

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ФІЛОНЕНКО ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 622.271.32: 622.83

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАКЛАДНОГО МАСИВУ  
КАР'ЄРНИХ ПУСТОТ НА ОСНОВІ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ**

в галузі знань 18 «Виробництво та технології»

184 «Гірництво»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ Філоненко О.В.

Науковий керівник – Бондаренко Володимир Ілліч, д.т.н., професор

Дніпро – 2022

## АНОТАЦІЯ

Філоненко О.В. Обґрунтування параметрів закладного масиву кар'єрних пустот на основі металургійних шлаків. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 184 «Гірництво». – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2022.

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою в галузі гірництва, в якій подане вирішення нового наукового завдання з обґрунтування техніко-економічних параметрів утилізації металургійних шлаків шляхом формування закладного масиву у виробленому просторі кар'єру на основі встановлених закономірностей зміни продуктів взаємодії металургійних шлаків як закладних матеріалів з кар'єрною водою і характеру зміни їх фізико-механічних характеристик під впливом механічного ущільнення. В результаті вирішення завдання досягається безпечність використання металургійних шлаків як закладних матеріалів, мінімізація деформацій при формуванні закладного масиву та ефективне відновлення територій під різноспрямоване використання в економіці.

На основі проведеного аналізу встановлено, що близько 10% всіх щорічних накопичень промислових відходів складають відходи переробної промисловості, з яких домінує значення із показником 70% займають відходи металургійного виробництва. Визначено, що низький рівень утилізації металургійних шлаків в Україні обумовлений недосконалістю законодавчої бази, де шлаки фігурують як відходи, а не побічний продукт, що юридично обмежує їх використання з екологічної точки зору, та відсутністю дієвих механізмів для стимулювання цільового використання шлаків у різних галузях економіки. Рекомендовано в умовах логістичної ізоляції та відсутності суттєвого ринку збуту шлакової продукції дослідити напрям утилізації – закладання доступного виробленого простору кар'єрів шляхом доведення безпечності впливу на довкілля та визначення раціональних параметрів закладних сумішей.

Розроблено алгоритм і комплексний науково-методичний підхід до вирішення наукових завдань, що включає фундаментальні основи механіки сипучого середовища; аналіз якості води методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою; фізичне моделювання закладного масиву із дотриманням критеріїв подібності; лабораторні дослідження фізико-механічних та деформаційних характеристик; чисельне моделювання методом скінченних елементів; оцінку економічної ефективності запропонованих рішень.

На основі проведення лабораторних досліджень встановлено, що при контакті кислих високомінералізованих природних кар'єрних вод із вмістом 33 – 67% сталеплавильних шлаків концентрації забруднюючих речовин змінюються за поліноміальними залежностями від часу їх взаємодії, зменшуючись на 30-ту добу, що усуває небезпеку для водоносного горизонту. При контакті кар'єрних вод із доменними відвальними шлаками спостерігається зростання концентрацій сульфідів та азоту амонійного. Це дало змогу визначити, що найбільш ефективно та безпечно формування донного закладного масиву у кар'єрних пустотах досягається розміщенням у днище закладного масиву саме сталеплавильних шлаків, що обумовлене наступним: більшою міцністю часток сталеплавильного шлаку та меншою пористістю, що створює жорстку основу закладному масиву; меншим коефіцієнтом фільтрації; відсутністю критичного забруднення підземних вод, що прибуватимуть у днище кар'єру.

Фізичним моделюванням встановлено, що глибина проникнення води у закладний масив від дії атмосферних опадів зі сталеплавильними шлаками зменшується зі ступенем його ущільнення прикладеним навантаженням за поліноміальною залежністю 2-го порядку. Встановлено відсутність появи інфільтрату крізь закладний масив. Глибина проникнення води у закладний масив у певний проміжок часу пов'язана з коефіцієнтом фільтрації ( $k_f$ ), який від ущільнення закладного масиву зменшиться у 1,4 – 2,0 рази.

Отримано залежність зміни величини усадки суміші доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30, що

характеризується більш позитивною динамікою зміни усадки в контексті її зменшення, ніж використання однокомпонентного складу лише із доменних відвальних шлаків. Величина усадки дослідженої суміші доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30 поліноміально залежить від прикладеного навантаження.

На основі чисельного моделювання виявлено, що формування у виробленому просторі кар'єру закладного масиву з ущільненням ефективніше за «звичайне відсипання», про що свідчить зниження величини деформацій денної поверхні на 28%. Виявлено, що величина осідань поверхні закладного масиву лінійно залежить від прикладеного навантаження. Збіжність результатів лабораторних досліджень осідань закладного масиву з результатами чисельного моделювання склала 86 – 93%.

Достовірність наукових результатів підтверджується використанням апробованих стандартних та нормативних методик визначення фізико-механічних властивостей матеріалів, дотриманням критеріїв подібності при фізичному моделюванні, проведенням чисельних експериментів на науково-обґрунтованих геомеханічних моделях, достатньою збіжністю результатів лабораторних досліджень із чисельним моделюванням (рівень розбіжності склав 15 – 18%) і порівнянням з науковими роботами багатьох авторів у досліджуваній галузі.

На основі отриманих наукових результатів лабораторних досліджень, фізичного та чисельного моделювання обґрунтовано раціональні параметри формування закладного масиву у виробленому просторі кар'єру, а саме: черговість та етапи розміщення закладних матеріалів; вид шлакового матеріалу для формування елементів закладного масиву; компонентний склад основної наповнювальної суміші; висота закладних шарів із різними властивостями; щільність закладного матеріалу; об'єми та терміни закладання.

Вперше розроблено нормативний документ, що пройшов державну експертизу ТУ У 08.1-00191158-002:2020 «Суміші закладні із металургійних шлаків ПрАТ «МК «Азовсталь» та ПрАТ «ММК ім. Ілліча» для технічної рекультивації техногенно порушених земель», що регламентує використання

металургійних шлаків як закладних матеріалів при рекультивації виробленого простору кар'єрів.

Встановлено, що економічна ефективність досягається при варіанті формування закладного масиву, який вигідніше на 7,27 грн/т (або на 8,2%), ніж варіант із розміщенням у новому місці видалення відходів. На реальному прикладі ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча» (ПрАТ «ММК ім. Ілліча») визначено, що формування закладного масиву у доступному виробленому просторі кар'єру дозволить наступне: відновити 50 га цінних земель; утилізувати 22 млн т металургійних шлаків протягом 11 років; використовувати відновлену площу земель для будівництва промислових і цивільних об'єктів або іншого господарського використання із дотриманням безпечних умов щодо критичних осідань денної поверхні.

*Ключові слова:* металургійні шлаки, відходи, закладний матеріал, вироблений простір, кар'єр, закладний масив, стійкість, підземні води, чисельне моделювання, фізичне моделювання, фізико-механічні властивості, деформації поверхні, раціональні параметри, економічна оцінка, раціональне природокористування.

## ANNOTATION

Filonenko O.V. Substantiation of the backfill mass parameters for quarry cavities based on metallurgical slags. – Qualifying scientific work manuscript.

Dissertation for a PhD Degree in 184 Mining. – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2022.

This Dissertation is a completed scientific research work in mining that expounds solution to a new scientific problem of efficient backfill parameters justification for open pit mines based on figured pattern change of ferrous slags backfill materials and quarry water interaction products, figured pattern change of physical and mechanical characteristics due to mechanical compaction. Environmental safety proof of ferrous slags as backfill material, declining of backfill layers deformation, and effective rehabilitation of lands disturbed by mining for new economic land use is an outcome of scientific problem solution.

Based on statistical analysis, about 10% of annually deposited industrial waste is accounted for processing industry. While 70% of processing industry waste is accounted for ferrous metallurgy. In fact, low level of ferrous slags utilization in Ukraine is attributed to inefficient regulation that identifies ferrous slags as waste (not as byproduct). This poses a legal barrier on slag market from environmental perspective. In addition, there are no effective incentives for slag use in various branches of economy. Therefore, in case of logistics failure and unfavorable ferrous slag market demand, a rational option to pursue is to backfill available open pit mines with ferrous slags taking into account environmental safety issues and efficient parameters of backfill mixtures.

This work integrates developed algorithm and complex methodological approach to solving scientific problems, including fundamentals of bulk mechanics; water quality analysis by atomic emission spectrometry (inductively coupled plasma method); physical modelling of backfill space with similarity criteria compliance; laboratory research of mechanical and deformation parameters; numeric modelling with finite elements method; assessment of economic efficiency of proposed solutions.

Laboratory research demonstrates that in case of acidic and highly mineralized quarry water and basic oxygen furnace (BOF) slag (33 – 67% of volume) contact, the concentrations of pollutants follow polynomial dependency on contacting time with concentrations declining after 30 days. Using this fact will allow to reduce significantly safety risk to the aquifer. In case when the quarry water contacts blast furnace (BF) slag, it causes raising of sulfates and nitrogen ammonia concentrations. The above-mentioned facts allowed identifying that BOF slag is more effective and safe material for the bottom backfill layer for open pit mines. BOF slag particles hardness and low porosity create a hard basis for the subsequent backfill layers, possess lower filtration coefficient, and eliminate critical ground water pollution from the underground inflows to the open pit bottom level.

Physical modelling demonstrates that water penetration depth via BOF backfill layer from atmospheric precipitation reduces with higher compaction rate by loading according to 2-nd order polynomial dependency. No infiltration through BOF backfill layer occurs. The depth of water penetration through backfill layer during a certain time period depends on filtration coefficient ( $k_f$ ), which can be reduced by 1.4 – 2.0 times via backfill layer compaction.

BF and BOF slag mix (70:30) possesses a lower shrinkage value than BF slag as mono-component backfill layer. The shrinkage value of BF and BOF slag mix with 70:30 ratio will have polynomial dependence on the loading applied.

According to numerical modelling, the construction of backfill layers at the open pit with compaction is more efficient than just backfilling with no compaction. Compaction provides lower surface deformation value by 28%. Shrinking value of backfill layers has a linear dependency on the loading applied. Convergence of laboratory experimental data and numerical modelling of backfill layers shrinkage is in the range 86 – 93%.

The use of recognized standard and normative methodologies for physical and mechanical material properties identification; compliance with similarity criteria for physical modelling; conduction of numerous scientifically based experiments on geo-mechanical models; convergence of laboratory analysis results and numerical modelling

(15 – 18% divergence range); and comparison with similar researches of the number of authors, confirms the reliability of scientific results presented in this manuscript.

This work identifies the following efficient open pit backfill layers parameters based on achieved scientific results from laboratory research of physical and numerical modelling: the sequence and stages of backfill material placing, component composition of main backfill mixtures, height of the backfill layers with various properties, backfill material density, backfill volumes and terms.

For the first time, a regulatory document has been developed that has passed the state examination, TU U 08.1-00191158-002: 2020 «Embedded mixtures from metallurgical slags of PJSC MK Azovstal and PJSC Mariupol Metallurgical Plant named after Ilyich for the technical reclamation of technologically disturbed lands», which regulates the use of metallurgical slags as embedded materials in the reclamation of the mined-out area of open pits.

Economic efficiency analysis demonstrates that open pit mine backfilling with ferrous slags option is 7.27 UAH/ton (or 8,2%) more advantageous than ferrous slags depositing at newly created waste disposal site. The real case of Mariupol Metallurgical Plant named after Ilyich proves that an open pit backfill option at available barren quarry will allow saving 50 hectares of agricultural lands and utilizing 22 million tons of ferrous slags during 11 years. The rehabilitated open pit mine lands will be usable for industrial or civil construction, or any other land use activity tolerable to surface subsidence.

*Key words:* metallurgical slags, waste; backfill material, quarry, backfill, underground water, stability, numerical and physical modelling, physical and mechanical properties, surface deformation, rational parameters, economic evaluation, rational nature management.



**Наукові праці, в яких опубліковані основні  
наукові результати дисертації**

*Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування  
до переліку наукових фахових видань України*

1. Бондаренко, В.І., Філоненко, О.В., Петльований, М.В., & Руських, В.В. (2021). Обґрунтування використання металургійних шлаків як закладного матеріалу кар'єрних пустот. *Вісті Донецького гірничого інституту*, (2), 15-25. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-15-25>

2. Філоненко, О.В., & Петльований, М.В. (2021). Методика дослідження параметрів формування закладного масиву кар'єрних пустот з металургійних шлаків. *Збірник наукових праць НГУ*, (64), 81-98. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.081>

3. Бондаренко, В.І., & Філоненко, О.В. (2020). Аналіз накопичення та впливу металургійних шлаків на навколишнє природне середовище. *Збірник наукових праць НГУ*, (61), 78-93. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.078>

4. Петлёваный, 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. <https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.011>

*Статті у періодичних наукових виданнях, що входять  
до баз даних Scopus та/або Web of Science*

5. Filonenko, O. (2018). Sustainable development of Ukrainian iron and steel industry enterprises in regards to the bulk manufacturing waste recycling efficiency improvement. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 115-122. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.115>

*Статті у виданнях іноземних держав, які входять до складу ОЕС*

6. Filonenko, O. (2021). Environmental impact assessment of ferrous slags application as backfill material for technical rehabilitation of lands degraded by mining. *Insights in Mining Science & Technology*, 2(5), 555-597. <https://doi.org/10.19080/IMST.2021.02.555597>

*Публікації, у яких додатково відображено зміст дисертації*

7. Филоненко, А.В. (2019). Повышение эффективности утилизации крупнотоннажных промышленных отходов на предприятиях черной металлургии Украины. *Экология и промышленность*, 2(59), 78-87. <https://doi.org/10.35477/2311-584x.59.78-87>

8. Филоненко, А.В. (2018). Анализ современных технологий переработки шлаков доменного производства. *Экология и промышленность*, (3-4), 91-104.

*Публікації, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

9. Філоненко, О.В., & Петльований, М.В. (2021). Технологічні та екологічні особливості заповнення кар'єрних пустот металургійними шлаками. В *Матеріалах XII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасний рух науки»*, Том 2 (с. 420-422). Дніпро, Україна.

10. Filonenko, O. (2020). Substantiation of the parameters for the formation of a filling mass from metallurgical slags in open pit voids. In *Materials Physical & Chemical Geotechnologies: Materials of the International Scientific & Practical Conference* (p. 61-62). Dnipro, Ukraine.

11. Філоненко, О.В. (2020). Щодо підвищення рівня утилізації металургійних шлаків. В *Матеріалах XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 85-86). Бердянськ, Україна. <https://doi.org/10.33271/usme14.085>

12. Філоненко, О.В., & Петльований, М.В. (2019). Техногенна та екологічна небезпека підземного видобутку залізних руд Кривбасу. В *Матеріалах міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика»* (с. 66-68). Харків, Україна.

