

© О.В. Філоненко<sup>1</sup>, М.В. Петльований<sup>2</sup><sup>1</sup> ТОВ «Метінвест холдинг», Маріуполь, Україна<sup>2</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## МЕТОДИКА ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ ЗАКЛАДНОГО МАСИВУ КАР'ЄРНИХ ПУСТОТ З МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ

© О. Filonenko<sup>1</sup>, М. Petlovanyi<sup>2</sup><sup>1</sup> Metinvest Holding LLC, Mariupol, Ukraine<sup>2</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## METHODS FOR STUDYING THE PARAMETERS OF THE FORMATION OF A BACKFILLING MASS OF OPEN PIT CAVITIES FROM METALLURGICAL SLAGS

**Мета.** Розробка методичного алгоритму виконання аналітичних та експериментальних досліджень для обґрунтування раціональних параметрів формування закладного масиву з металургійних шлаків у відпрацьованих кар'єрних пустотах.

**Методика досліджень.** Для досягнення поставленої мети запропоновано та обґрунтовано використання методу фізичного моделювання для дослідження ступеня проникності атмосферних опадів у закладний масив та визначення його ключових фізичних властивостей з урахуванням критеріїв подібності природи та моделі. Обґрунтовано використання чисельного моделювання методом кінцевих елементів для прогнозування деформацій закладного масиву та досягнення його стійкого стану.

**Результати досліджень.** Викладені теоретичні аспекти порядку формування стійкого закладного масиву з різних видів металургійних шлаків під дією навантаження, шари якого характеризуються різними фізичними властивостями. Запропоновано висоту донного закладного шару формувати зі сталеплавильних шлаків за умов ступеня проникності атмосферних опадів і утворення фільтрату. Визначені характеристики фізичної моделі закладного масиву та максимальної кількості опадів, що впливатимуть на його поверхню. Виділено ключові фізичні властивості основних шарів закладного масиву (пустотність, насипна вага, коефіцієнт ущільнення) та способи їх визначення для формування його стійкого стану. Визначені особливості чисельного моделювання деформацій закладного масиву на основі моделі міцності Друккера-Прагера для сипких матеріалів у програмному пакеті SolidWorks.

**Наукова новизна.** Створено науково-методичні засади формування безпечного та стійкого закладного масиву кар'єрних пустот на основі металургійних шлаків.

**Практичне значення.** Розроблений методичний алгоритм дозволяє визначити параметри формування закладного масиву з подальшим відновленням природних ландшафтів та утилізувати суттєві обсяги безпечних промислових відходів у кар'єрних пустотах.

**Ключові слова:** сталеплавильний шлак, доменний шлак, закладний матеріал, рекультивация, гранулометричний склад, фізичне моделювання.

**Вступ.** Функціонування підприємств гірничодобувної галузі як підземного, так і відкритого способу розробки чинить негативний вплив на навколишнє при-

родне середовище. Площа земель, порушених лише відкритими гірничими розробками, в Україні становить за різними оцінками 165-270 тис. га, в тому числі відпрацьованих – на рівні 60 тис. га [1-3], що складає 2,7% від площі України. Згідно законодавства всі гірничі підприємства після завершення терміну експлуатації родовища і входження до процедури їх ліквідації повинні здійснити рекультивацийні заходи для відновлення порушених територій [4-6].

При відкритій розробці родовищ обсягів розкривних порід, що складуються біля кар'єрів, не вистачає для повного відтворення ландшафтів після закінчення видобувних робіт. При експлуатації родовища корисних копалин із надр, як правило, вилучаються мільйони тон запасів корисної копалини та супутніх гірських порід, тому розкривні породи (м'які та скельні) можуть бути використані на технічному етапі рекультивації лише як часткове заповнення виробленого простору. Якщо стоїть задача відтворення колишнього ландшафту та ліквідація техногенних пустот, то виникає потреба використання додаткового рекультивацийного матеріалу. Одним із видів закладного або рекультивацийного матеріалу можуть бути шлаки металургійних комбінатів. Крім того, вироблений простір відкритих гірничих виробок значно доступніший для рекультивації, ніж підземні гірничі виробки, де технології закладання рекультивантів є набагато складнішими та вочевидь витратними [7, 8]. Розвиток такого напрямку утилізації металургійних шлаків дозволить вирішити комплекс екологічних та соціально-економічних проблем промислових регіонів.

Досвід закладання відкритих гірничих виробок побічними продуктами промислового виробництва неодноразово мав місце на різних закритих кар'єрах [9-11]. Проте, наукового обґрунтування параметрів закладного масиву не здійснено, рішення ґрунтуються лише на інженерних розрахунках. Для обґрунтування параметрів закладного масиву з металургійних шлаків потрібно розробити науково-методичний підхід із виконанням комплексу експериментальних досліджень, чому на сьогодні в науково-інформаційних джерелах приділено недостатньо уваги.

**Мета та задачі дослідження.** Мета роботи полягає в розробці методичного алгоритму проведення серії експериментів на основі лабораторних досліджень фізичного та чисельного моделювання для обґрунтування раціональних параметрів формування закладного масиву з металургійних шлаків у відпрацьованих кар'єрних пустотах. Основними задачами дослідження є:

- розробити методику визначення висоти донного шару закладного масиву з металургійних шлаків;
- розробити методику дослідження фізичних властивостей закладного масиву з металургійних шлаків;
- розробити методику чисельного моделювання можливих деформацій закладного масиву та оцінки його стійкості.

**Основна частина. Обґрунтування можливості використання металургійних шлаків як безпечного закладного матеріалу.** Для заповнення кар'єрних пустот закладним матеріалом пропонується використання металургійних

шлаків, які не відносяться до небезпечних матеріалів [12, 13]. Найбільш доцільним видом металургійних шлаків для заповнення кар'єрних пустот є використання шлаків чорної металургії – доменних та сталеплавильних, які не містять шкідливих токсичних речовин, і є безпечними для довкілля.

Так, згідно Національного класифікатора «Єдиний закупівельний словник» ДК 021:2015 шлаки чорної металургії є продукцією та товаром (код CPV: 14630000-6), що свідчить про безпечність використання шлакової продукції у різних галузях економіки. Крім того, використання доменних шлаків набуло значного поширення в будівельній сфері – в якості щебню для будівельних робіт (ДСТУ Б В.2.7-71-98), будівництва доріг (ДСТУ Б В.2.7-35-95; ДСТУ 9043:2020), виробництва будівельних матеріалів, таких як цементи, бетони, мінеральні вати тощо (ДСТУ Б В.2.7-302:2014, ДСТУ Б В.2.7-209:2009). Новим розпорядженням Кабінету Міністрів України від 04 грудня 2019 року № 1420-р «Про застосування відходів виробництва в дорожньому будівництві» пролонгується при будівництві та ремонті автомобільних доріг використовувати не менше 10% металургійних шлаків, зол виносу, тощо.

