been developed, taking into account the vapor permeability coefficients of material layers that change during the year, which makes it possible to determine the moisture parameters of exterior walls at the design stage.

Results. Expansion of research to increase the range of building materials, constructive solutions for multilayer exterior walls and systematization of mass transfer characteristics during operational impacts. The results of the work can be used to study the patterns of vapor permeability of traditional and newly developed materials under various operational influences (a method for assessing the vapor permeability of materials), as well as for the predictive assessment of the moisture-resistant state of exterior walls at the stage of their design for different climatic regions (a method for assessing the moisture-resistant state of exterior walls, taking into account the variability of the vapor permeability coefficient of materials during operation).

Key words: multilayer building envelope, vapor permeability, moisture condition of exterior walls, relative humidity.

Збірник наукових праць

В і с н и к
Криворізького національного університету

Випуск 56

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. 24,99 Тираж 100 прим.
Замовл. № 11. Укр., англ.

Надруковано:
ФОП Сінельников Дмитро Анатолійович
Свідоцтво ДК № 6780 від 29.05.2019р.
50027, м. Кривий Ріг,
пр. Металургів, 30/49
тел. (067)773-37-17

Адреса видавництва:
вул. Віталія Матусевича, 11, Кривий Ріг, 50027

Криворізький національний університет, 2023.
Вип. 56, С. 3-215