13. Filonenko, O., & Petlovanyi, M. (2018). Problematic aspects and ways to increase the level of metallurgical slags disposal. In *Materials of the International Scientific Conference «Scientific Development of New Eastern Europe»* (p. 55-60). Riga, Latvia. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-13-6-17>

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	14
Розділ 1. АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ ПРОБЛЕМ УТИЛІЗАЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ. ПОСТАНОВКА МЕТИ ТА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	20
1.1 Аналіз обсягів накопичення металургійних шлаків та їх впливу на навколишнє природне середовище .....	20
1.2 Аналіз рівня та відомих напрямів утилізації металургійних шлаків ....	32
1.3 Проблеми утилізації металургійних шлаків Приазовського регіону ....	41
1.4 Постановка мети та завдань дослідження .....	48
1.5 Висновки до розділу 1 .....	49
1.6 Список використаних джерел до розділу 1 .....	50
Розділ 2. РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ ЗАКЛАДНОГО МАСИВУ З МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ У КАР'ЄРНИХ ПУСТОТАХ .....	58
2.1 Вибір і характеристика кар'єру для заповнення пустот металургійними шлаками .....	58
2.2 Характеристика металургійних шлаків як закладного матеріалу техногенних пустот .....	65
2.3 Теоретичні особливості способу формування закладного масиву з металургійних шлаків у кар'єрних пустотах .....	71
2.4 Методика дослідження продуктів взаємодії металургійних шлаків з водним середовищем при їх безпосередньому контакті .....	73
2.5 Методика дослідження фізико-механічних властивостей та параметрів закладного масиву з металургійних шлаків .....	79
2.5.1 Дослідження проникності атмосферних опадів крізь донний шар закладного масиву .....	79
2.5.2 Дослідження фізико-механічних та деформаційних властивостей закладного масиву .....	87
2.6 Чисельне моделювання прогнозу деформацій закладного масиву кар'єрних пустот .....	91
2.7 Висновки до розділу 2 .....	94
2.8 Список використаних джерел до розділу 2 .....	95

Розділ 3. ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГОБЕЗПЕЧНИХ І СТІЙКИХ ЗАКЛАДНИХ МАСИВІВ У КАР'ЄРНИХ ПУСТОТАХ	100
3.1 Оцінка обсягів взаємодії кар'єрних вод та закладного матеріалу у кар'єрних пустотах .....	100
3.2 Закономірності зміни концентрації хімічних елементів та забруднюючих речовин при взаємодії закладного матеріалу з кар'єрними водами .....	104
3.3 Оцінка проникності атмосферних опадів при формуванні донного закладного шару зі сталеплавильних шлаків .....	124
3.4 Дослідження фізико-механічних та деформаційних властивостей закладного матеріалу з металургійних шлаків .....	130
3.5 Чисельне моделювання деформацій закладного масиву з металургійних шлаків .....	141
3.6 Висновки до розділу 3 .....	147
3.7 Список використаних джерел до розділу 3 .....	149
Розділ 4. ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ЗАКЛАДНОГО МАСИВУ З МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ ТА ЇЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ .....	152
4.1 Складання ланцюга технологічних процесів, що забезпечують закладання виробленого простору кар'єру металургійними шлаками .....	152
4.2 Рекомендації раціональних параметрів закладання виробленого простору кар'єру металургійними шлаками .....	156
4.3 Визначення економічної ефективності утилізації металургійних шлаків при формуванні закладного масиву кар'єрних пустот .....	161
4.4 Висновки до розділу 4 .....	170
4.5 Список використаних джерел до розділу 4 .....	171
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....	172
ДОДАТОК А. Результати хімічного аналізу взаємодії металургійних шлаків з кар'єрною водою .....	175
ДОДАТОК Б. Розроблення нормативного документу щодо закладних сумішей на основі металургійних шлаків .....	188
ДОДАТОК В. Розроблення рекомендацій щодо технології закладання виробленого простору кар'єру .....	189
ДОДАТОК Г. Розрахунок очікуваного економічного ефекту запропонованих рішень .....	190

## ВСТУП

**Актуальність.** Проблема утилізації побічних продуктів промисловості є надзвичайно актуальною для промислових країн, зокрема тих, що розвиваються, або з економіками перехідного типу. Передумовами виникнення подібних проблем є низький рівень міжгалузевої взаємодії, недостатнє фінансування стратегічних програм зі створення технологій та інфраструктури для переробки побічних продуктів промисловості й відсутність дієвих стимулюючих механізмів щодо їх утилізації на засадах рециркуляційної економіки. За таких несприятливих умов побічні продукти промислових підприємств вимушено накопичуються у місцях видалення відходів (МВВ). Близько 10% від загального обсягу щорічних накопичень незатребуваних побічних продуктів і відходів в Україні (350 млн т) припадає на переробну промисловість. Основний обсяг побічних продуктів чорної металургії (близько 80%) складають металургійні шлаки, з яких 2/3 – шлаки доменного виробництва та 1/3 – шлаки сталеплавильного виробництва, яких на металургійних комбінатах щорічно утворюється 11 млн т, а рівень їх утилізації занадто низький.

Досягти повномасштабної утилізації металургійних шлаків поточного виробництва, а також накопичених раніше у відвалах, у найближчій перспективі виглядає занадто амбіційним завданням. Потрібен пошук додаткових або альтернативних напрямів масштабної утилізації шлаків, які відповідають екологічним та економічним нормам. Перспективним й економічно виправданим напрямом утилізації металургійних шлаків може бути формування на їх основі закладного масиву у вироблених просторах кар'єрів при відкритій розробці родовищ, що дозволить відновити цінні площі земель за умови мінімізації деформацій поверхні, проте ці питання на сьогодні недостатньо вивчені.

Таким чином, актуальним є наукове обґрунтування безпечності застосування металургійних шлаків як закладних матеріалів для технічної рекультивациі відкритих гірничих виробок при безпосередньому контакті з водним середовищем.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконана на кафедрі гірничої інженерії та освіти Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» відповідно до «Загальнодержавної програми розвитку мінерально-сировинної бази України на період до 2030 року», затвердженої Верховною Радою України, та плану держбюджетних робіт Міністерства освіти і науки України, зокрема тема ГП-482 «Наукове обґрунтування методологічної, технологічної, екологічної і правової бази вилучення корисних компонентів з техногенних родовищ України» (№ 0116U004619), господарської НДР «Вирішення питань удосконалення переробки та утилізації доменних шлаків, які утворюються у процесі виробничої діяльності ПрАТ «Маріупольській металургійний комбінат імені Ілліча» (№ 2005/1010198), де автор був безпосереднім виконавцем.

**Метою дисертаційної роботи** є обґрунтування раціональних параметрів формування закладного масиву з металургійних шлаків на основі встановлених закономірностей взаємодії їх різного співвідношення з кар'єрними водами та покращення фізико-механічних властивостей ущільненням для ефективного відновлення денної поверхні.

Для досягнення поставленої мети сформульовані та вирішені основні завдання дослідження:

1. Аналіз накопичення, проблеми та існуючих напрямів утилізації шлаків чорної металургії провідних комбінатів України.
2. Розробка методики дослідження взаємодії металургійних шлаків з кар'єрними водами та вивчення фізико-механічних і деформаційних характеристик.
3. Встановлення закономірностей зміни концентрацій продуктів взаємодії металургійних шлаків з кар'єрними водами при їх різному співвідношенні.
4. Дослідження характеру зміни фізико-механічних властивостей та деформаційних характеристик закладного матеріалу при механічному ущільненні.
5. Обґрунтування параметрів формування закладного масиву у кар'єрних пустотах та оцінка економічної ефективності заходів.

*Ідея роботи* полягає в урахуванні динаміки зміни продуктів взаємодії шлаків з кар'єрними водами і закономірностей впливу механічного ущільнення для обґрунтування оптимальних властивостей закладного масиву.

*Об'єкт досліджень* – технологічні процеси утилізації металургійних шлаків у закладний масив кар'єрних пустот.

*Предмет досліджень* – раціональні параметри закладного масиву, що характеризуються безпечністю та мінімальними деформаційними характеристиками.

**Методи досліджень.** Для вирішення поставлених наукових завдань у роботі використано комплексний науково-методичний підхід, що включає аналіз інформаційних та літературних джерел з проблематики дослідження; фундаментальні основи механіки сипучого середовища; аналіз якості води методом атомно-емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою; фізичне моделювання закладного масиву із дотриманням критеріїв подібності; лабораторні дослідження фізико-механічних та деформаційних характеристик; чисельне моделювання методом скінченних елементів; оцінку економічної ефективності запропонованих рішень.

#### **Наукові положення, що виносяться на захист.**

1. При контакті кислих високомінералізованих природних кар'єрних вод із вмістом 33 – 67% сталеплавильних шлаків концентрації забруднюючих речовин змінюються за поліноміальними залежностями від часу їх взаємодії, зменшуючись на 30-ту добу, що усуває небезпеку для водоносного горизонту. При контакті кар'єрних вод з доменними відвальними шлаками спостерігається зростання концентрацій сульфідів та азоту амонійного. Це дозволяє обрати й рекомендувати безпечніший тип металургійного шлаку для донного закладного шару та його потужність.

2. При компонентному складі основної наповнювальної закладної суміші кар'єрних пустот з доменних відвальних та сталеплавильних шлаків у співвідношенні 70:30 і впливі механічного ущільнення навантаженням 0,12 МПа величина деформацій поверхні сформованого закладного масиву знижується на

28% у порівняння зі звичайним відсипанням, а лінійна залежність осідань від подальшого навантаження об'єктів поверхні дозволяє проєктувати різноспрямоване використання відновленої земельної площі.

*Наукова новизна отриманих результатів*

– науково доведена безпечність контакту закладних матеріалів на основі сталеплавильних шлаків з кар'єрною водою, що підтверджується встановленими поліноміальними закономірностями зміни концентрацій і забруднюючих речовин від співвідношення та часу взаємодії;

– встановлено поліноміальні залежності зміни величини усадки закладних матеріалів та їх суміші від прикладеного навантаження та визначено раціональне співвідношення компонентів, при якому покращуються фізико-механічні властивості (щільність, пористість, усадка);

– виявлено кількісну перевагу величини деформацій поверхні ущільненого закладного масиву над «звичайним відсипанням» закладного матеріалу при дії гравітаційних сил, що складає 28%, а осідання масиву від впливу поверхневих об'єктів лінійно залежить від величини їх навантаження.

**Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій** підтверджується коректною постановкою й вирішенням наукових завдань із використанням положень і законів механіки гірських порід та сипучого середовища; використанням апробованих стандартних та нормативних методик визначення фізико-механічних властивостей матеріалів; дотриманням критеріїв подібності при фізичному моделюванні; проведенням чисельних експериментів на науково-обґрунтованих геомеханічних моделях; достатньою збіжністю результатів лабораторних досліджень з чисельним моделюванням (рівень розбіжності 15 – 18%) та порівнянням з науковими роботами багатьох авторів у досліджуваній галузі.

**Наукове значення роботи** полягає у встановленні закономірностей зміни продуктів взаємодії закладних матеріалів з кар'єрною водою і характеру зміни їх фізико-механічних характеристик під впливом механічного ущільнення, що



забезпечує безпечність та мінімізацію деформацій при формуванні закладного масиву у виробленому просторі кар'єрів.

**Практичне значення отриманих результатів:**

– розроблені рекомендації раціональних параметрів формування закладного масиву на основі металургійних шлаків у виробленому просторі гранітного кар'єру;

– запропоновано геомеханічну модель виробленого простору кар'єру, що містить закладний масив, ефективність якої підтверджена обчислювальними експериментами;

– запропоновано склад основної наповнювальної закладної суміші кар'єрних пустот, що складається зі сталеплавильних і доменних шлаків.

**Реалізація результатів роботи.** На основі результатів дисертаційних досліджень розроблено нормативний документ ТУ У 08.1-00191158-002:2020 «Суміші закладні із металургійних шлаків ПрАТ «МК «Азовсталь» та ПрАТ «ММК ім. Ілліча» для технічної рекультивації техногенно порушених земель»; розроблено рекомендації з технології закладання та рекультивації виробленого простору кар'єру №2 ДПП «Каранський кар'єр» металургійними шлаками ПрАТ «ММК ім. Ілліча» (затверджені 21.11.2021 р.). Економічний ефект досягається при варіанті формування закладного масиву з металургійних шлаків, який вигідніше на 7,27 грн/т (або на 8,2%), ніж варіант із розміщенням шлакових матеріалів у новому місці видалення відходів.

**Особистий внесок здобувача** полягає у формулюванні, узагальненні та вирішенні наукових завдань дисертаційної роботи. Автором самостійно сформульовані мета й завдання дослідження, ідея роботи, її основні наукові положення, висновки та рекомендації, розроблена програма експериментальних і лабораторних експериментів, проведено фізичне моделювання й проаналізовані та встановлені нові наукові результати. Автор брав безпосередню участь в організації й проведенні експериментальних і лабораторних досліджень, здійснив чисельне моделювання.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися, обговорювалися та отримали позитивну оцінку на наступних конференціях: International Scientific Conference «Scientific Development of New Eastern Europe» (Riga, Latvia, 2019); міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика» (Харків, Україна, 2019); міжнародній науково-практичній конференції «Українська школа гірничої інженерії» (Бердянськ, Україна, 2020); міжнародній науково-практичній конференції «Сучасний рух науки», (Дніпро, Україна, 2021), а також на науково-технічних нарадах компанії «Метінвест холдинг» (м. Маріуполь).

**Публікації.** Основні результати дисертаційних досліджень опубліковані у 13 наукових працях, з яких 4 – у наукових фахових виданнях, що входять до переліку МОН України, 1 – у виданнях, що індексуються в наукометричних базах даних Scopus і Web of Science, 1 – у виданні іноземної держави, яка входить до складу ОЕС; 2 – у виданнях, в яких додатково відображено зміст дисертації, 5 – у матеріалах міжнародних закордонних і всеукраїнських конференціях, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

Особистий внесок здобувача в роботах, опублікованих у співавторстві: [1] – проведення експериментальних досліджень взаємодії шлаків з кар'єрною водою, фізико-механічних властивостей закладних матеріалів на виробництві та в лабораторних умовах; обґрунтування раціональних параметрів закладного масиву кар'єрних пустот; [2] – обґрунтування актуальності досліджень, розробка методики визначення фізико-механічних властивостей закладних матеріалів та масиву, розробка методики досліджень чисельного моделювання; [3] – постановка завдання, аналіз та узагальнення проблеми накопичення й утилізації шлакових матеріалів металургійних комбінатів; [4] – обробка та узагальнення результатів дослідження параметрів шарів закладного масиву; [10] – обґрунтування екологічних переваг формування закладного масиву в кар'єрних пустотах; [12] – узагальнення негативних чинників впливу відходів гірничо-металургійного комплексу на довкілля; [13] – обґрунтування напряму утилізації металургійних шлаків як варіанту закладання виробленого простору кар'єрів.

**Структура і обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, висновків; містить 66 рисунків та 38 таблиць, 4 додатки на 16 сторінках. Основний текст дисертації становить 174 сторінки, загальний обсяг дисертації – 190 сторінок.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ТА УЗАГАЛЬНЕННЯ ПРОБЛЕМ УТИЛІЗАЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ. ПОСТАНОВКА МЕТИ ТА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 1.1. Аналіз обсягів накопичення металургійних шлаків та їх впливу на навколишнє природне середовище

Для забезпечення потреб людства в різноманітних ресурсах застосовуються технології переробки сировинних ресурсів у кінцеві товарні продукти і характеризуються значним обсягом відходоутворення, що забруднює природне навколишнє середовище, формуючи небезпечну техногенну та екологічну ситуацію. Так, наприклад, в країнах-членах Європейського Союзу (27 країн) щорічно утворюється 1,3 млрд т твердих відходів або 3,5 т на 1 мешканця [1], а в Україні, при населенні в 40 млн чоловік, щорічно утворюється 0,45 млрд т твердих відходів або 11,25 т на 1 людину.