Отже широке застосування шлаків обумовлене безпечністю їх впливу на навколишнє природне середовище. З наукової точки зору безпечність використання металургійних шлаків для будівництва доріг, які являють собою інертний матеріал для довкілля, неодноразово доводилась дослідженнями вітчизняних та закордонних вчених [14, 15].

Деякі металургійні комбінати для розширення сфери використання власних металургійних шлаків з метою утилізації та покращення стану довкілля розроблюють нормативну документацію у вигляді технічних умов (ТУ), які проходять етапи експертизи і затверджуються відповідними державними установами. Так, на ПрАТ «ММК ім. Ілліча» (м. Маріуполь) створені технічні умови використання шлаків для гідротехнічного будівництва (ТУУ В.2.7-27.1-26416904-188:2005), для дорожнього будівництва (ТУУ В.2.7-14.2-00191129-051:2008). У 2020 році були розроблені та затверджені відповідними державними установами технічні умови ТУ У 08.1-00191158-002:2020 для використання металургійних шлаків як закладних сумішей для технічної рекультивациі техногенно порушених земель [16]. Всі вищезазначені документи, що регламентують використання металургійних шлаків, та, враховуючи їх віднесення до IV класу небезпечності відходів (малонебезпечні), свідчить про безпечність даних шлаків для довкілля. Широкий спектр застосування шлаків характеризує їх не як відходи, а як побічний продукт чи вторинну сировину, що неминуче буде відображено у законодавчій базі найближчим часом.

Для остаточного доведення безпечності використання доменних та сталеплавильних шлаків потрібно виконати наукове обґрунтування можливого контакту шлаків з водоносним горизонтом на основі експериментальних досліджень продуктів взаємодії металургійних шлаків з кар'єрними водами з варіюванням їх співвідношення та тривалості контакту. Отримання позитивних результатів досліджень контакту шлаків з водою відкриває напрям утилізації значних обсягів шлаків.

**Теоретичні особливості формування закладного масиву.** Закладанню металургійними шлаками, які використовуються в якості рекультиваційного матеріалу, можуть підлягати техногенні пустоти кар'єрів, що вичерпали свої промислові запаси. У гірничодобувній галузі формування закладних масивів здійснюється за принципом шаруватості, оскільки на всю висоту звести закладний масив при значних розмірах виробленого простору фактично неможливо [17].

Пропонується наступний спосіб зведення закладного масиву у пустотах кар'єрів з горизонтальною пластоподібною формою залягання корисної копалини, що схематично наведено на рис. 1. Після завершення видобувних робіт днище кар'єру має бути осушеним відповідною системою відкачки води. Далі за даними спостережень гідрогеологічної служби встановлюються основні точки прибуття підземних вод з масиву гірських порід та виконується їх тампонування спеціальними цементними розчинами.

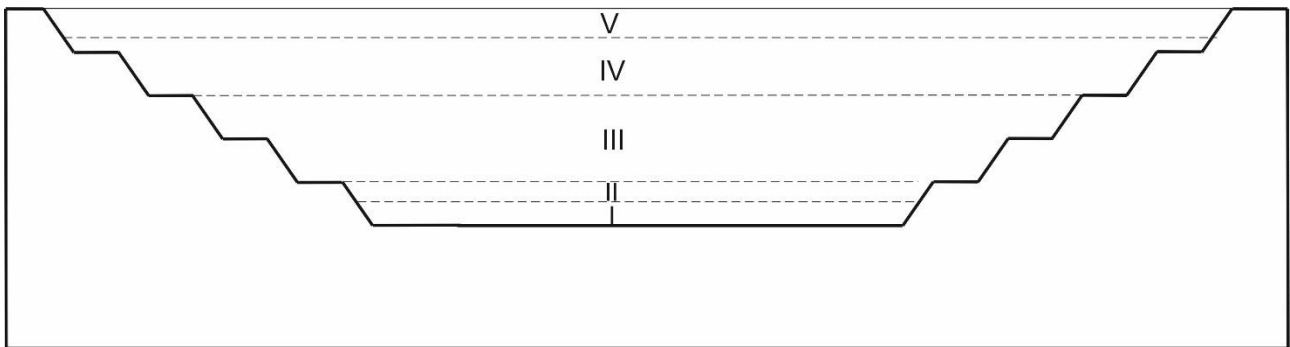


Рис. 1. Структура заповнених пустот закладним матеріалом по завершенню рекультивації кар'єру: I – донний шар з відвальних порід та суглинків; II – V – шари закладного масиву з металургійних шлаків

Формування закладного масиву у днищі кар'єру пропонується здійснювати двома шарами на висоту першого уступу (рис. 1, I-II). У днище розміщується закладний шар з суміші відвальних порід розкриття та суглинків для затримання проникнення можливого фільтрату ( $\epsilon$  маловірогідним) і відпору проникненості водоносного горизонту при відновленні з часом його рівня, що наведено на рис. 1, I. Формування закладного шару поверх донного пропонується здійснювати зі сталеплавильних шлаків, які характеризуються найбільшою зі шлаків міцністю та меншою схильністю до розпадів, що забезпечить стійкість при навантаженні на донний шар вище розміщених закладних шарів (рис. 1, II).

Залежно від відстані між металургійним підприємством та відпрацьованим кар'єром, економічно обґрунтовується найбільш доцільний вид транспорту з доставки закладного матеріалу до місця закладання. Привезений закладний матеріал може розвантажуватися безпосередньо у кар'єрі. За допомогою бульдозерів закладний матеріал розрівнюється по площині поточної робочої відмітки проекту рекультивації кар'єру та ущільнюються під вагою бульдозеру, що зменшує пустотність закладного масиву та його проникність атмосферними опадами. Для підвищення герметизації та зменшення коефіцієнту фільтрації сталеплавильні

шлаки також можуть розміщуватись у комбінації із суглинками, які частіше можна знайти у породних відвалах біля кар'єру.

Формування наступних закладних шарів (рис. 1, III та IV) здійснюється за допомогою таких компонентів як доменні відвальні шлаки, доменні гранульовані шлаки та сталеплавильні шлаки з різним пропорційним співвідношенням. Гранулометричний та компонентний склад цих закладних шарів регламентується обсягами утворення різних видів металургійних шлаків, що підлягають утилізації, та задовільними фізико-механічними властивостями закладного масиву (пустотність, насипна щільність, зчеплення тощо).

Формування останнього закладного шару (рис. 1, V) виконується з комбінації доменних відвальних шлаків, доменних гранульованих шлаків, сталеплавильних шлаків та розкривних порід для створення підгрунтового шару та сприятливих умов для нанесення родючого шару.