Як свідчать статистичні дані, виробництво українського валового внутрішнього продукту (ВВП) характеризується значною енергоємністю, яка більш ніж у 9 разів перевищує середньоєвропейський показник. Щороку імпортується практично 100% палива для атомних станцій, 90% нафти, 80% природного газу та близько 15% вугілля. У структурі ВВП зросла частка сировинно- та енергоємних (найбільш забруднюючих довкілля) галузей промисловості – гірничо-металургійної, паливно-енергетичної, а також хімічної і нафтохімічної. Сформувалася яскраво виражена сировинна спрямованість експорту продукції (60%, з яких 40% – чорна металургія). Значних масштабів набуло фізичне та моральне старіння основних промислово-виробничих фондів (60 – 70%), їх низькотехнологічне оснащення, що значно підвищує рівень відходоутворення [2 – 4].

Вагоме значення в рівні накопичення відходів відіграє застосування високотехнологічного обладнання з переробки та державні програми регулювання поводження з відходами через їх визнання товарним продуктом,

особливо малонебезпечних для довкілля та корисних для різних галузей економіки. Ці державні програми здатні стимулювати розвиток внутрішнього ринку використання відходів в економіці й підвищення рівня масштабності їх утилізації. Так, вторинній переробці відходів у країнах Європейського Союзу підлягає в середньому до 50%, а в Україні – до 5%, а рівень загальної утилізації складає в ЄС – 70 – 95%, в Україні всього – 25 – 30%.

Багаторічне функціонування підприємств різних галузей економіки України призвело до накопичення понад 30 млрд т промислових відходів, а займані ними площі за різними оцінками сягають 160 – 180 тис. га [5]. Динаміка накопичення та поводження з техногенними відходами 2010 – 2018 років наведена на Рисунку 1.1, щорічне накопичення промислових відходів склало на рівні 0,35 – 0,45 млрд т. [6, 7].

Аналіз Рисунка 1.1 показує, що з 2014 року спостерігається суттєве зменшення накопичення відходів на рівні 0,3 – 0,35 млрд т, що пов'язано з неможливістю проведення Міністерством екології точного обліку їх накопичення на невідконтрольованих територіях.

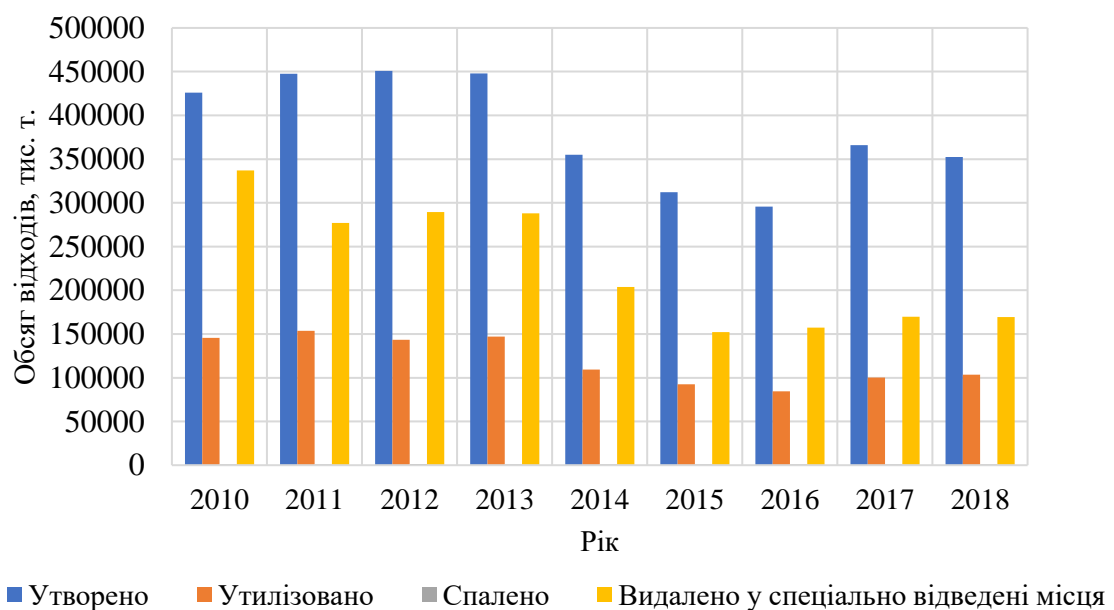


Рисунок 1.1 – Динаміка утворення та поводження з відходами в Україні протягом 2010 – 2018 років

За видом поводження з відходами лідирує їх видалення у спеціально відведені місця або місця видалення відходів (МВВ) в обсязі понад 50% від загально утворених. Рівень утилізації відходів знаходиться на рівні 25 – 30%, а найбільше утилізації підлягають пусті гірські породи (64%) при рекультивації (засипці) зон обвалення внаслідок деформації денної поверхні, порушеної гірничими роботами з видобутку корисних копалин.

За видом економічної діяльності, згідно даних Таблиці 1.1, основною галуззю-накопичувачем відходів в Україні є гірничодобувна промисловість, на яку приходить понад 85% від загально утворених відходів.

Таблиця 1.1 – Розподіл промислових відходів  
за видом економічної діяльності [6]

Вид діяльності	2015	2016	2017	2018
Сільське, лісове та рибне господарства	8736,8	8715,5	6188,2	5968,1
Добувна промисловість і розроблення кар'єрів	257861,9	237461,4	313738,2	301448,9
Переробна промисловість	31000,5	34093,0	32176,7	31523,2
Постачання електроенергії, газу, пари та кондиційованого повітря	6597,5	7511,5	6191,7	6322,7
Водопостачання, каналізація, поводження з відходами	594,2	457,4	408,7	397,4
Будівництво	376,2	300,2	493,8	378,8
Інші види економічної діяльності	1047,2	984,6	998,7	751,3
Разом	306214,3	289523,6	360196,0	346790,4

У добувній промисловості домінуюча роль з накопичення багатотоннажних промислових відходів належить видобутку металевих руд, перш за все залізних, що пов'язано зі складуванням на поверхні розкривних та кар'єрних порід, хвостів і шламів збагачення у відвали й сховища. Це обумовлено високим рівнем видобутку – 130 млн т/рік й найвищою щільністю

руд та вміщуючих порід ( $2,5 - 4,0 \text{ т/м}^3$ ). Аналізуючи теперішній рівень видобутку металевих руд та впровадження інноваційних технологій з промислового освоєння цінних компонентів і ресурсів з накопичень техногенних відходів гірничодобувної галузі, можна констатувати та прогнозувати, що у найближчі роки обсяги їх утворення будуть й надалі збільшуватись з відведенням нових цінних сільськогосподарських земельних площ.

Згідно з Таблицею 1.1, близько 10% всіх щорічних накопичень промислових відходів складаються відходи переробної промисловості. Як відмічається у статистичних даних за 2018 рік, у відходах переробної промисловості домінуюче значення з показником 70% займають відходи металургійного виробництва, 18% – відходи виробництва харчових продуктів, 4% – відходи виробництва хімічних речовин і хімічної продукції.

За даними Національної доповіді про стан навколишнього середовища в Україні [8], найгірший екологічний стан довкілля спостерігається в Донецькій, Дніпропетровській, Запорізькій та Луганській областях, де металургійна, гірничодобувна і хімічна галузі є пріоритетними. Якщо розглядати накопичення відходів всіх класів небезпеки (I – IV) за регіонами України, то без сумніву лідером є Дніпропетровська область, де щорічно накопичується понад 80% всіх відходів країни (Рис. 1.2).

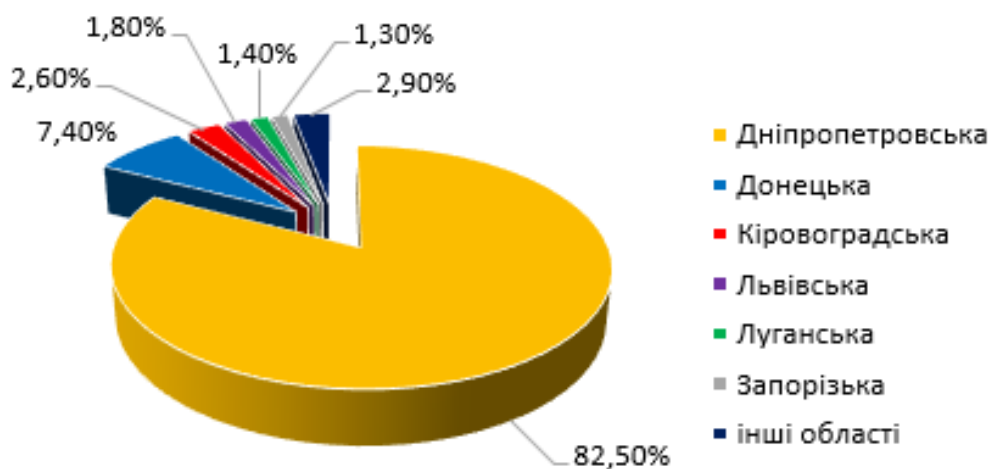


Рисунок 1.2 – Розподіл відходів за промисловими областями України

Концентрація значних обсягів накопичення відходів викликана розташуванням у Дніпропетровській області основних промислових виробництв гірничо-металургійного комплексу України – залізорудних кар'єрів, рудних шахт, гірничо-збагачувальних комбінатів, металургійних заводів.

Гірничо-металургійний комплекс (ГМК) є провідною галуззю економіки України, а його сталий розвиток формує основні валютні надходження у державний бюджет країни, які сягають 3 млрд доларів [9 – 10]. Окрім вагомо внеску підприємств ГМК у валютні надходження до бюджету країни неодолимо його функціонування є те, що у процесі створення основної продукції (виплавка чавуну, сталі) утворюються багатотоннажні відходи у вигляді металургійних шлаків, які недостатньо використовуються в якості сировинного ресурсу та під які відводяться цінні земельні площі [11 – 14]. На території, підконтрольній Україні, основні потужності металургійного виробництва зосереджені в наступних підприємствах: ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча» (ПрАТ «ММК ім. Ілліча»); ПрАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь» (ПрАТ «МК «Азовсталь»); ПАТ «Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь» (ПАТ «Запоріжсталь»); ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»; ПрАТ «Дніпровський металургійний завод» (ПрАТ «ДМЗ»); ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (ПАТ «ДМК»); АТ «Запорізький завод феросплавів» (АТ «ЗЗФ»); ПрАТ «Електрометалургійний завод «Дніпроспецсталь» (ПрАТ «Дніпроспецсталь»); ПАТ «Інтерпайп нижньодніпровський трубопрокатний завод» (ПАТ «Інтерпайп НТЗ»); АТ «Нікопольський завод феросплавів» (АТ «НЗФ») та багато інших.

В Україні у відвалах накопичено понад 100 млн т сталеплавильних шлаків зі вмістом заліза більше 20%, а доменних, із вмістом заліза в межах 5 – 7%, – близько 300 млн т [15]. У металургійній промисловості щорічний вихід шлаків залежно від потужності виробництв становить: доменних – близько 45 млн т, мартенівських – 20 млн т, кольорової металургії – 10 млн т, інших металургійних виробництв – 5 млн т, не рахуючи величезної кількості шлаків, накопичених у відвалах металургійних підприємств. Тільки доменних шлаків щорічно зливається



у відвали у вигляді розплавів близько 15 млн т, решта їх гранулюється [16]. Таким чином, завдання утилізації шлаків у зв'язку зі зростанням екологічних та економічних проблем є досить актуальною.

Відходи металургійного виробництва, так само як і хвостосховища, займають чисельні площі під складування. Найбільшим відвалом металургійних шлаків в Україні є балка «Середня», що розташована в 3 км від міста Запоріжжя. В цю балку складують свої відходи три потужних підприємства – ПАТ «Запоріжсталь», ПрАТ «Дніпроспецсталь» та АТ «ЗЗФ» (Рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Найбільший в Україні відвал металургійних шлаків (240 га), балка «Середня» (м. Запоріжжя)

Основним регіоном-накопичувачем відвалів металургійних шлаків є Дніпропетровська, Донецька та Запорізька області [17 – 19]. Аналіз наявних металургійних підприємств дозволив за найбільш щільним розташуванням згрупувати відвали металургійних шлаків цих підприємств та виділити їх у 6 районів. За результатом аналізу місць розташування техногенних утворень металургійних шлаків складена узагальнена схема районів (Рис. 1.4).

I. Приазовський район – 2 шт. (шлакові відвали ПрАТ «МК «Азовсталь» та ПрАТ «ММК ім. Ілліча»).

II. Краматорський район – 2 шт. (шлакові відвали ТОВ «Краматорський феросплавний завод» (ТОВ «КФЗ») та ПАТ «Енергомашпецсталь» (ПАТ «ЕМСС»)).



Рисунок 1.4 – Схема районів накопичень металургійних шлаків України:

I – Приазовський район; II – Краматорський район; III – Запорізький район;  
IV – Криворізький район; V – Придніпровський район; VI – Побузький район

III. Запорізький район – 3 шт. (шлакові відвали балки «Середня» ПАТ «Запоріжсталь», ПрАТ «Дніпроспецсталь», АТ «ЗЗФ»; шлаковий відвал балки «Чорна гора» ПАТ «Запоріжсталь»; шлаковий відвал ТОВ «Запорізький титаномагнієвий комбінат» (ТОВ «ЗТМК»)).

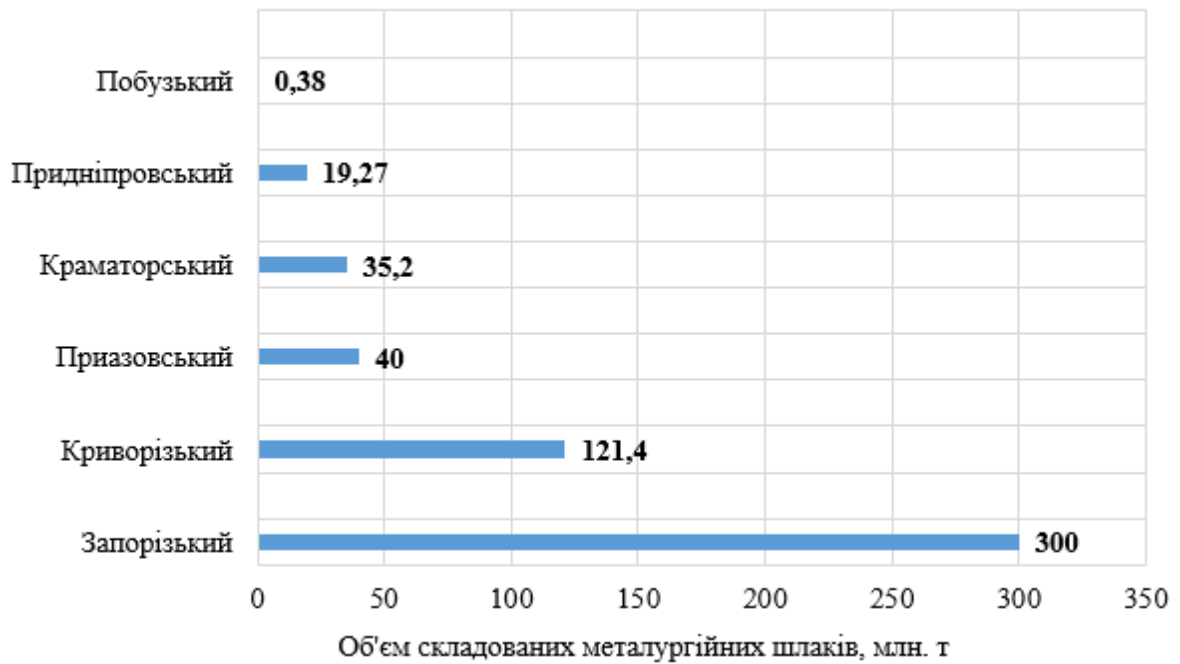
IV. Криворізький район – 5 шт. (шлаковий відвал АТ «НЗФ» та 4 шлакові відвали ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»).