Після завершення технічної рекультивації продовження рекультиваційних заходів залежатиме від подальшого цільового призначення території. Основний показник якості виконання технічної рекультивації кар'єрних пустот – це відсутність критичних деформацій на денній поверхні закладеного масиву.

Таким чином, запропонована технологія є доцільною до застосування в першу чергу для кар'єрів зі сприятливими гідрогеологічними умовами та з відповідним обґрунтуванням для кар'єрів, що пересікають водоносні горизонти в процесі експлуатації й відсутності інтенсивного водозабору в регіоні.

**Визначення висоти донного герметичного шару закладного масиву.** Згідно схеми (рис. 1) у днищі передбачаємо закладний шар з суміші відвальних порід розкриву та суглинків висотою не більше 2,0 м для додаткової безпечності. Висоту герметичного закладного шару із металургійних шлаків поверх шару відвальних пропонується визначати за його здатністю затримувати потенційно утворюваний фільтрат з верхніх шарів закладного масиву. Оцінка можливості виникнення фільтрату та ступеню його проникності крізь закладний масив із металургійних шлаків має ґрунтуватись перш за все на режимі атмосферних опадів, що характерні для кліматичних умов розташування кар'єру за тривалий термін та величини пустотності (ступеню ущільнення) закладного масиву.

Наукова задача цього етапу досліджень полягає у тому, щоб визначити необхідну потужність донного шару закладного масиву зі сталеплавильних шлаків (див. рис. 1), через яку максимально можлива кількість в регіоні атмосферних опадів у вигляді фільтрату не сягне ґрунту днища кар'єру і на призведе до його забруднення. Ілюстративна схема наведена на рис. 2.

Гранулометричний склад сталеплавильних шлаків на металургійних комбінатах України, як правило, знаходиться в межах 0-250 мм. Тому для подальшого планування використання сталеплавильних шлаків як закладної суміші шляхом комплексу лабораторних досліджень потрібно враховувати вихідний фактичний гранулометричний склад металургійних комбінатів.

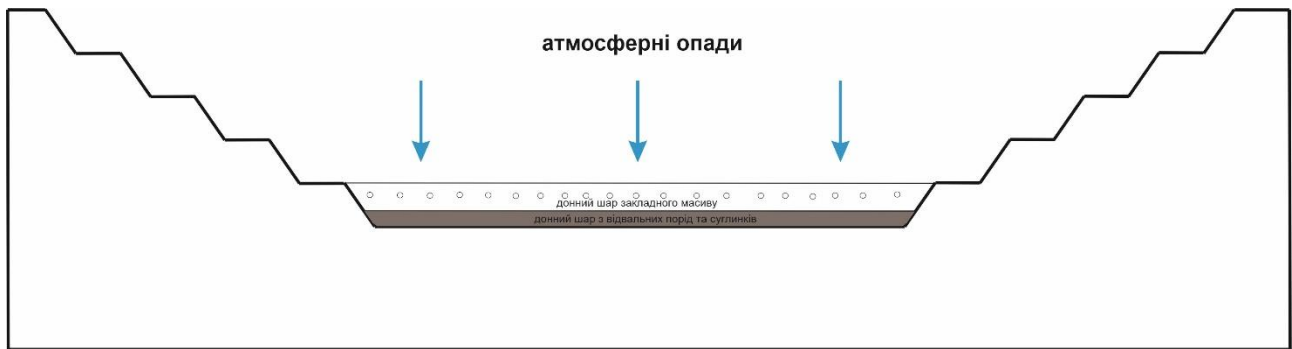


Рис. 2. Формування герметичного шару закладного масиву у днищі кар'єру

Вирішення завдання можливо шляхом виконання лабораторних досліджень на основі фізичного моделювання процесу проникнення води від атмосферних опадів крізь герметичний шар закладного матеріалу з металургійних шлаків.

Імітація натурних досліджень можлива за рахунок розміщення шару металургійних шлаків у спеціальному резервуарі зменшеного об'єму розмірами  $21,5 \times 29,5 \times 22,0$  см з послідовним додаванням води по площі закладного шару (рис. 3). Резервуар формується з мірною лінійкою.



Рис. 3. Лабораторний резервуар для дослідження потужності герметичного закладного шару за умов непроникненості крізь нього води

На підставі загальних положень теорії подібності процеси руйнування масивів сипучого середовища, описуються наступною системою критеріїв [18-20]:

$$\begin{cases} c_M = \alpha_l^{-1} \cdot \alpha_\gamma^{-1} \cdot c_H, \\ \operatorname{tg} \varphi_M = \operatorname{tg} \varphi_H \end{cases} \quad (1)$$

де  $\alpha_l^{-1}$  – лінійний масштаб моделі;  $\alpha_\gamma^{-1}$  – відношення щільності матеріалу природи та моделі;  $c_M$  – зчеплення в моделі;  $c_H$  – зчеплення в природі;  $\operatorname{tg} \varphi_H$  і  $\operatorname{tg} \varphi_M$  – коефіцієнти кута внутрішнього тертя відповідно природи та моделі.

В якості сипкого матеріалу закладного масиву, що імітує закладний масив відповідно до критеріїв подібності, використовуємо фракції сталеплавильних шлаків як і у природі, але просіяні або подрібнені, фізичні властивості яких майже ідентичні. В натурних умовах сила зчеплення у металургійних шлаків майже відсутня ( $c_H \approx 0$ ), її величина складає  $c = 0,02-0,04$  МПа, тому у моделі також повинно бути відсутнє зчеплення ( $c_M \approx 0$ ). Оскільки відомо, що частки матеріалу моделі менше 1 мм суттєво підвищують зчеплення, а у природі його значення ( $c_H \approx 0$ ) для того, щоб зберіглось значення у моделі потрібно виключити частки фракційного складу менше 1 мм [21]. Щільність часток шлаків  $\gamma$  та кут внутрішнього тертя  $\varphi$  природи і моделі приймаються аналогічними. Таким чином, дотримано подібність природи та моделі – рівність їх значень  $\gamma$ ,  $c$ ,  $\varphi$ .

Для відображення моделювання закладного масиву у спеціальному резервуарі зменшуємо розмір закладного матеріалу у масштабі 1:15 до натурального вигляду, після чого укладаємо шар сталеплавильних шлаків. Підбір фракційного складу для моделі здійснюється у пропорційному її зменшенні (у розмірі 1:15) до натурних умов з урахуванням критеріїв подібності (табл. 1)

Для підготовки фізичної моделі закладного шару використовується ситовий аналіз. Застосовуються сита розмірами від -20,0 до 1,0 мм (рис. 4). Здійснюється розсіювання сталеплавильного шлаку згідно встановленим фракціям фізичної моделі (табл. 1), після чого фракції перемішуються для приготування готової закладної суміші для імітації заповнення поверх донного шару кар'єру.