V. Придніпровський район – 4 шт. (шлакові відвали ПрАТ «ДМЗ», ПАТ «ДМК», ПАТ «Інтерпайп НТЗ» та АТ «Кременчуцький сталеливарний завод» (АТ «КСЗ»)).

VI. Побузький район – 1 шт. (шлаковий відвал ТОВ «Побузький феронікелевий комбінат» (ТОВ «ПФК»)).

В результаті аналітичної обробки даних проведено градацію районів за обсягами накопичення та зайнятими площами, що представлено на Рисунку 1.5. Аналіз складених гістограм дозволяє встановити, що за обсягом запасів металургійних шлаків лідером, без сумніву, є Запорізький район (300 млн т).

(a)



(б)

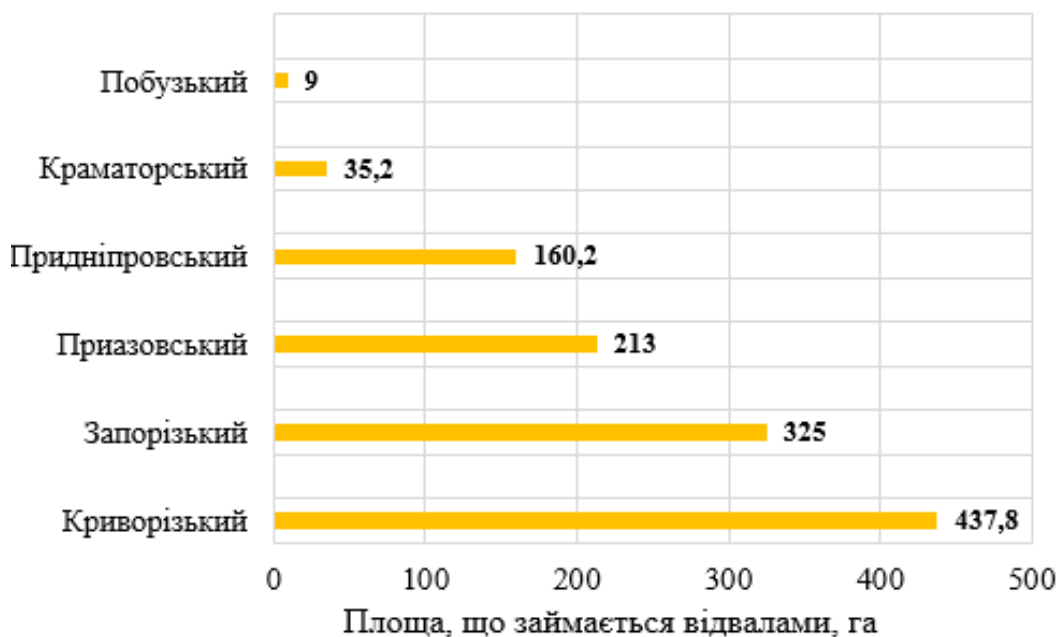


Рисунок 1.5 – Градація районів техногенних накопичень металургійних шлаків (а) за їх за об'ємом; (б) за площею, що займається

Найбільш займані ділянки під відвалами шлаків у Криворізькому районі – понад 1500 га землі, тому будь-яке скорочення накопичень металургійних шлаків на території України є актуальним питанням для довікля та суспільства в цілому.

Проте, якщо звернути увагу на географічне розташування цих регіонів-накопичувачів шлаків та, відповідно, порівняти з розвитком транспортної інфраструктури, виділяється досить крупний регіон, де питання масштабності утилізації шлаків у теперішніх умовах – досить проблемні.

Масштабність рівня й різноманіття напрямів утилізації металургійних шлаків буде також залежати від ступеню їх небезпечного впливу на основні природні компоненти (грунти, воду, повітря) та відповідності встановленим санітарним нормам для населення. Отже, залежно від обраного напрямку утилізації металургійних шлаків необхідно провести ряд хімічних та радіаційних досліджень складу їх фільтратів і на підставі отриманих результатів та порівняння допустимих норм за виділенням речовин обґрунтувати безпечність їх складування або використання.

Найбільш важливим аспектом є визначення впливу шлакових накопичень на ґрунти, адже здебільшого у спеціально відведених МВВ відвали металургійних шлаків розташовуються саме на земельних ділянках, зазвичай на відстані від поверхневих вод.

Клас небезпеки відходів, у тому числі й металургійних шлаків, тривалий час визначався виробником відходів або за його дорученням за загальноприйнятою методикою згідно документу [20]. Визначення класу небезпеки промислових відходів найчастіше здійснювалось аналітичним розрахунковим методом, коли встановлений фізико-хімічний склад відходів порівнюють до LD або ГДК (гранично-допустима концентрація) екзогенних хімічних речовин у ґрунті. Далі визначається сумарний індекс токсичності й встановлюється клас небезпеки та ступінь токсичності відходу. Проте наразі цей нормативний документ скасовано (з 2014 року), а новий документ «Державні санітарні правила встановлення класу небезпеки відходів» законодавчо ще не прийнято, тому розрахунок класу небезпеки здійснюється за старою методикою.

Деякі вчені у сфері екологічної безпеки піддають значній критиці підхід, що використовувався у нормативному документі протягом тривалого часу, адже для визначення небезпечних властивостей відходів недостатньо використання

лише п'яти показників, які, крім того, враховують вплив компонентів відходів лише на організм людини, не беручи до уваги їх небезпеку для інших живих організмів і навколишнього природного середовища [21].

Окрім аналітичних розрахунків для більш високої достовірності впливу шлаків слід виконувати комплекс експериментальних досліджень із обов'язковим врахуванням часу впливу наступних чинників:

- впливу фільтратів шлакових відвалів на ґрунти, причому важливим параметром буде час;

- впливу шлаків на якість води при безпосередньому їх контакті.

Відомо багато досліджень впливу металургійних шлаків, а саме доменних та сталеплавильних, на стан природного навколишнього середовища, які показують як негативні, так і позитивні результати з позиції їх екологічної небезпеки. Це, вірогідно, пов'язано із широким різноманіттям властивостей накопичуваних металургійних шлаків у відвалах, які залежать від властивостей вихідних матеріалів, режиму доменного процесу, а також від умов його охолодження після зливу. Тому відвальний доменний шлак у відвалах різних заводів, та навіть у відвалі одного комбінату, відрізняється за зовнішнім виглядом, складом, будовою, фізичним і механічним властивостями. З часом під дією вологи та вуглекислоти відбуваються більш-менш тривалі фізичні й хімічні процеси вапняного і залізного розпаду [22].

В роботі [23] приведено дослідження вмісту радіоактивних речовин у відходах Таразського металургійного заводу. Було встановлено, що для доменних шлаків 75% величини показника еколого-економічної оцінки забрудненості приходить на природні радіонукліди і 25% – на важкі метали, незважаючи на їх високий вміст.

Було проведено дослідження міграції ванадію зі шлаків виробництва ферованадію в модельні середовища [24]. Для моделювання міграції ванадію були використані два середовища: нейтральне – дистильована вода, і кисле – ацетатно-амонійний буфер з  $pH = 4,8$ , що характерно для кислотних опадів. Результати показали, що ванадій мігрує зі шлаку і його кількість перевищує ГДК

навіть через 10 діб. У ході проведення експерименту було встановлено, що рухлива форма ванадію у водному середовищі через добу переходить в малорозчинне з'єднання ванадат, яке осідає у вигляді суспензії.

В роботі [25] досліджувався рівень приземних концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі біля шлакового відвалу ПрАТ «ММК ім. Ілліча». Комп'ютерним моделюванням з урахуванням середніх метеорологічних умов регіону встановлено, що приземні концентрації за межами шлакового відвалу перевищують санітарні норми. Так, на відстані 500 м від центру відвалу значення максимальної приземної концентрації за зваженими частками становило у східному, північному та західному напрямках 6,04 ГДК, у південному – 3,79 ГДК, а на відстані 1000 м значення приземної концентрації також більше 1,0 ГДК. Авторами визначено, що внаслідок утилізації доменних шлаків на рівні 25 т/год відбувається скорочення викиду пилу в атмосферне повітря на 30,75 т.

Аналогічна ситуація із пиловим забрудненням повітря спостерігається на шлакових відвалах Кривбасу [26]. Проведені дослідження показали, що запиленість атмосфери на шлакових відвалах при швидкості вітру 3 – 5 м/с становить 8 – 20 мг/м<sup>3</sup>, що в 4 – 10 разів перевищує ГДК для повітря робочих зон, при цьому середньодобова концентрація пилу, яка складає 0,15 мг/м<sup>3</sup>, досягається на відстані, більшій 1000 м від відвалу, при розмірі санітарно-захисної зони 500 м, а в ряді випадків на відстані близько 1500 м від шлакових відвалів – 2 – 4 мг/м<sup>3</sup>. Наведені результати довели, що шлакові відвали є джерелом інтенсивного забруднення пилом повітря робочих зон підприємства та атмосфери.

Геолого-екологічні дослідження стану ґрунтів проводилися у м. Донецьк біля ПрАТ «Донецьксталь – металургійний завод» (ПрАТ «Донецьксталь – МЗ» [27]. У ґрунтах досліджуваної території визначались концентрації наступних елементів: кадмію, міді, нікелю, ртуті, свинцю, цинку, марганцю, заліза. Встановлено, що у південній частині території, в місці розміщення відвалів з відходів металургійного заводу, спостерігаються підвищені показники свинцю. Середній вміст кадмію перевищує фоновий вміст в 2,2 рази і має рівномірний розподіл у

грунтах території дослідження. Геохімічні аномалії зосереджені в зоні впливу відвалів металургійного підприємства на півдні, у центрі, на території електросталеплавильного цеху, а також у західній частині, яка контролюється діяльністю мартенівського, доменного й обжимного цехів заводу.

Також відмічається деякими авторами [28], що 1 га відвалів металургійного підприємства призводить до забруднення приблизно 5 га земель, що знаходяться поряд з відвалами, при цьому має місце також значне теплове забруднення довкілля. З точки зору забруднення земель, зона впливу металургійного підприємства на навколишнє середовище може мати радіус 1 – 5 км, при цьому у ґрунті спостерігається значний вміст шкідливих речовин.

В роботі [29] наведені комплексні дослідження впливу на навколишнє середовище відвалу доменних шлаків і відвалу сталеплавильних шлаків ВАТ «Євраз Нижньотагільський металургійний комбінат» (ВАТ «Євраз НТМК»). Вміст рухомих форм металів у пробах ґрунтів у зоні впливу шлакових відвалів по гумусовому горизонту перевищує значення ГДК за марганцем у 1,7 – 6,5 разів, за цинком – у 1,4 рази, однак рухомі форми міді та хрому в ґрунтах не перевищують значень ГДК. У той же час, вмісту рухомих форм металів низький, за винятком марганцю. Максимальні концентрації важких металів пов'язані, за думкою авторів, як із викидами ВАТ «Євраз НТМК» та виділенням пилу з поверхні шлакового відвалу, так і із застосуванням матеріалу шлакового відвалу для відсіпання ґрунтової дороги.

Для визначення оцінки екологічної небезпеки шлакового щебню в Пермському національному дослідницькому політехнічному університеті були проведені дослідження емісій важких металів, що містяться в шлаку (ванадій, титан, марганець і залізо) [30]. Розрахунками встановлено, що через 30 діб частка екстрагованих металів зі шлакового щебню склала для заліза – 9,6%, для марганцю – 4,9%, для титану – 2,5%, для ванадію – 0,27% відповідно, що свідчить про досить високу стійкість досліджуваних металів у структурі шлаку. Проведені дослідження продемонстрували, що в умовах Пермського краю, де переважають глинисті ґрунти, рН водної витяжки яких близький до нейтральної,

можна чекати незначного впливу шлакового щебню на водні об'єкти і рекомендувати його для використання в якості матеріалу в дорожньому будівництві. Однак, застосовувати шлаковий щебінь в агресивних середовищах слід з обережністю, передбачаючи заходи з охорони навколишнього середовища.

Як зазначається, розташування шлакових відвалів поблизу акваторій морів небезпечно тим, що мікроорганізми утворюють у шлакових відвалах сірководень, загальна кількість якого може перевищувати 20 м<sup>3</sup> на тонну шлаку. В основному утворюються сульфіди надзвичайно високої концентрації, які вимиваються дренажними водами, а це в свою чергу призводить до найсильнішого забруднення. Кисень у воді витрачається на реакцію з сульфідами, вміст кисню в даних сульфідних водоймах стає рівним нулю і це призводить до гибелі живих організмів [31].

Проведений аналіз свідчить про те, що визначення характеру та ступеню впливу металургійних шлаків на довкілля слід виконувати для конкретних видів шлаків, адже вони різняться хімічним і мінералогічним складом та особливостями процесу металургійного виробництва. Для розробки ефективного способу утилізації шлаків слід виявити рівень забруднення ними довкілля шляхом проведення серії експериментальних досліджень впливу їх фільтратів на ґрунти та якість води. Таким чином, накопичені в Україні значні обсяги шлаків чорної металургії з малонебезпечним рівнем впливу в разі їх зручного до споживачів географічного розташування здатні забезпечити будівельну промисловість та дорожнє будівництво дешевою сировиною, а в разі суттєвої віддаленості та ізольованості інфраструктури міст – потрібен пошук нових рішень з розробки екологічнобезпечних способів їх широкомасштабної утилізації.

## **1.2. Аналіз рівня та відомих напрямів утилізації металургійних шлаків**

На сьогодні рівень утилізації металургійних шлаків порівняно з провідними країнами Європейського Союзу залишається низьким. Так, рівень утилізації відходів і використання вторинних матеріальних ресурсів серед



підприємств ГМК становить в середньому 40% від їх утворення, інша частина знаходиться у відвалах та полігонах, створюючи напружену екологічну ситуацію. У той же час Євросоюз, США і Японія використовують вторинні ресурси на рівні 60 – 80%, отримуючи 20% всього алюмінію, 30% – заліза, до 50% – свинцю і цинку, 40% – міді та інших корисних компонентів, що є значно дешевшим, ніж промислова розробка природних родовищ [32].

За даними експертів, на сьогоднішній день українськими підприємствами чорної металургії накопичено у відвалах більше 300 млн т металургійних шлаків, а щорічний приріст їх накопичення може становити до 10 млн т при нормальному завантаженні виробничих потужностей підприємств. Як свідчать фактичні дані за 2018 рік, рівень утилізації металургійних шлаків в Україні склав 45% проти 93% у Європейському Союзі, а найбільші внески в це здійснює цементна галузь та будівництво доріг – 2,1 млн т та 1,0 млн т відповідно, при цьому загальні накопичення металургійних шлаків склали 11,0 млн т (Рис. 1.6) [33, 34].