Таблиця 1

Відповідність природи гранулометричного складу сталеплавильних шлаків до моделі

Фракція сталеплавильного шлаку, мм	>250	250-120	120-60	60-10	10-0
Вміст фракцій, %	5,6	20,2	12,5	20,5	41,2
Фракція фізичної моделі, мм (1:15)	>17,0	17,0-8,0	8,0-4,0	4,0-1,0	–



Рис. 4. Комплекс сит для дослідження гранулометричного складу закладного матеріалу

Для дослідження висоти донного шару закладного масиву зі сталеплавильних шлаків потрібно у лабораторному резервуарі (рис. 3) сформувати закладні шари різної потужності в натурних умовах 1,0; 2,0 та 3,0 м, а у фізичній моделі ці розміри складуть відповідно 6,6; 13,2 та 19,8 см. Далі досліджується величина проникнення максимально можливої кількості атмосферних опадів крізь шар закладного масиву.

Формування закладного масиву з одночасним його ущільненням передбачається бульдозерним типом, вага яких може сягати 30-50 т залежно від типорозміру, тому до після укладання закладного шару повинне бути прикладене навантаження. Враховуючи площу лабораторного резервуару ( $S = 0,063 \text{ м}^2$ ) та варіацію ваги бульдозеру (крок 30; 40 та 50 т) на шар закладного масиву зі сталеплавильних шлаків необхідно прикласти навантаження з величинами 0,0012; 0,0015 та 0,0018 МПа відповідно.

Визначення обсягу атмосферних опадів пропонується здійснювати, ґрунтуючись на статистичних даних погодних умов на території України. З використанням даних Українського гідрометеорологічного центру з'являється можливість визначити стійку та середньозважену кількість атмосферних опадів та похмурих дощових днів на місяць за 120-річний період (з 1899 по 2019 рр.) [22].

Як приклад, визначимо усереднені величини атмосферних опадів, що покривають площу закладного донного шару та проникають крізь фракції закладного матеріалу для умов м. Маріуполь. За даними Українського гідрометеорологічного центру кількість сонячних та похмурих днів з опадами та середньої мінімальної і максимальної кількості опадів (мм) у м. Маріуполь наведено на рис. 5.



Після цього аналітично визначається максимально можлива кількість атмосферних опадів, що покриває закладний масив.

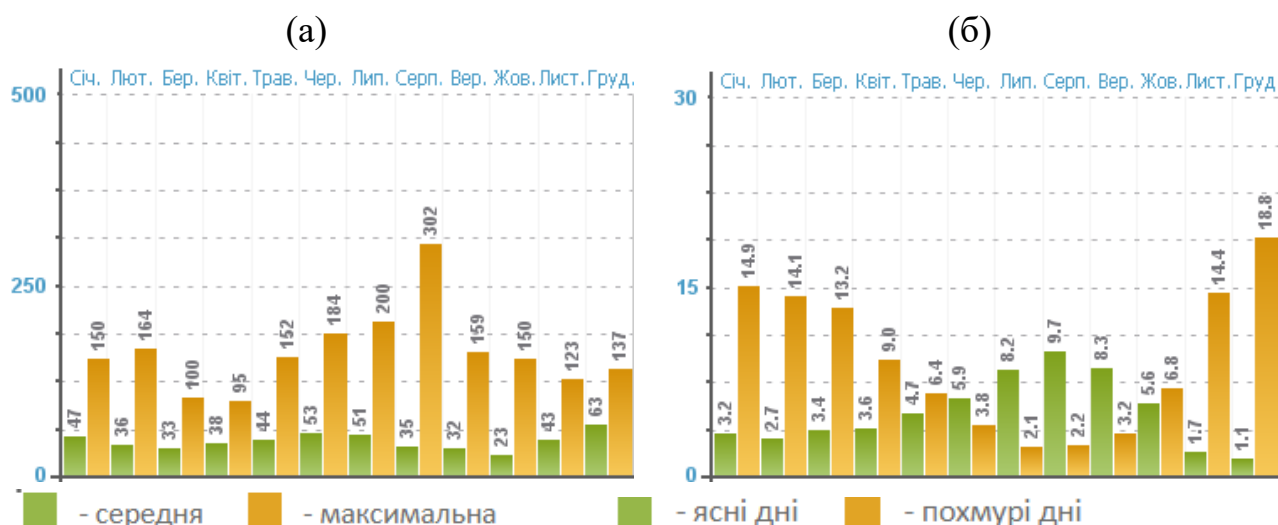


Рис. 5. Дані щодо середньої та максимальної кількості опадів (а) та кількості сонячних і похмурих днів з опадами (б) мінімальної та максимальна кількості опадів (мм) з 1899 по 2020 роки

Аналіз рис. 5а показує, що середнє арифметичне значення опадів складе 41,5 мм/місяць, але в фізичному моделюванні приймаємо максимальне значення за кількості місячних опадів – 63 мм (грудень). Згідно рис. 5б, приймається середнє арифметичне значення 7 днів з дощами на місяць. Враховуючи, що значення опадів 63 мм дорівнює  $63 \text{ л/м}^2$ , а з урахуванням 7 дощових днів в натурних умовах величина покриття площі закладного масиву атмосферними опадами в натурних умовах складе  $9 \text{ л/м}^2$ , приймаємо  $10 \text{ л/м}^2$ . Враховуючи площу лабораторного резервуару  $S = 0,063 \text{ м}^2$  на фізичну модель будуть діяти атмосферні опади з інтенсивністю  $0,63 \text{ л/м}^2$  на місяць. У дослідженні для встановлення закономірностей глибини проникнення води в закладний масив приймаємо кроки 0,25; 0,5; 0,75 та  $1,0 \text{ л/м}^2$ .

Поверхня ущільненого сталеплавильного шлаку у заповненому резервуарі поливається водою пропорційно по площі, при цьому експериментально вимірюється глибина проникнення води та фіксується обсяг можливого фільтрату, що утворився у днищі закладного шару. Глибина проникнення визначається шляхом вирізання ділянки закладного масиву насиченого водою та вимірювання лінійною рівня проникнення води у закладний шар. Дані досліджень наводяться у журнал (табл. 2).

Далі аналізуються дані лабораторних досліджень (табл. 2) для обґрунтування потужності закладного донного шару із сталеплавильних шлаків, а саме раціональні значення прикладеного навантаження, потужність шару та глибина проникнення атмосферних опадів у закладний масив. Якщо крізь герметичний закладний шар виділяється фільтрат, то рекомендується сталеплавильні шлаки з фракційним складом 0-250 мм перемішувати разом із суглинками розкривних

порід, що мають низькі фільтраційні властивості. Остаточне рішення щодо потужності (висоти) донного закладного шару приймається за умов відсутності проникнення води крізь шар закладного масиву зі сталеплавильних шлаків.