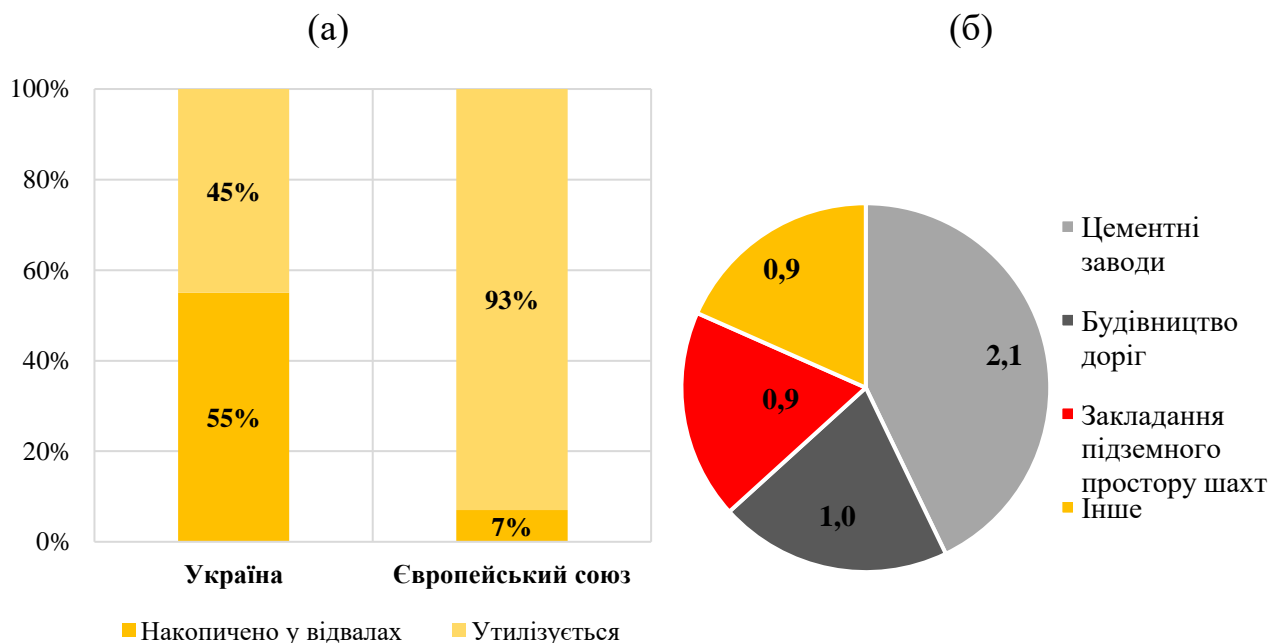


Рисунок 1.6 – Характеристика обсягів накопичення металургійних шлаків у 2018 році: (а) баланс накопичень та утилізації металургійних шлаків в Україні та Європейському Союзі; (б) фактична структура утилізації шлаків в Україні

Поточний рівень утилізації металургійних шлаків в Україні істотно нижче, ніж загальносвітовий. Це свідчить про те, що, по-перше, даний техногенний ресурс недооцінений українською економікою, по-друге, екологічна політика в сфері поводження з відходами вимагає реформування, тому що підприємства змушені накопичувати шлаки в відвалах, і, по-третє, міжгалузеву взаємодію в питаннях утилізації промислових відходів часто обмежується комерційною раціональністю, що знижує пріоритетність ресурсозбереження та екології. На деяких підприємствах чорної металургії України практикується переробка сталеплавильних шлаків, з яких витягується залізовмісний скрап і флюсові матеріали, які повертаються у виробничий цикл [35].

Утилізація сталеплавильних шлаків в інших сферах господарської діяльності невелика. Таким чином, понад 70% обсягу сталеплавильних шлаків розміщується у відвалах або на тимчасових складах шлакової продукції підприємств.

Доменні шлаки практично не повертаються в металургійний цикл через низький (до 1%) вміст заліза. Як правило, вони гранулюються на централізованих установках мокрої грануляції, а ковшеві залишки, після випарного охолодження, вивозяться до МВВ. Традиційно доменний гранульований шлак в Україні користується попитом у цементній промисловості і серед підприємств будівельної індустрії, але з певних причин не реалізується в повному обсязі. Крім того, існуючі в українській металургії технології грануляції доменного шлаку поки далекі від передової практики, що не дозволяє забезпечити високу якість граншлаку за показником оскльовання (середній показник в Україні – 50%, у світі – понад 90%). На продукцію з відвального доменного шлаку попит часто обмежений потребами регіонального ринку дорожнього будівництва. Тому не завжди економічно доцільно організувати виробництво фракціонованого шлакового щебню з відвального доменного шлаку без гарантії його збуту або цільової програми використання, тому що виробництво призведе не лише до економічних збитків, а й до переповнення складів шлакової продукції, для яких потрібні нові площі.

З огляду на очевидне відставання за показником стійкості виробничо-господарської діяльності від світової практики в питаннях утилізації

металургійних шлаків, необхідно, перш за все, внести зміни в політику поводження з відходами та розробити цільові програми утилізації деяких видів промислових відходів, які становлять ресурсну цінність для економіки.

Багато країн, зіткнувшись з екологічними наслідками і масштабами накопичення відходів, впровадили політику сприяння та розробили галузеві програми в галузі охорони надр, ресурсозбереження й екології. Це дозволило за відносно невеликий період зупинити зростання накопичення відходів, розвантажити відвали і дало позитивний економічний ефект від утилізації промислових відходів. Сталий розвиток України неможливий без постановки екологічних цілей, найважливішим аспектом якого є культура поводження з відходами. Результатом стійкої господарської діяльності має бути забезпечення повного розвантаження відвалів металургійних шлаків і утилізація поточних обсягів їх утворення.

Таким чином, «завдання мінімум» подальшого стійкого розвитку металургії полягає у забезпеченні утилізації шлаків в обсязі їх утворення. Виконання «завдання мінімум» дозволить зупинити зростання накопичень металургійних шлаків у відвалах. І, відповідно, «завдання максимум» полягає у забезпеченні повної утилізації шлаків поточного виходу шлаків з поступовою утилізацією відвальних накопичень. Виконання «завдання максимум» дозволить не лише забезпечити переробку шлаків поточного виходу, але і ліквідувати шлакові відвали в доступному для огляду майбутньому. Налаштування базових галузей економіки на курс сталого розвитку вимагає розширення міжгалузевої взаємодії, яке, в свою чергу, повинно спричинити за собою зміни діючої екологічної політики.

Пріоритетним напрямом при складанні стратегічних програм утилізації металургійних шлаків повинна бути її масштабність. Поки що це характерно для цементної галузі, де утилізується найбільша частка шлаків – 40%. Тобто, щоб стрімко та динамічно збільшити рівень споживання й утилізації металургійних шлаків потрібно створювати технологічні та економічні умови для розвитку інших векторів утилізації шлаків.

Шлаки складають основну частину відходів металургійного виробництва, які є багатокомпонентними системами, що складаються з продуктів високо-температурної взаємодії руди, пустої породи, флюсів, палива та штучних мінералів, містять оксиди ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  і (рідше)  $\text{ZnO}$ ) змінного складу, є нестійкими у фізико-хімічних умовах земної поверхні [36 – 38].

*Цементна галузь.* Схожість хімічного та мінералогічного складу доменних гранульованих шлаків із портландцементом, який при подрібненні здатен проявляти гідравлічну активність, обумовила кілька основних напрямків застосування доменних шлаків у будівельній галузі. У зв'язку з цим виявилось кілька основних напрямків застосування доменних шлаків у сфері виробництва в'язучих речовин [39 – 41], зокрема: як сировини для виробництва портланд-цементу; як добавки до клінкеру при виробництві шлакопортланд-цементу (ШПЦ); при виробництві шлакових в'язучих з добавкою активаторів; при виготовленні в'язучих речовин автоклавного твердіння; при отриманні шлаколузних в'язучих.

Гранульовані доменні шлаки використовують наступним чином: як матеріал для виготовлення змішаних гідравлічних в'язучих речовин (ШПЦ, сульфатно-шлакового і вапняно-шлакових цементів); як компонент для виробництва портландцементу, а також як активну мінеральну домішку до портландцементу при його помелі; у вигляді наповнювачів при виготовленні бетонів [42].

Доменні шлаки широко залучені у виробництво гіпсошлакових блоків для одноповерхового будівництва, використовуються при виготовленні швидкотвердіючого ШПЦ, що володіє підвищеною антикорозійною стійкістю і міцністю [43]. Відвальні повільно охолоджені доменні шлаки до недавнього часу застосовували в будівництві лише як наповнювачі при виготовленні легких і важких бетонів, для отримання щебню, пемзи, шлаковати, пристроїв нижніх основ автомобільних доріг [44, 45]. Рівень використання шлаків у цементній галузі складає близько 2,0 млн т/рік. Споживання шлаків цементною галуззю можливо вважати стабільним, адже для підвищення рівня споживання необхідне відкриття нових будівельних підприємств, що здійснюється в Україні досить повільно.

*Дорожнє будівництво.* Шлаковий щебінь металургійних підприємств знайшов широке розповсюдження як складовий матеріал при будівництві автомобільних доріг, здатний замінити природні матеріали. Цим питанням присвячена значна кількість наукових робіт [46 – 48]. Використання шлакових матеріалів є найбільш технічно та економічно вигідним для будь-яких будівельно-ремонтних робіт при будівництві автомобільних доріг. Щебінь та суміші з металургійних шлаків застосовують в шарах дорожнього одягу, при укріпленні узбіччя, влаштуванні шорстких поверхневих обробок покриттів та приготуванні асфальтобетонних сумішей [49].

За даними звіту Укравтодору за 2019 рік, в Україні проведено ремонтно-будівельні роботи 847 км автомобільних доріг [50], але використання шлаку в дорогах державного значення не регламентується. Проте, 4 грудня 2019 року урядом України прийнято розпорядження Кабінету міністрів України № 1420 р «Про застосування відходів виробництва в дорожньому будівництві», згідно до якого при ремонті автомобільних доріг загального користування застосовувати неціновий критерій «Заходи із захисту довкілля» з питомою вагою металургійних шлаків не менше 10% [51]. З'являються перспективи збільшення обсягів використання шлаків, але масштабними їх складно назвати, при цьому поставляти сировину у вигляді шлакового щебню спроможні не всі регіони-накопичувачі шлаків, здебільшого металургійні комбінати центральної України. Це пояснюється концентрацією фронту ремонтно-будівельних робіт у центральній та західній частині держави.

*Гірничодобувна галузь – заповнення виробленого простору шахт та кар'єрів.* Відомий досвід використання доменних гранульованих шлаків також і у гірничодобувній галузі при підземному видобутку багатих руд чорних та кольорових металів, який здійснюється здебільшого системами розробки із твердіючим закладенням [52, 53], що призводить до попередження провалів денної поверхні та виникненні техногенної катастрофи [54]. На рудниках країн Співдружності Незалежних Держав (СНД) доменні гранульовані шлаки знайшли поширення як основний в'язучий матеріал або інертний наповнювач у складі

твердіючих закладних сумішей. Твердіючими закладними сумішами заповнюють підземні пустоти у надрах, що виникли внаслідок видобутку корисних копалин для підвищення коефіцієнту їх вилучення (заміна природного масиву на штучний), попередження деформацій денної поверхні, збереження режиму підземних вод та підвищення рівня безпеки ведення гірничих робіт. При заповненні підземних пустот твердіючими сумішами зменшуються концентрації напружень та, відповідно, зміщення у гірському масиві [55, 56]. На Рисунку 1.7 наведено викопіювання із паспорту закладних робіт із камерою, що підлягає закладанню.

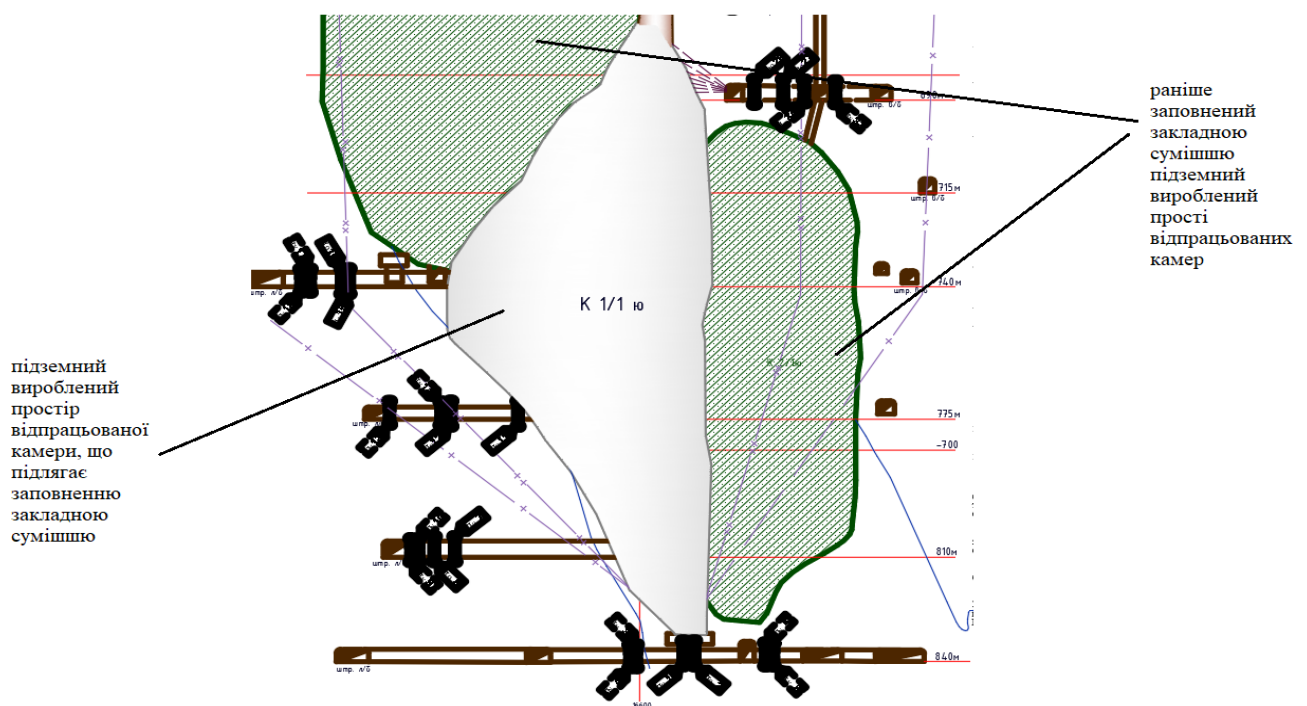


Рисунок 1.7 – Викопіювання з паспорту закладних робіт відпрацьованої камери в умовах ПрАТ «Запорізький ЗРК»

Закладні суміші готуються здебільшого у поверхневих закладних комплексах, які складаються з різноманітних ланцюгів спеціальних апаратів, після чого за допомогою трубопровідного транспорту у рідкому стані подаються у підземний простір до місця закладання. Подрібнення доменного шлаку здійснюється зазвичай у кульових млинах мокрим помелом продуктивністю до 50 – 60 т/год зі встановленим виходом фракції 50 – 60% частинок розміром –0,074 мм [57]. Після укладання закладної суміші у підземних пустотах протягом

певного терміну твердіння закладний масив, який заповнив підземні пустоти, із рідкого стану кристалізується внаслідок процесу гідратації у твердий стан з певними міцнісними властивостями.