Таблиця 2

Форма журналу даних фізичного моделювання проникнення води крізь донний шар закладного масиву

Потужність шару, м		Прикладене навантаження до закладного шару, МПа		Кількість атмосферних опадів, л/м <sup>2</sup>		Глибина проникнення води, м		Наявність фільтрату у днищі закладного масиву, +/-
натура	модель	натура	модель	натура	модель	натура	модель	

**Дослідження фізичних властивостей закладного масиву.** При проектуванні технічної рекультивації шляхом заповнення кар'єрної порожнини закладним матеріалом із металургійних шлаків необхідно враховувати режим опадів. Дослідженнями встановлено наявність двох періодів осідання. Перший – інтенсивне осідання поверхні закладного масиву безпосередньо після його відсипання. Ущільнення відвалу на даному етапі відбувається під дією власної ваги. Протягом 8-15 днів осідання різко збільшуються. Потім інтенсивність процесу зменшується і різниця у величині осідань стабілізується. Через 1,5-3 місяці деформація поверхні майже припиняється [23]. Враховуючи ущільнення закладного масиву бульдозерним способом, суттєві деформації поверхні закладного масиву малоімовірні, але повністю не виключені. Тому підхід до формування закладного масиву повинен бути технічно обґрунтованим.

Для формування стійкого закладного масиву кар'єрних порожнин з металургійних шлаків важливим науково-технічним завданням є дослідження таких важливих фізико-хімічних характеристик як насипна щільність, пористість та коефіцієнт ущільнення закладного масиву, які пов'язані між собою.

Насипна щільність щебню або сумішей визначається згідно з ДСТУ Б В.2.7-71 (ГОСТ 8269.0) та/або ДСТУ Б В.2.7-264; дрібних заповнювачів у складі сумішей – згідно з ДСТУ Б В.2.7-232. В нашому випадку щебнем або сумішшю виступає суміш металургійних шлаків. Насипна щільність визначає вагу зерен сипкого матеріалу з урахуванням пор і порожнин у природному стані без його ущільнення і залежить від форми зерен та гранулометричного складу матеріалу.

Зразок закладного матеріалу із доменних та/або сталеплавильних шлаків насипають у попередньо зважений циліндр з висоти 10 см до формування конусу, який знімають сталеву лінійкою врівень з краями (без ущільнення) рухом до себе, після чого циліндр із закладним матеріалом зважується.

Насипна густина закладного матеріалу  $\gamma_n$ , кг/м<sup>3</sup> визначається за формулою:

$$\gamma_n = \frac{m_1 - m}{V}, \quad (2)$$

де  $m$  – маса мірного циліндру, кг;  $m_1$  – маса мірного циліндру із закладним матеріалом, кг;  $V$  – об’єм мірного циліндру, м<sup>3</sup>.

Пустотність закладного матеріалу визначається також за методикою, викладеною у ДСТУ Б В.2.7-71 (ГОСТ 8269.0) та/або ДСТУ Б В.2.7-264. Цей параметр визначає наявність пустот між зернами сипкого матеріалу і визначається розрахунковим шляхом на підставі попередньо встановлених значень середньої щільності зерен і насипної щільності. Пустотність закладного матеріалу  $V_{n.z}$  визначають за формулою:

$$V_n = \left( 1 - \frac{\gamma_n}{\gamma_k \cdot 1000} \right) \cdot 100, \% , \quad (3)$$

де  $\gamma_n$  – насипна щільність, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_k$  – середня щільність зерен закладного матеріалу, кг/см<sup>3</sup>.

Пустотність закладного матеріалу з металургійних шлаків можна визначити в ущільненому стані, включивши до формули насипну щільність в ущільненому стані. Коефіцієнт ущільнення закладного матеріалу може бути визначений дослідним шляхом. В підготовлений лабораторний резервуар прямокутної форми засипається зразок закладного матеріалу – сталеплавильний, доменний гранульований, доменний відвальний шлак або їх суміш, який розрівнюється по поверхні. Здійснюється розрахунок об’єму лабораторного резервуару  $V_1$ . Далі до поверхні прикладається навантаження величиною: 0,0012; 0,0015 та 0,0018 МПа, що імітує ущільнення від формування закладного масиву бульдозером. Після зняття навантаження з поверхні закладного матеріалу за допомогою лінійки вимірюється відстань від верхнього краю резервуару до рівня ущільненого закладного масиву. Далі здійснюється розрахунок об’єму ущільненого закладного масиву  $V_2$ . Коефіцієнт ущільнення закладного масиву може бути визначено за формулою:

$$K_y = \frac{V_1}{V_2}, \quad (4)$$

де  $K_y$  – коефіцієнт ущільнення закладного матеріалу;  $V_1$  – об’єм повного резервуару з відсипаним неуцільненим закладним матеріалом, м<sup>3</sup>;  $V_2$  – об’єм ущільненого матеріалу в резервуарі, м<sup>3</sup>.

У зв’язку із різними фізико-механічними властивостями і гранулометричним складом сталеплавильного, доменного гранульованого та доменного відвального шлаку та враховуючи обсяги утворення різних видів металургійних шлаків, що підлягають утилізації (продукт, що не реалізується) на металургійних комбінатах для вибору оптимального складу закладного масиву з покращеними фізичними властивостями пропонується дослідити закладні суміші різного компонентного складу. При кожній варіації компонентного складу закладної суміші

до імітованого закладного масиву у резервуарі прикладається навантаження з величинами: 0,0012; 0,0015 та 0,018 МПа і визначається насипна щільність ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ), пустотність (%) й коефіцієнт ущільнення. В лабораторних умовах також може бути використаний геометричний критерій подібності натурних умов та моделі закладного масиву. Отримані експериментальні дані фізичних властивостей наводяться у таблицю 3.

Таблиця 3

Форма журналу експериментальних даних з визначення фізичних властивостей закладного матеріалу

Співвідношення компонентів у закладній суміші, % ДВ:СШ:ДГШ	Прикладене навантаження до закладного шару, МПа	Насипна щільність, $\text{кг}/\text{м}^3$	Пустотність, %	Коефіцієнт ущільнення

\*ДВ – доменний відвальний шлак; СШ – сталеплавильний шлак; ДГШ – доменний гранульований шлак

Наступним етапом є проведення аналізу експериментальних даних (табл. 3) та встановлення закономірностей зміни пустотності й коефіцієнту ущільнення від компонентного складу закладної суміші та величини прикладеного навантаження.

**Прогнозування деформацій та стійкості закладного масиву з металургійних шлаків.** Для дослідження напружено-деформованого стану природних та штучних масивів у гірничий науці широке розповсюдження отримав метод чисельного моделювання кінцевими елементами [24-26]. Шляхом виконання чисельного моделювання встановлюються напруження та деформації масиву гірських порід навколо підземних гірничих виробок, бортів кар'єрів та укосів відвалів порід, і прогнозується коефіцієнт стійкості. Оцінка геомеханічного стану важлива для досягнення стійкості як природних, так і техногенних масивів [27-28].

Для опису геомеханічних процесів в масиві укосу використовують різні критерії міцності, однак всі вони використовують різні набори вихідних даних і фізико-механічних характеристик. Критерії Кулона-Мора та Друккера-Прагера добре описують поведінку масиву м'яких порід або ґрунтів, тому застосовуються для оцінки стійкості укосів, насипних масивів, котлованів, гребель, наземних геотехнічних систем тощо [26]. Враховуючи те, що для сипкого закладного матеріалу найважливішими фізико-механічними властивостями є кут внутрішнього тертя та зчеплення, а наявний програмний пакет SolidWorks Ansys для проведення чисельного моделювання методом кінцевих елементів в типі пружно-пластичної моделі Друккера-Прагера має функцію вводу саме цих даних. Таким чином, для дослідження деформаційних процесів насипного закладного масиву приймаємо саме цей тип моделі та критерій міцності Друккера-Прагера.

Проведенню чисельного моделювання передуює розробка розрахункової схеми досліджень деформаційних процесів у закладному масиві (рис. 6а та 6б).

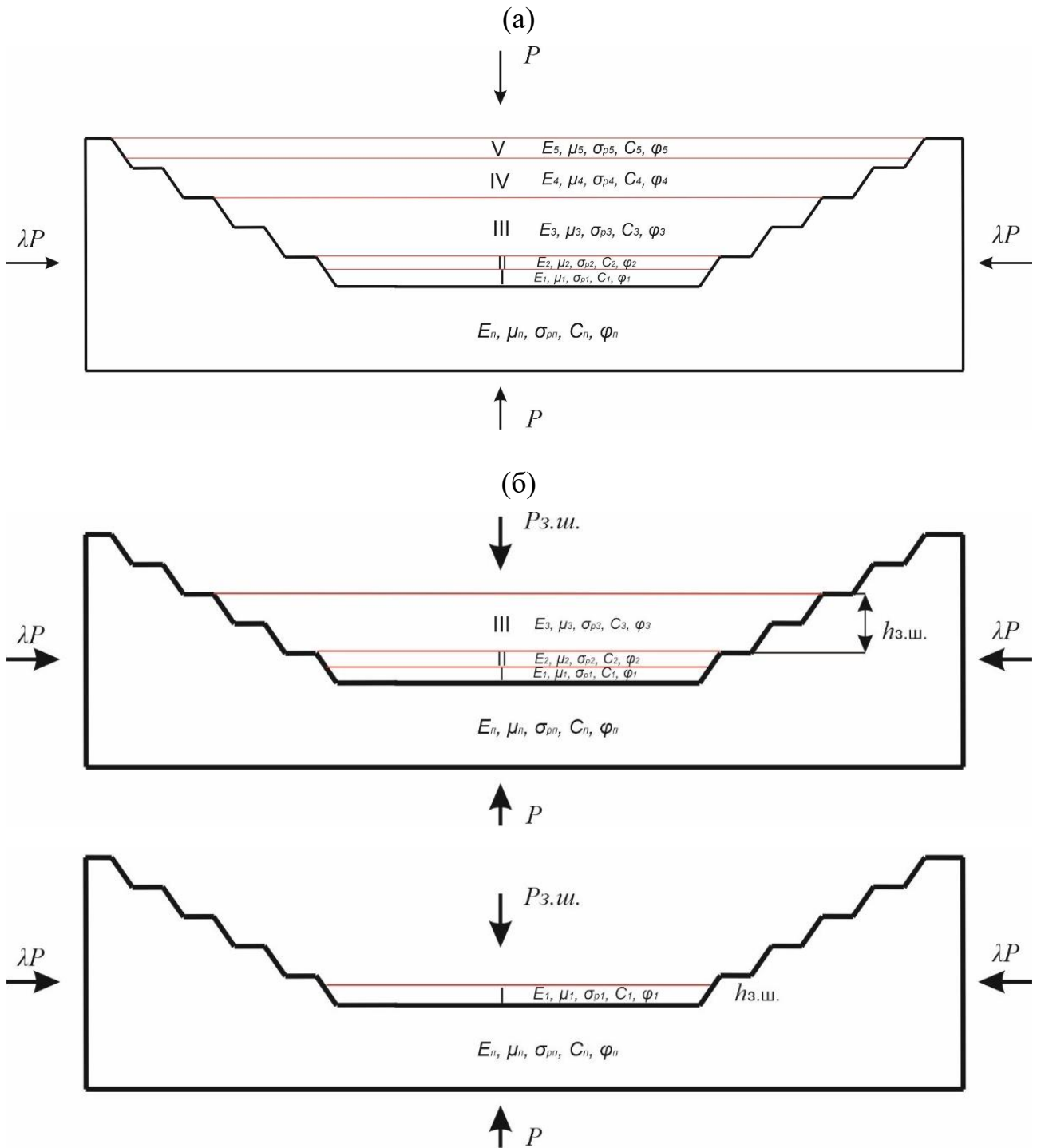


Рис. 6. Розрахункова схема до визначення деформацій закладного масиву (шару): прикладення навантаження на сформований закладний масив (а); прикладення навантаження на відповідний закладний шар (б)

На рис. 6а наведено схему для чисельного моделювання деформаційного стану повного сформованого закладного масиву з металургійних шлаків на завершальній стадії рекультиваційних робіт, приклад якого наведено на рис. 7.



Рис. 7. Приклад побудованої моделі закладного масиву кар'єрної пустоти

По завершенню проекту рекультивації з часом рекультивована територія може бути використана під будівництво інфраструктурних об'єктів, які будуть створювати навантаження на закладний масив. Тому для дослідження можливих деформацій денної поверхні на модель заповненого кар'єру прикладається навантаження з кроком: 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 МПа, що відповідає вазі цивільних будівель різних розмірів. Знизу модель жорстко зафіксовується, а по боках моделі діятиме горизонтальна компонента тиску з урахуванням коефіцієнту бічного розпору. В кожний закладний шар вводяться вихідні дані фізико-механічних властивостей закладних шарів, які визначаються лабораторними дослідженнями або за даними лабораторій підприємств. Після виконання чисельних розрахунків аналізується отримана епюра деформацій закладного масиву, після чого величини деформацій порівнюються з нормативними вимогами.