ПрАТ «Запорізький ЗРК» видобуває залізні руди Південно-Білозерського родовища камерною системою розробки із твердіючим закладенням. Застосовується наступний склад закладної суміші: мелений доменний гранульований шлак «Запоріжсталь» – 400 – 500 кг; відвальний доменний шлак – 300 – 400 кг; відходи вапняку – 600 – 750 кг; відвальна подрібнена гірська порода – 400 – 500 кг; вода – 350 – 400 л. Міцність сформованого закладного масиву становить 6 – 7 МПа. Річний обсяг закладних робіт складає 1,2 млн м<sup>3</sup> закладної суміші. Поступове нарощування виробничої потужності комбінату призводить до збільшення обсягу виробництва закладних робіт. Загалом, щорічно в підземних пустотах Південно-Білозерського родовища у складі закладної суміші утилізується 1,8 млн т шлаків, вапняків і пустих порід [58].

Державне підприємство «Східний ГЗК» розробляє уранові руди Ватутінського родовища камерною системою розробки із твердіючим закладенням. Для зниження собівартості в закладну суміш додають подрібнені гірські породи до крупності 15 мм. Склад 1 м<sup>3</sup> суміші наступний: доменний гранульований шлак – 200 – 300 кг; пісок – 650 – 750 кг; порода подрібнена – 750 кг; вода шахтна – 300 – 400 л. Відпрацювання запасів руди на шахті здійснюється за допомогою поверхово-камерної системи з твердіючим закладанням. Обсяг закладних робіт становить 0,5 млн м<sup>3</sup>/рік. Міцність закладного масиву становить 3 – 5 МПа. Глибина розробки при цьому – 550 м [59]. Починаючи з 2018 року, на комбінаті існує логістична проблема із доставкою шлаків на закладний комплекс, тому шлаки не утилізуються в підземному просторі.

Підвищення рівня утилізації металургійних шлаків шляхом закладання виробленого простору саме шахт є малоефективним та безперспективним. Це пояснюється, перш за все, високою витратністю системи розробки із закладанням виробленого простору – до 15 – 25% собівартості обходяться закладні роботи [60]. Для того, щоб система розробки була ефективною та виправданою, родовище, що

розробляється, повинно бути цінним і тільки в цьому випадку може бути застосовано закладання. Наприклад, в умовах шахт Кривбасу, де об'єм накопичених підземних пустот оцінюється в 30 млн м<sup>3</sup>, руди мають здебільшого середню цінність і в цих умовах застосовують камерні системи розробки та системи розробки з поверховим обваленням налягаючих порід. Додає труднощів також значна глибина розробки (до 1700 м) [61]. У зв'язку з цим питання застосування систем розробки із закладанням не є актуальним для цього регіону.

Перспективним напрямом утилізації металургійних шлаків може бути їх розміщення у виробленому просторі кар'єрів при відкритому способі розробки, що близько розташовані до металургійних підприємств, оскільки вони мають IV клас небезпеки. При виконанні гірничотехнічного етапу рекультивації потрібно науково обґрунтувати використання шлаків замість відвальних пустих порід. Позитивним аспектом реалізації цього напряму буде, в першу чергу, високий рівень утилізації металургійних шлаків. Відвали пустих порід можуть використовуватись на етапі біологічної рекультивації після відповідних заходів гірничотехнічного етапу. Навіть якщо відвали пустих порід самих кар'єрів неповністю будуть використані, вони є більш безпечнішими для навколишнього середовища завдяки своєму природному походженню.

Досвід заповнення виробленого простору кар'єру промисловими відходами існує на Західному кар'єрі м. Магнітогорськ (Росія) [62, 63]. Засипка здійснюється в основному мартенівськими і доменними шлаками та іншими промисловими відходами, обсяг засипки кар'єра металургійними шлаками становить 3,55 млн м, технологія заповнення – комбінована. Однак процес заповнення відходами не враховує формування стійкого масиву без утворення просядних явищ, а техногенний пустий простір розглядається для складування.

Також є досвід розробки проєкту утилізації промислових відходів у відпрацьованому Мокрянському глиняному кар'єрі. Там здійснювалося розміщення у кар'єр будівельних та інертних промислових відходів IV класу небезпеки, зокрема металургійних шлаків із наступним нанесення родючого шару, висадженням багатолітніх трав і чагарників. В технології не звертається увага на конкретний можливий вплив шлаків на ґрунти та водоносні горизонти.



Досвід закладання відкритих гірничих виробок побічними продуктами промислового виробництва неодноразово мав місце на різних закритих кар'єрах [64, 65]. Проте, наукового обґрунтування параметрів формування закладного масиву не здійснено, рішення ґрунтуються лише на інженерних розрахунках.

Реалізація заходів закладання металургійних шлаків у кар'єрні пустоти можлива шляхом розробки спеціальних науково обґрунтованих нормативних документів, що регламентують використання шлаків як закладних матеріалів у процесі гірничотехнічної рекультивації порушених земель. Тобто металургійні шлаки зі статусу «відходи» перетворюються у статус «закладний або рекультиваційний матеріал».

*Інші напрямки використання.* Металургійні шлаки знайшли використання при будівництві гідротехнічних споруд, виробництві мінеральних добрив для зниження кислотності ґрунтів, частковому використанні у домогосподарствах [66]. Другорядні напрями використання знаходяться на рівні 15 – 20% від загальної утилізації.

Проведений аналіз напрямів використання вказує, що за рівнем масштабності в теперішніх умовах розвитку суспільства найбільш пріоритетним напрямом може слугувати розміщення металургійних шлаків у техногенних пустотах, спричинених гірничими роботами як при підземному, так і при відкритому способі розробці.

### **1.3. Проблеми утилізації металургійних шлаків**

#### **Приазовського регіону**

Маріуполь є потужним портовим та промисловим центром у південно-східній частині України, де активно розвинута металургійна галузь – у місті функціонують два потужних металургійних комбінати – ПрАТ «ММК ім. Ілліча» та ПрАТ «МК «Азовсталь». Внаслідок металургійного виробництва на території підприємств і прилеглих, спеціально відведених територій (МВВ) складована значна кількість доменних та сталеплавильних шлаків, що наведено у Таблиці 1.2 [19, 67].

Таблиця 1.2 – Дані щодо утворення металургійних шлаків при функціонуванні металургійних комбінатів

Комбінат	Найменування відходу	Накопичено на підприємстві, т	Накопичено у МВВ, т	Площа, га
ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат ім. Ілліча»	Шлаки доменні гранульовані. Щебінь. Ковшові залишки	3909870,0	15779659,0	≈ 200
	Шлаки сталеплавильні	949274,01	17867464,06	
	Шлаки доменні (не гранульовані) рядові для дорожнього будівництва	—	244222,231	
ПрАТ «Металургійний комбінат «Азовсталь»	Шлаки доменні (не гранульовані) рядові для дорожнього будівництва	—	30566064,816	≈ 65
	Шлаки сталеплавильні мартенівські рядові для дорожнього будівництва	—	4909025,063	

Місцерозташування шлакових відвалів ПрАТ «ММК ім. Ілліча» та ПрАТ «МК «Азовсталь» наведено на Рисунку 1.8. На сьогодні наповненість відвалів доменними та сталеплавильними шлаками складає понад 90%, що свідчить про гостру проблему їх стрімкої утилізації, адже отримання нових або розширення існуючих земельних площ під МВВ майже неможливе. Наповненість відвалів збільшується завдяки негативному балансу показників накопичення утилізації та відходів. Низький рівень утилізації металургійних шлаків в Україні обумовлений недосконалістю законодавчої бази, де шлаки фігурують як відходи, а не побічний продукт, що юридично обмежує їх використання з екологічної точки зору, а також відсутністю дієвих механізмів стимулювання металургійних підприємств до цільового використання шлаків у різних галузях економіки [68].

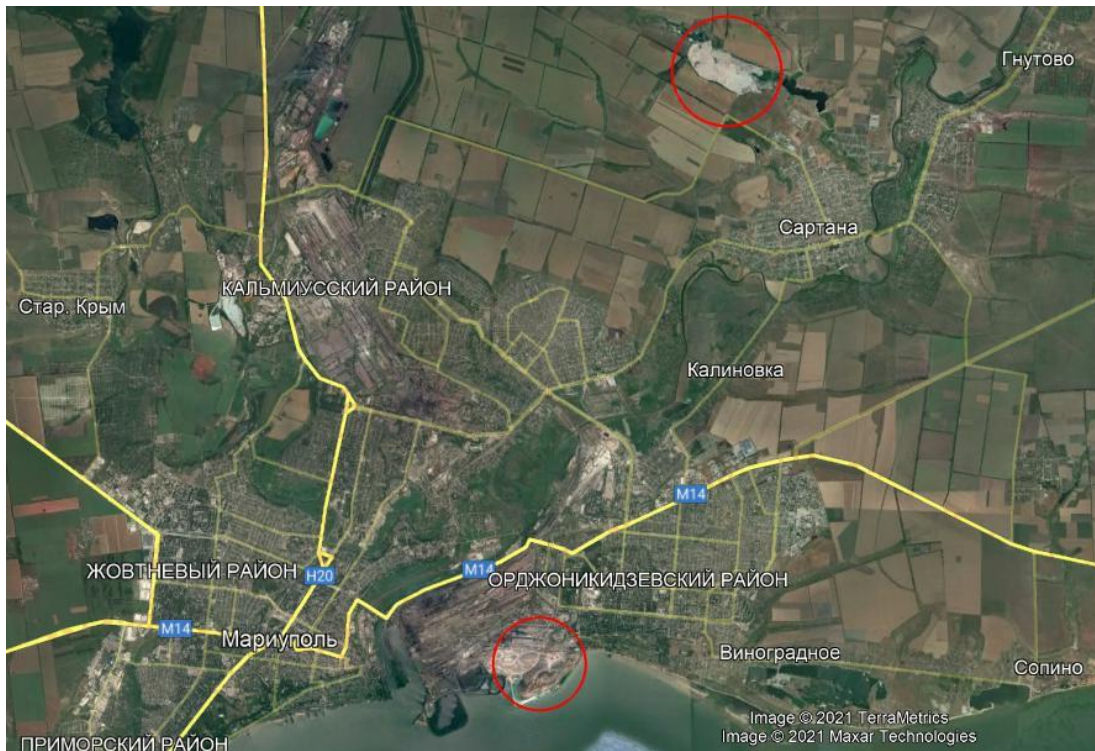
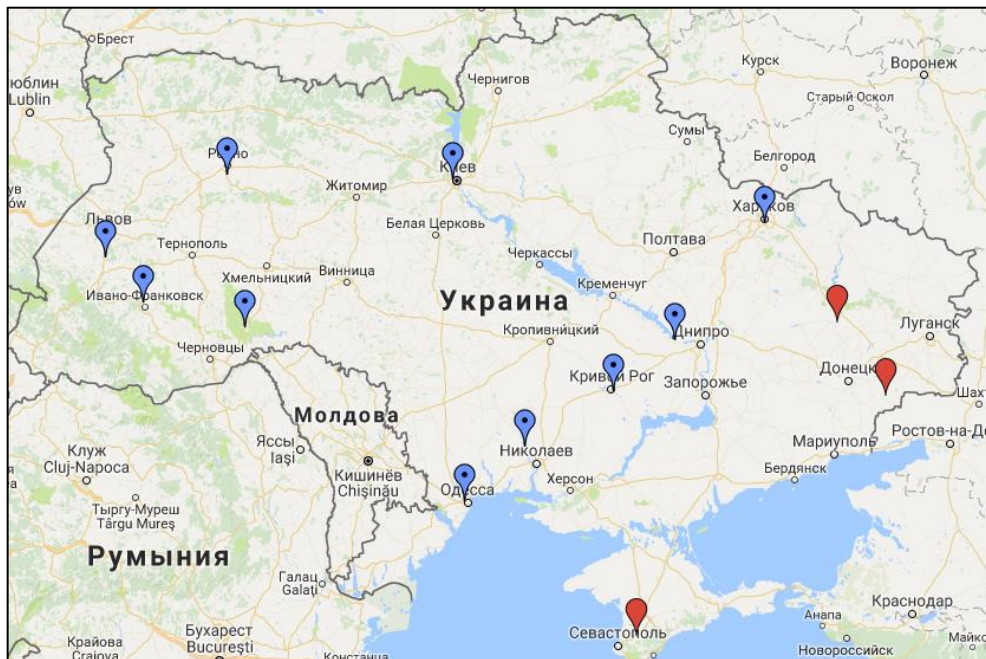


Рисунок 1.8 – Розміщення відвалів металургійних шлаків  
ПрАТ «ММК ім. Ілліча» та ПрАТ «МК «Азовсталь» у м. Маріуполь

Навіть у разі майбутніх позитивних законодавчих змін щодо державного регулювання у сфері поводження з безпечними відходами IV класу, які являють собою цінний сировинний ресурс (такі як металургійні шлаки), вагомим впливовим та обмежуючим фактором розвитку ринку доменних гранульованих шлаків буде їх географічне розташування та віддаленість від споживачів й відсутність розвиненої транспортної інфраструктури, адже транспортні витрати значно перевищують ринкову вартість 1 т металургійних шлаків.

Аналіз місць розташування відвалів шлаків (Рис. 1.9) дозволяє в першому наближенні оцінити перспективність їх розташування з позиції віддаленості та ізолюваності до основних підприємств цементної галузі – найбільшого споживача шлаків. Так, Запорізький, Криворізький і Придніпровський райони знаходяться здебільшого в найбільш зручному місцерозташуванні до основних підприємств цементної промисловості (Рис. 1.9), а металургійні шлаки Приазовського району знаходяться у менш вигіднішому положенні, у крайній південно-східній частині України.

(a)



(б)

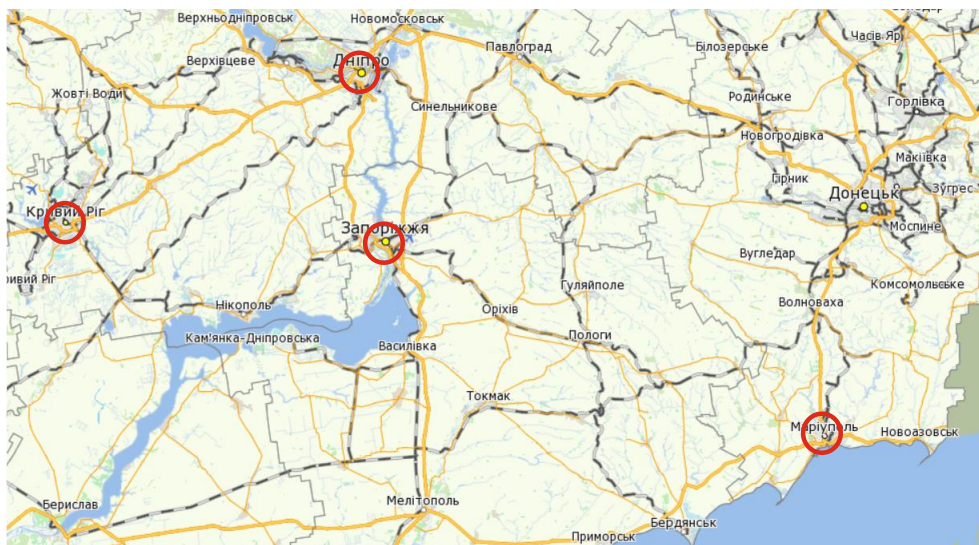


Рисунок 1.9 – Розміщення основних підприємств цементної промисловості (а) та транспортної розв'язки регіонів-накопичувачів металургійних шлаків (б)

Якщо Запоріжжя, Кривий Ріг та Дніпро мають 4 – 5 залізничних розв'язок, то Маріуполь лише одну, що проходить поруч із окупованими територіями.