На рис. 6б наведено схему для чисельного моделювання деформаційного стану донного та наступного закладного шару за умов дії власної ваги вище розташованих шарів закладного масиву. Для цього здійснюється в моделі варіювання потужностями закладних шарів та встановлюється за геомеханічним фактором їх оптимальні розміри.

Приклад журналу вихідних даних фізико-механічних властивостей граніту (днище кар'єру), відвальних порід (донний шар), доменних й сталеплавильних шлаків (донний та наступні шари) та суглінків (поверхневий шар), які вводяться до моделі, наведено у таблиці 4.

За допомогою функції зондування в функції Simulation SolidWorks є можливість зробити вимір деформацій в будь-якій точці моделі. Далі аналізується епюра деформацій кожного закладного шару та всього закладного масиву і обґрунтовуються його раціональні параметри за умови мінімізації деформацій денної поверхні. Шляхом зміни в геомеханічній моделі фізико-механічних властивостей та потужності шару закладного масиву з металургійних шлаків з'являється можливість встановити прогноз розвитку деформацій.

Таблиця 4

Журнал вихідних даних фізико-механічних властивостей закладного масиву

Найменування	СШ	ДВШ	ДГШ	Відвальні породи	Граніт	Суглинок
Модуль пружності $E$ , МПа						
Коефіцієнт Пуассона, $\mu$						
Щільність при ущільненні $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>						
Зчеплення $c$ , МПа						
Кут внутрішнього тертя $\varphi$ , град						
Міцність на розтяг, $\sigma_p$ , МПа						

\*СШ – сталеплавильний шлак; ДВШ – доменний відвальний шлак;  
ДГШ – доменний гранульований шлак

**Висновки.** Для відтворення природних ландшафтів гірничодобувних регіонів з відкритим способом розробки корисних копалин раціонально застосовувати закладання виробленого простору, де в якості закладного матеріалу кар'єрних пустот пропонуються металургійних шлаки, які за класом небезпечності є мало-небезпечним, на що вказує також український та закордонний досвід їх досліджень для сфери будівництва.

Запропоновано спосіб формування закладного масиву у кар'єрних пустотах за принципом шаруватості, який передбачає формування низки закладних шарів при комбінації в різних пропорційних співвідношеннях сталеплавильних, доменних відвальних та доменних гранульованих шлаків.

Реалізація в практиці технологічної схеми заповнення кар'єрів металургійними шлаками повинна ґрунтуватись на низці особливостей – науковому обґрунтування безпечності можливого контакту шлаків з кар'єрними водами та оптимальних властивостей закладного масиву (гранулометричний склад, пустотність, усадка), що досягається комплексом теоретичних та лабораторних досліджень, а також методу фізичного моделювання. Прогноз розвитку деформаційних процесів у закладному масиві доцільно здійснювати шляхом чисельного моделювання методом кінцевих елементів з використанням критерія Друккера-Прагера, що застосовується для ґрунтів та сипких матеріалів.

В роботі створено комплекс методик для обґрунтування раціональних параметрів формування закладних масивів з металургійних шлаків.

### Перелік посилань

1. Півняк, Г.Г., Гуменик, І.Л., Дребенштедт, К., & Панасенко, А.І. (2011). *Наукові основи раціонального природокористування при відкритій розробці родовищ*. Дніпропетровськ, Україна: Національний гірничий університет.
2. Ложніков, О.В., & Романченко, Ю.В. (2014). Розробка технології гірничотехнічної рекультивації обводнених залишкових вироблених просторів кар'єрів. *Геотехнічна механіка*, (14), 34-42.
3. Літвінов, Ю.І. (2018). *Технологічні засади розкриття та розробки горизонтальних кар'єрних полів при обмеженому порушенні природних ресурсів*. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.15.03 «Відкрита розробка родовищ корисних копалин». Дніпро, Україна: НТУ «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки.
4. Федонюк, В.В., Волянський, В.О., & Федонюк, М.А. (2016). Порівняльний економічний аналіз проведення рекультивації різних видів на порушених землях. *Актуальні проблеми економіки*, (9), 203-212.
5. Melnyk, O.H. (2020). Some aspects of soil's legal protection: conservation and reclamation in Ukraine and the EU. *Juridical Scientific and Electronic Journal*, (3), 188-190.  
<https://doi.org/10.32782/2524-0374/2020-3/45>
6. Собко, Б.Ю., Ложніков, О.В., & Романченко, Ю.В. (2015). Обґрунтування параметрів технологічних схем гірничотехнічної рекультивації обводнених залишкових вироблених просторів кар'єрів. *Збірник наукових праць НГУ*, (48), 88-95.
7. Ляшенко, В.И., Дудченко, А.Х., & Ткаченко, А.А. (2008). Научно-технические основы природоохранных технологий подземной разработки урановых месторождений. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*, (4), 34-42.
8. Kuzmenko, O., & Petlovanyi, M. (2015). Substantiation the expediency of fine gridding of cementing material during backfill works. *Mining of Mineral Deposits*, 9(2), 183-190.  
<https://doi.org/10.15407/mining09.02.183>
9. *Звіт з оцінки впливу на довкілля ДП СхідГЗК. Смолінська шахта. Рекультивація кар'єру ніску*. (2019). Жовті Води, Україна: УкрНДПРІ, 132 с.
10. Козловский, А.А., & Хоменко, Н.Н. (2010). Использование выработанного пространства карьера в качестве полигона для складирования промышленных отходов. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, (9), 285-288.
11. Ахмедьянов, И.Х., Красавин, В.П., Данилов, О.Н., Григорьев, В.В., & Калмыков, В.Н. (2014). Горнотехническая рекультивация учалинского карьера с использованием обезвоженных хвостов обогащения. *Горный журнал*, (7), 24-29.
12. Спильник, Н.В., & Щербак, С.А. (2013). Использование гранулированных шлаков от производства силикомарганца при изготовлении строительных материалов. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*, (3), 175-179.
13. Petlovanyi, M., & Filonenko, O. (2019). Problematic aspects and ways to increase the level of metallurgical slags disposal. In *International Scientific Conference Scientific Development of New Eastern Europe: Conference Proceedings* (pp. 55-60). Riga, Latvia: Baltija Publishing.  
<https://doi.org/10.30525/978-9934-588-13-6-17>
14. Proctor, D.M., Shay, E.C., Fehling, K.A., & Finley, B.L. (2002). Assessment of human health and ecological risks posed by the uses of steel-industry slags in the environment. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 8(4), 681-711.  
<https://doi.org/10.1080/20028091057150>
15. Брызгалов, С.В. (2009). *Снижение негативного воздействия доменных шлаков при их утилизации на объекты гидросферы*. Дисертація на соискание научной степени кандидата технических наук по специальности ВАК РФ 03.00.16 – «Экология». Пермь, Россия: Пермский государственный технический университет.
16. ТУ У 08.1-00191158-002:2020. (2020). *Суміші закладні із металургійних шлаків ПРАТ «МК «Азовсталь» та ПРАТ «ММК ім. Ілліча» для технічної рекультивації техногенно порушених земель*.



17. Петлёванный, М.В., Кузьменко, А.М., Сай, Е.С., & Филоненко, А.В. (2019). Взаимосвязь технологических параметров формирования закладочного массива с его качественными характеристиками. *Физико-технические проблемы горного производства*, (21), 91-105.
18. Бахаева, С.П., Тур, К.А., & Илюшкин, В.Д. (2020). Геомеханическое обоснование устойчивости отвала при совместном складировании вскрышных песчано-глинистых пород и отходов обогащения. *Вестник Кузбасского государственного технического университета*, (4), 49-59.
19. Федорова, Е.А. (2011). Моделирование деформаций отвалов, нагруженных шагающим экскаватором при подрезке откосов. *Вестник ЧитГУ*, (2), 112-116.
20. Баловнев, В.И. (2014). *Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин*. Москва, Россия: МАДИ, 148 с.
21. Косенко, А.В., & Тарасютін, В.М. (2018). Дослідження технологічного процесу випуску руди на основі фізичного моделювання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського: Серія «Технічні науки»*, 29(68), 73-79.
22. Український гідрометеорологічний центр. (2020). Режим доступ <https://meteo.gov.ua/>
23. *Методические указания по проектированию рекультивации нарушенных земель на действующих и проектируемых предприятиях Минуглепрома СССР*. (1988). – Пермь, Россия: ВНИИОСуголь, 292 с.
24. Shashenko, O.M., Napieiev, S.M., Shapoval, V.G., & Khalymendyk, O.V. (2019). Analysis of calculation models while solving geomechanical problems in elastic approach. *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*, (1), 28-36  
<https://doi.org/10.29202/nvngu/2019-1/21>
25. Bondarenko, V., Symanovych, H., Barabash, M., Husiev, O., & Salieiev, I. (2020). Determining patterns of the geomechanical factors influence on the fastening system loading in the preparatory mine workings. *Mining of Mineral Deposits*, 14(1), 44-50.  
<https://doi.org/10.33271/mining14.01.044>
26. Petlovanyi, M., Lozynskiy, V., Saik, P., & Sai, K. (2019). Predicting the producing well stability in the place of its curving at the underground coal seams gasification. *E3S Web of Conferences*, (123), 01019.  
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201912301019>
27. Шустов, О.О., Петльованій, М.В., Зубко, С.А., & Шерстюк, Є.А. (2019). Геомеханічні проблеми стійкості природно-техногенних масивів рудних родовищ. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (58), 154-165.
28. Ракишев, Б.Р., Шашенко, А.Н., Молдабаев, С.К., Ковров, А.С., Сеитулы, К. (2013). Численное моделирование геомеханических процессов во внутренних отвалах на наклонном основании. *Промышленность Казахстана*, 80(№5), 79-82.

#### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Разработка методического алгоритма выполнения аналитических и экспериментальных исследований для обоснования рациональных параметров формирования закладочного массива с металлургических шлаков в отработанных карьерных полостях.

**Методика исследований.** Для достижения поставленной цели предложено и обосновано использование метода физического моделирования для исследования степени проницаемости атмосферных осадков в закладочный массив и определения его ключевых физических свойств с учетом критериев подобия природы и модели. Обосновано использование численного моделирования методом конечных элементов для прогнозирования деформаций закладочного массива и достижения его устойчивого состояния.

**Результаты исследований.** Изложены теоретические аспекты порядка формирования устойчивого закладочного массива по различным видам металлургических шлаков под действием нагрузки, слою которого характеризуются различными физическими свойствами. Предложено высоту донного герметичного закладочного слоя формировать из сталеплавильных шлаков в

условиях степени проницаемости атмосферных осадков и образования фильтрата. Определены характеристики физической модели закладочного массива и максимального количества осадков, которые будут влиять на его поверхность. Выделены ключевые физические свойства основных слоев закладочного массива (пустотность, насыпной вес, коэффициент уплотнения) и способы их определения для формирования его устойчивого состояния. Определены особенности численного моделирования деформаций закладочного массива на основе модели прочности Друккера-Прагера для сыпучих материалов в программном пакете SolidWorks.

**Научная новизна.** Созданы научно-методические основы формирования безопасного и устойчивого закладочного массива карьерных пустот на основе металлургических шлаков.

**Практическое значение.** Разработанный методический алгоритм позволяет определить параметры формирования закладочного массива с последующим восстановлением природных ландшафтов и утилизировать существенные объемы безопасных промышленных отходов в карьерных полостях.

**Ключевые слова:** *сталеплавильный шлак, доменный шлак, закладочный материал, рекультивация, гранулометрический состав, физическое моделирование.*

#### ABSTRACT

**Purpose.** Development of a methodological algorithm for performing analytical and experimental studies to substantiate rational parameters for the formation of a filling mass from metallurgical slags in worked-out opencast cavities.

**Methodology.** The use of the physical modeling method to study the degree of permeability of atmospheric precipitation into the filling massif and determine its key physical properties, considering the criteria for the similarity of nature and the model, was proposed and substantiated. The use of numerical modeling by the finite element method for predicting deformations of the filling mass and achieving its stable state has been substantiated.

**Results.** Theoretical aspects of the order of formation of a stable filling mass for various types of metallurgical slags under the action of a load, the layers of which are characterized by different physical properties, are presented. To form the height of the bottom sealed filling layer from steel-making slag in conditions of the degree of permeability of atmospheric precipitation and the formation of filtrate it is proposed. The characteristics of the physical model of the filling mass and the maximum amount of precipitation, which will affect its surface, have been determined. The key physical properties of the main layers of the backfill massif (voidness, bulk density, compaction coefficient) and methods of their determination for the formation of its stable state are highlighted. The features of the numerical modeling of the deformations of the filling mass based on the Drucker-Prager strength model for bulk materials in the SolidWorks software package have been determined.

**Original.** The scientific and methodological foundations for the formation of a safe and stable filling array of opencast cavities based on metallurgical slags have been created.

**Practical implication.** A methodological algorithm has been developed that makes it possible to determine the parameters of the formation of a filling mass with the subsequent restoration of natural landscapes and to dispose of significant volumes of safe industrial waste in quarry cavities.

**Keywords:** *steelmaking slag, blast furnace slag, filling material, recultivation, particle size distribution, physical modeling.*