Відстань від основних споживачів, високі тарифи на транспортування, обмежена пропускна здатність транспортної системи, дефіцит вагонного парку,

відсутність великих локальних і регіональних інфраструктурних проєктів, а також відсутність політики сприяння в галузі ресурсозбереження та екології, роблять шлакову продукцію маріупольських металургійних комбінатів неконкурентоспроможною порівняно з природною сировиною або шлаковою продукцією інших підприємств чорної металургії України, які розташовані ближче до споживачів. Крім того, з 2014 року немає доступу до потенційних ринків збуту шлаків на наближених до східного кордону Донецької області регіонів Російської Федерації та на території Криму [69].

Вищевикладене свідчить про те, що для ізольованих регіонів-накопичувачів металургійних шлаків необхідним та першочерговим завданням є пошук нових способів масштабної утилізації накопичених об'ємів металургійних шлаків у прилеглий місцевості. На сьогоднішній день для маріупольських меткомбінатів «ММК ім. Ілліча» та «МК «Азовсталь» склалася унікальна складна ситуація з доступом до ринків збуту шлакової продукції у порівнянні з іншими галузевими підприємствами. З початку військового конфлікту на Донбасі доступ до традиційних ринків збуту шлакової продукції металургійних підприємств Маріуполя зазнав додаткових суттєвих обмежень. По-перше, з цементної промисловості України вибули два найближчих до Маріуполя цементних заводи: Амвросіївський цементний завод, який залишився на непідконтрольній території, та Краматорський цементний завод «Гармата», що припинив роботу в 2015 році.

Найближчі з діючих цементних заводів знаходяться на відстані більше 400 км від Маріуполя у містах Миколаєві, Кам'янському та Кривому Розі. У найближчому регіоні Приазов'я – Донецькій, Запорізькій та Херсонській областях, – відсутні підприємства з виробництва цементу.

По-друге, основні транспортні вузли Донецької залізниці залишилися на непідконтрольній території, внаслідок чого знизилася пропускна здатність перевезення промислових вантажів між Маріуполем та іншими регіональними центрами України [70]. Порушення транспортно-логістичних зв'язків негативно відбилося на роботі металургійних комбінатів Маріуполя, які періодично

відчувають перебої у поставках сировини, що призводить до вимушеної втрати потужностей виробництва. Крім того, за останні кілька років обсяг вагонного парку Центру Транспортної Логістики ДП «Укрзалізниця» значно скоротився, що створило дефіцит вагонів практично у всіх галузях економіки України [71]. Але найбільш гостро дефіцит рухомого складу до теперішнього часу відчувається саме для металургійних підприємств Маріуполя.

По-третє, ремонти автодоріг поблизу Маріуполя, в регіоні Приазов'я і на території, близькій до лінії розмежування, протягом декількох років виконувалися в досить обмеженому обсязі. Поставки шлакового щебню з маріупольських комбінатів ускладнені, оскільки основний фронт робіт Укравтодору за поточними і капітальними ремонтам автодоріг сконцентрований в західній та центральній частинах України, про що свідчить інтерактивна карта ремонту доріг Міністерства інфраструктури України (Рис. 1.10) [71].

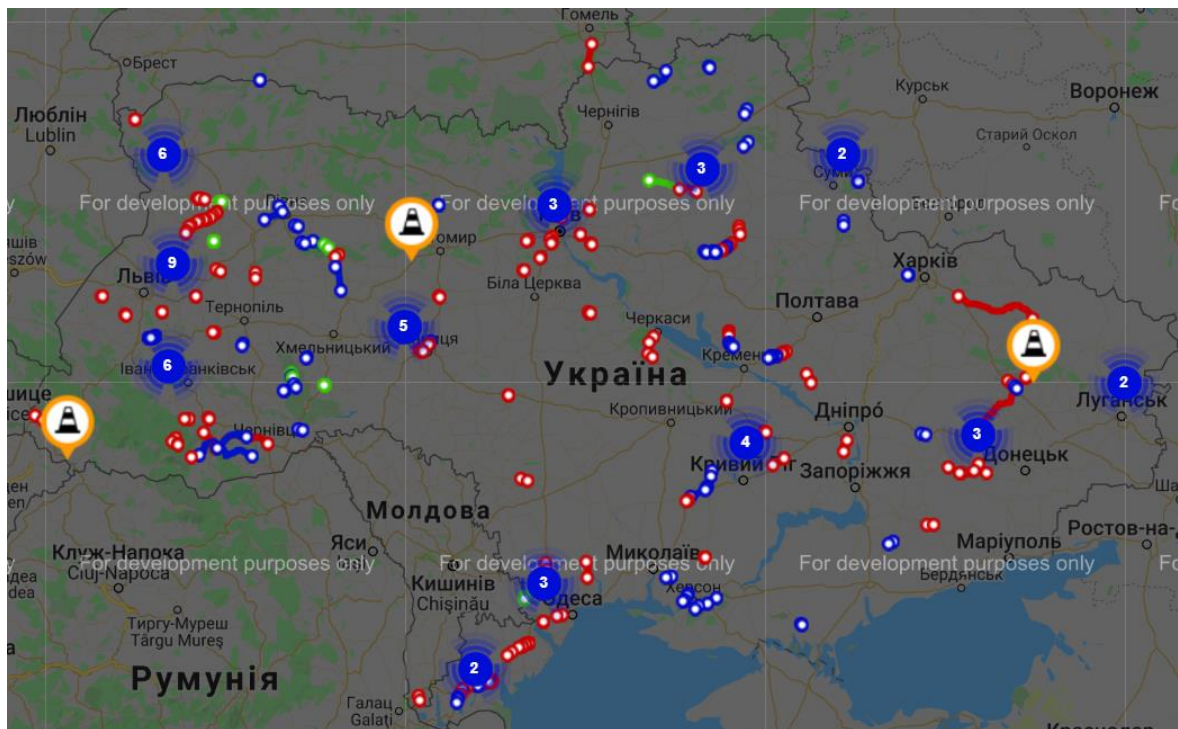


Рисунок 1.10 – Інтерактивна карта ремонту доріг в Україні (2020 р.)

Стимулювання обсягу збуту шлакової продукції шляхом демпінгу (зниження відпускних цін на шлакову продукцію маріупольських меткомбінатів) не дасть бажаного результату, оскільки транспортні витрати у багато разів

перевищують відпускні ціни на саму шлакову продукцію. Підвищення податку на розміщення шлаків у відвалах також не призведе до бажаного результату, оскільки це не вплине на кон'юнктуру ринку споживання шлакової продукції. Таким чином, єдино можливий шлях врегулювання шлакового питання, зокрема для металургійних підприємств міста Маріуполя, знаходиться у сфері екологічної політики, що підтверджується низкою прикладів зі світової практики.

В умовах логістичної ізоляції, відсутності суттєвого ринку збуту шлакової продукції та недосконалості державної політики поводження з відходами (потенційно цінними ресурсами) необхідно розвивати напрям утилізації – закладання виробленого простору кар'єрів шляхом доведення безпечності його впливу на довкілля та визначення раціональних параметрів закладних сумішей [72].

При відкритій розробці родовищ обсягів розкривних порід, що складаються біля кар'єрів, не вистачає для повного відтворення ландшафтів після закінчення видобувних робіт. При експлуатації родовищ корисних копалин із надр, як правило, вилучаються мільйони тон запасів мінеральної сировини й 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 завдання відтворення колишнього ландшафту та ліквідація техногенних пустот, то виникає потреба використання додаткового рекультиваційного матеріалу. Одним із видів закладного або рекультиваційного 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.

Таким чином, закладання виробленого простору кар'єрів металургійними шлаками є перспективним напрямом їх масштабної утилізації. При цьому одним із важливих питань для дослідження є безпечність безпосереднього контакту шару закладного матеріалу з підземними водами. Ці актуальні проблемні питання на сьогодні є недостатньо вивченими.

#### **1.4. Постановка мети та завдань дослідження**

Проблема утилізації металургійних шлаків Приазовського регіону потребує термінового розв'язання, адже вільні площі під розміщення відходів майже вичерпані, а нові запаси шлаків постійно поповнюються у процесі металургійного виробництва. З логістичних причин та віддаленості основного фронту будівництва доріг ринок збуту шлакової продукції фактично паралізовано, тому завдяки наявності техногенних пустот внаслідок ведення відкритих гірничих робіт є доцільним дослідження ефективності використання металургійних шлаків як закладних матеріалів. Передбачається дослідити можливість та ефективність використання металургійних шлаків для формування закладного масиву вироблених кар'єрних пустот.

Метою дисертаційної роботи є обґрунтування раціональних параметрів формування закладного масиву з металургійних шлаків на основі встановлених закономірностей взаємодії їх різного співвідношення з кар'єрними водами та покращення фізико-механічних властивостей ущільненням для ефективного відновлення денної поверхні.

Для досягнення поставленої мети сформульовані та вирішені основні наукові завдання дослідження:

1. Аналіз накопичення, проблеми та існуючих напрямів утилізації шлаків чорної металургії провідних комбінатів України.
2. Розробка методики дослідження взаємодії металургійних шлаків з кар'єрними водами та вивчення фізико-механічних та деформаційних характеристик.
3. Встановлення закономірностей зміни концентрацій продуктів взаємодії металургійних шлаків з кар'єрними водами при їх різному співвідношенні.
4. Дослідження характеру зміни фізико-механічних властивостей та деформаційних характеристик закладного матеріалу при механічному ущільненні.
5. Обґрунтування параметрів формування закладного масиву у кар'єрних пустотах та оцінка економічної ефективності заходів.



## 1.5. Висновки до розділу 1

В результаті аналізу й узагальнення проблем накопичення та утилізації, а також потенційного впливу металургійних шлаків на довкілля, виявлено низку аспектів і особливостей:

– показано, що близько 10% всіх щорічних накопичень промислових відходів складають відходи переробної промисловості, з яких домінуюче значення з показником 70% займають відходи металургійного виробництва, 18% – відходи виробництва харчових продуктів, 4% – виробництва хімічних речовин і хімічної продукції;

– виконано градацію районів-накопичувачів шлаків та встановлено, що за обсягом запасів металургійних шлаків лідером є Запорізький район (300 млн т), а найбільш займані ділянки відведені під відвали шлаків Криворізького району – понад 1500 га землі;

– визначено, що вагомим впливовим і обмежуючим фактором розвитку ринку доменних гранульованих шлаків є їх географічне розташування та віддаленість від споживачів, а також відсутність розвиненої транспортної інфраструктури, адже транспортні витрати значно перевищують ринкову вартість 1 т металургійних шлаків;

– встановлено, що металургійні шлаки Запорізького, Криворізького та Придніпровського районів знаходяться в більш зручнішому місцерозташуванні з позиції віддаленості та ізолюваності до основних підприємств цементної галузі, ніж металургійні шлаки Приазовського району;

– відзначено, що низький рівень утилізації металургійних шлаків в Україні обумовлений недосконалістю законодавчої бази, де шлаки фігурують як відходи, а не побічний продукт, що юридично обмежує їх використання з екологічної точки зору, а також відсутністю дієвих механізмів стимулювання металургійних підприємств до цільового використання шлаків у різних галузях економіки;

– визначено, на підставі аналізу досліджень попередніх науковців, що металургійні шлаки чинять вплив на природне середовище, але його рівень може бути як критичним, так і допустимим;

– рекомендовано для встановлення достовірного рівня забруднення основних компонентів природного середовища металургійними шлаками експериментально визначити вплив фільтратів шлакових відвалів на ґрунти та вплив шлаків на якість води при безпосередньому їх контакті;

– в умовах логістичної ізоляції та відсутності суттєвого ринку збуту шлакової продукції необхідно дослідити такий напрям утилізації як закладання виробленого простору кар'єрів шляхом доведення безпечності його впливу на довкілля та визначення раціональних параметрів закладних сумішей.

За результатами досліджень опубліковані роботи [14, 35, 37, 54, 68, 69, 70, 72].

### **1.6. Список використаних джерел до розділу 1**

1. Зигун, А.Ю. (2011). Використання світового досвіду системи управління відходами. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Теорія і практика будівництва*, (697), 122-126.

2. Копач, П.І., & Сердюк, Я.Я. (2011). Проблема зниження відходності господарських комплексів гірничо-металургійного регіону та шляхи її вирішення. *Екологія і природокористування*, (14), 161-177.

3. Bondarenko, V.I., Vivcharenko, A.V., & Yarkovych, A.I. (2013). New technique of coal mining very thin seams with leaving rock in mine. *Szkola Eksploatacji Podziemnej*, 75-81.

4. Боронос, В.Г., Шкарупа, О.В., & Коновалов, М.Г. (2016). Екологічна модернізація системи управління поводження з твердими побутовими відходами в Україні на основі досвіду ЄС та Норвегії. *Маркетинг і менеджмент інновацій*, (2), 222-234.

5. Галецкий, Л.С., & Егорова, Т.М. (2008). Региональный эколого-геохимический анализ влияния тяжелых металлов промышленных отходов на состояние окружающей среды Украины. *Екологія довкілля та безпека життєдіяльності*, (5), 10-14.

6. *Статистичний збірник «Довкілля України» за 2018 рік.* (2019). Київ: Державна служба статистики України, 214 с.

7. Petlovanyi, M., Kuzmenko, O., Lozynskiy, V., Popovych, V., Sai, K., & Saik, P. (2019). Review of man-made mineral formations accumulation and prospects of their developing in mining industrial regions in Ukraine. *Mining of Mineral Deposits*, 13(1), 24-38. <https://doi.org/10.33271/mining13.01.024>

8. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2015 році. (2017). Київ: Міністерство екології та природних ресурсів України, 308 с.

9. State Fiscal Service of Ukraine. (2018). Official Website. [online]. Available at: <http://sfs.gov.ua>

10. Shatokha, V. (2015). The sustainability of the iron and steel industries in Ukraine: challenges and opportunities. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2(2), 106-115. <https://doi.org/10.1007/s40831-015-0036-2>

11. Тарасова, Т.В. (2013). Проблеми використання відходів як сировинних ресурсів для будівельних матеріалів. *Збірник наукових праць «Техногенно-екологічна безпека та цивільний захист»*, (6), 119-126.

12. Крюковська, Л.І. (2013). До еколого-економічної оцінки заміни природних матеріалів металургійними шлаками при будівництві доріг. *Вісник Національного транспортного університету*, (27), 359-364.

13. Калмыкова, Ю.С., Ларин, В.И., & Хоботова, Э.Б. (2016). Рациональные пути использования отвальных доменных шлаков. *Энергетика: економіка, технології, екологія*, (1), 44-50.

14. Філоненко, О.В. (2020). Щодо підвищення рівня утилізації металургійних шлаків. В *Матеріалах XIV Міжнародної науково-практичної конференції «Українська школа гірничої інженерії»* (с. 85-86). Бердянськ, Україна. <https://doi.org/10.33271/usme14.085>

15. Алешин, А.А., Казачков, Е.А., & Остроушко, А.В. (2007). Повышение эффективности переработки твердых металлургических шлаков. *Вісник Приазовського державного технічного університету*, (17), 220-223.

16. Тарабрина, Л.А., Курган, Т.А., & Игнатьева, Н.С. (2000). Переработка сталеплавильных шлаков в ОАО «ММК». *Металлург*, (9), 26-27.

17. *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Дніпропетровській області за 2019 рік.* (2020). Дніпро: Департамент екології та природних ресурсів, 300 с.

18. *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Запорізькій області за 2019 рік.* (2020). Запоріжжя: Департамент екології та природних ресурсів, 284 с.

19. *Регіональна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Донецькій області за 2019 рік.* (2020). Краматорськ: Департамент екології та природних ресурсів, 233 с.

20. ДСанПіН 2.2.7.029-99. (1999). *Гігієнічні вимоги щодо поводження з промисловими відходами та визначення класу їх небезпеки для здоров'я населення.* Київ: МОЗ України.

21. Борисовська, О.О., & Павличенко, А.В. (2017). Оцінка екологічної небезпеки золошлакових відходів теплоелектростанцій. *Геотехнічна механіка*, (134), 36-46.

22. Крюковська, Л.І. (2019). *Підвищення рівня екологічної безпеки у дорожньому будівництві шляхом використання металургійних шлаків.* Київ: Національний авіаційний університет, 188 с.

23. Боранкулова, Г.С. (2010). Экологическая оценка твердых отходов металлургического производства. *Гидрометеорология и экология*, (2), 83-87.

24. Пугин, К.Г., & Вайсман, Я.И. (2013). Методические подходы к разработке и идентификации наилучших доступных технологий на примере использования шлаков черной металлургии. *Вестник МГСУ*, (10), 183-195.

25. Хоботова, Э.Б., & Калмыкова, Ю.С. (2017). Сокращение уровня экологической опасности при утилизации шлака. *Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета*, (76), 46-50.

26. Тищук, В.Ю., & Плотников, О.В. (2015). Фізико-хімічні основи пилоутворення і пилоподавлення на шлакових відвалах металургійних підприємств. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*, (49), 231-239.

27. Волкова, Т.П., & Сніжок, І.С. (2012). Аналіз та оцінка впливу металургійних підприємств на забруднення ґрунтів Донецької області. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Гірничо-геологічна», 16(206), 73-78.*

28. Фещенко, О.Л., & Каменева, Н.В. (2016). Оцінка впливу діяльності металургійних підприємств на навколишнє природне середовище України. *Інвестиції: практика та досвід, (2), 28-32.*

29. Захаров, А.В., Гуман, О.М., Макаров, А.Б., Антонова, И.А., & Ли, Т.И. (2014). Экологическое состояние окружающей среды отвалов черной металлургии (по результатам мониторинга шлакового отвала НТМК). *Известия Уральского государственного горного университета, 3(35), 51-56.*

30. Брызгалов, С.В. (2009). *Снижение негативного воздействия доменных шлаков при их утилизации на объекты гидросферы.* Пермь: Пермский государственный технический университет, 18 с.

31. Дан, Е.Л., Бутенко, Э.О., & Капустин, А.Е. (2018). Сульфидные загрязнения поверхностных вод промышленными отходами. *Вісник Приазовського державного технічного університету, (37), 217-224.*  
<https://doi.org/10.31498/2225-6733.37.2018.160416>

32. Вилкул, Ю.Г., Азарян, А.А., & Колосов, В.А. (2013). Переработка и комплексное использование минерального сырья техногенных месторождений. *Гірничий вісник, (96), 3-10.*

33. Шапошникова, О. (2019). *Дохід з відходів: Україна може подвоїти переробку та експорт шлаків.* Режим доступу: <https://gmk.center/ua/posts/dohid-z-vidhodiv-ukraina-mozhe-podvoiti-pererobku-ta-ekspert-shlakiv/>

34. GMK Center. (2019). *Как увеличить использование шлаков в Украине: три совета.* Режим доступу: <https://re-solutions.com.ua/ru/yak-zbilshyty-vykorystannya-shlakiv-v-ukrayini-try-porady/>

35. Филоненко, А.В. (2018). Анализ современных технологий переработки шлаков доменного производства. *Экология и промышленность, (3-4), 91-104.*

36. Піддубний, С.В., & Білошицький, М.В. (2019). Застосування відходів виробництва для виготовлення дорожнього цементобетону. *Вісник*

- східноукраїнського національного університету імені В. Даля, 8(256), 57-61. <https://doi.org/10.33216/1998-7927-2019-256-8-57-61>
37. Бондаренко, В.І., & Філоненко, О.В. (2020). Аналіз накопичення та впливу металургійних шлаків на навколишнє природне середовище. *Збірник наукових праць НГУ*, (61), 78-93. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/61.078>
38. Кочешкова, І.М. (2020). Зарубіжний досвід утворення та використання доменних шлаків. *Економічний вісник Донбасу*, 2(60), 181-186.
39. Дворкін, Л.Й., & Мироненко, А.В. (2019). *Будівельні матеріали та виробництво із застосуванням промислових відходів*. Рівне: НУВГП, 298 с.
40. Sekhar, C.D., & Nayak, S. (2018). Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. *Construction and Building Materials*, (166), 531-536. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125>
41. Mallik, M., Hembram, S., Swain, D., & Behera, G. (2020). Potential utilization of LD slag and waste glass in composite production. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.881>
42. Соболев, Х.С., Марків, Т.Є., Петровська, Н.І., & Гідей, В.В. (2019). Аналіз ефективності використання тонкомеленого доменного гранульованого шлаку в бетоні. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Теорія і практика будівництва, (912), 169-174.
43. Лепа, В.В., & Прогнімак, О.Д. (2021). Проблеми утилізації доменних шлаків у контексті переходу до циркулярної економіки. *Економічний вісник Донбасу*, 1(63), 129-145.
44. Дмитрієв, М.М., Гамеляк, І.П., Островерхий, О.Г., & Дмитриченко, А.М. (2021). Використання відходів виробництва в дорожньому будівництві України. *Вісник Національного транспортного університету*. Серія «Технічні науки». 1(48), 143-156.
45. Бондар, О.І., Риженко, Н.О., & Салій, І.В. (2020). Накопичення шлаків металургійних підприємств: оцінка впливу на довкілля та екологічно обґрунтоване поводження. *Екологічні науки*, 3(30), 83-91.

46. ДБН В.2.3-4:2015. (2015). *Державні будівельні норми України. Автомобільні дороги – Частина I. Проектування – Частина II. Будівництво*. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 113 с.
47. Галушко, В.О., Галушко, О.М., Колодяжна, І.В., Уваров, Д.Ю., & Уварова, А.С. (2018). Альтернативні матеріали для дорожнього покриття. *Нові технології в будівництві*, (35), 49-54.
48. Лышик, П.А., & Науменко, А.И. (2012). Укрепление дорожных грунтов шлаковыми добавками. *Труды БГТУ*, 2(149), 70-72.
49. ДСТУ Б В.2.7-149:2008. (2008). *Будівельні матеріали. Щебінь і щебенево-піщані суміші із шлаків металургійних для дорожніх робіт. Технічні умови*. Київ: ДП «Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна».
50. *Публічний звіт голови державного агентства автомобільних доріг України Олександра Кубракова за 2019 рік*. (2020). Київ: Державне агентство автомобільних доріг України. Режим доступу: [https://ukravtodor.gov.ua/press/news/publichnyi\\_zvit\\_holovy\\_derzhavnoho\\_ahentstva\\_avtomobilnykh\\_dorih\\_ukrainy\\_oleksandra\\_kubrakova\\_za\\_2019\\_rik.html](https://ukravtodor.gov.ua/press/news/publichnyi_zvit_holovy_derzhavnoho_ahentstva_avtomobilnykh_dorih_ukrainy_oleksandra_kubrakova_za_2019_rik.html)
51. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 4 грудня 2019 року №1420-р. *Про застосування відходів виробництва в дорожньому будівництві*. Київ: Кабінет Міністрів України. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1420-2019-%D1%80#Text>
52. Кузьменко, А.М., Петлёваный, М.В., & Усатый, В.Ю. (2010). *Твердеющая закладка при отработке рудных крутых залежей в сложных горно-геологических условиях*. Днепропетровск: Национальный горный университет, 139 с.
53. Битимбаев, М.Ж., Крупник, Л.А., & Шапошник, Ю.Н. (2012). *Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых*. Алматы: Ассоциация ВУЗов Казахстана.
54. Філоненко, О.В., & Петльованый, М.В. (2019). Техногенна та екологічна небезпека підземного видобутку залізних руд Кривбасу. В *Матеріалах*

міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми техногенно-екологічної безпеки: освіта, наука, практика» (с. 66-68). Харків, Україна.

55. Talibe Keita, A.M., Jahanbakhshzadeh, A., & Li, L. (2021). Numerical analysis of the stability of arched sill mats made of cemented backfill. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, (140), 104667. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104667>

56. Khomenko, O., Kononenko, M., & Petlovanyi, M. (2015). Analytical modeling of the backfill massif deformations around the chamber with mining depth increase. *New Developments in Mining Engineering 2015: Theoretical and Practical Solutions of Mineral Resources Mining*, 265-269. <https://doi.org/10.1201/b19901-47>

57. Petlovanyi, M.V., Zubko, S.A., Popovych, V.V., & Sai, K.S. (2020). Physico-chemical mechanism of structure formation and strengthening in the backfill massif when filling underground cavities. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Technologii*, (6), 142-150. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2020-133-6-142-150>

58. Bazaluk, O., Petlovanyi, M., Lozynskyi, V., Zubko, S., Sai, K., & Saik, P. (2021). Sustainable underground iron ore mining in ukraine with backfilling worked-out area. *Sustainability*, 13(2), 834. <https://doi.org/10.3390/su13020834>

59. Ляшенко, В.И., Дятчин, В.З., & Тархин, Ю.Н. (2010). Научно-технические основы повышения безопасности жизнедеятельности в уранодобывающем регионе. *Науковий вісник НГУ*, (2), 7-14.

60. Анушенков, А.Н., Стовманенко, А.Ю., & Волков, Е.П. (2015). *Основы процессов производства и транспортирования закладочных смесей при подземной разработке месторождений полезных ископаемых*. Красноярск: Сибирский федеральный университет, Институт горного дела, геологии и геотехнологий, 206 с.

61. Письменный, С.В., & Ступник, Н.И. (2012). Перспективные технологические варианты дальнейшей отработки железорудных месторождений системами с массовым обрушением руды. *Вісник Криворізького національного університету*, (30), 3-7.

62. Гавришев, С.Е., & Пыталев, И.А. (2007). Перспективные направления использования отвалов и выработанного карьерного пространства. *Вестник МГТУ имени Г.И. Носова*, (4), 10-14.



63. 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.

64. *Звіт з оцінки впливу на довкілля ДП СхідГЗК. Смолінська шахта. Рекультивация кар'єру піску.* (2019). Жовті Води: УкрНДПРІ, 132 с.

65. 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.

66. Андрушина, Е.Е., & Шибаева, Г.Н. (2011). Композиционные вяжущие для гидротехнических бетонов. *Вестник ХТИ*, (32), 135-139.

67. *Екологічний паспорт Донецької області за 2020 рік.* (2021). Покровськ: Донецька ОДА, 348 с.

68. Filonenko, O., & Petlovanyi, M. (2018). Problematic aspects and ways to increase the level of metallurgical slags disposal. In *Materials of the International Scientific Conference «Scientific Development of New Eastern Europe»* (p. 55-60). Riga, Latvia. <https://doi:10.30525/978-9934-588-13-6-17>

69. Филоненко, А.В. (2019). Повышение эффективности утилизации крупнотоннажных промышленных отходов на предприятиях черной металлургии Украины. *Экология и промышленность*, 2(59), 78-87. <https://doi.org/10.35477/2311-584x.59.78-87>

70. Filonenko, O. (2018). Sustainable development of Ukrainian iron and steel industry enterprises in regards to the bulk manufacturing waste recycling efficiency improvement. *Mining of Mineral Deposits*, 12(1), 115-122. <https://doi.org/10.15407/mining12.01.115>

71. *Інтерактивна карта ремонту доріг в Україні.* (2021). Режим доступу: <https://mtu.gov.ua/intermap/#15>

72. Філоненко, О.В., & Петльованій, М.В. (2021). Технологічні та екологічні особливості заповнення кар'єрних пустот металургійними шлаками. В *Матеріалах XII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасний рух науки»*, Том 2 (с. 420-422). Дніпро, Україна: WayScience.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВЛАСТИВОСТЕЙ ТА ПАРАМЕТРІВ ФОРМУВАННЯ ЗАКЛАДНОГО МАСИВУ З МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ У КАР'ЄРНИХ ПУСТОТАХ

#### 2.1. Вибір і характеристика кар'єру для заповнення пустот металургійними шлаками

У зв'язку з низьким рівнем потреби різних галузей економіки в деяких видах металургійних шлаків маріупольських металургійних комбінатів (ПрАТ «ММК ім. Ілліча» та ПрАТ «МК «Азовсталь») вже накопичено та далі накопичується суттєвий обсяг шлакових матеріалів, що не реалізуються, а МВВ заповнені на понад 90%. Тому постає суттєве питання розробки напрямів масштабної утилізації металургійних шлаків, перспективним з яких є їх закладання у вироблені простори кар'єрів у процесі рекультивації.

Найбільш доцільними для закладання металургійних шлаків є кар'єри, які знаходяться на стадії закриття за техніко-економічним обґрунтуванням або завершили відпрацювання промислових запасів. Вже закриті кар'єри, зазвичай, є затопленими, а затрати на відкачування води та її відведення для укладання закладного матеріалу у вироблений простір будуть невиправданими.

У Донецькій області є тимчасово непрацюючі кар'єри. ТОВ «Соціальне відродження Донбасу» до 2028 року орендує Каранське родовище гранітів (смт. Мирне), де в наявності є 2 кар'єри – №2 та №3 (Рис. 2.1).

З 2010 року підприємство зупинило виробничу діяльність з видобутку гранітів у зв'язку з соціально-економічними причинами. В регіоні склалася ситуація, коли товарна продукція перестала бути потрібною через відмову співробітництва з основним споживачем. Крім того, кар'єр №2 розташований найближче до населеного пункту і при виконанні буропідривних робіт виникає соціальне напруження у мешканців регіону. Також якість корисної копалини погіршилась, а залишені промислові запаси гранітів на досягнутій глибині розробки нижче 80 м знаходяться на межі економічно доцільного видобутку.



Рисунок 2.1 – Розташування Каранських кар'єрів №2 та №3 біля смт. Мирне (джерело: Google Earth)

Вказані фактори створили труднощі для подальшого розвитку кар'єру №2, тому планується виконання техніко-економічного обґрунтування щодо доцільності подальшої розробки запасів кар'єру №2 та з високою вірогідністю кар'єр може бути закритим, а запаси – списані відповідними інституціями. Перспективи розвитку кар'єру №3 є більш високими, оскільки умови його розробки більш сприятливі.

Враховуючи незначну відстань (30 км) від ПрАТ «ММК ім. Ілліча» до непрацюючого Каранського кар'єру №2 в дисертаційній роботі приймається вироблений простір зазначеного кар'єру для дослідження можливості його подальшого заповнення металургійними шлаками як закладним матеріалом у процесі рекультиваційних робіт.

Клімат району – помірно-континентальний. Опади часто носять зливовий характер і супроводжуються сильними грозами, влітку не рідкими є засухи. Зима характеризується частими відлигами з повним відтаюванням сніжного покриву. Переважаючий напрямок вітрів – східний та північно-східний. Сезонне промерзання ґрунту становить 0,8 – 1,2 м.

В геологічному відношенні ділянок Каранського родовища, що розробляються, приймають участь інтрузивні кристалічні породи, які представлені лужними гранітами, що відносяться до віку герцинської складчастості; четвертинні відкладення представлені темно-бурими суглинками та ґрунтово-рослинним покривом. Лужні граніти виходять на поверхню у вигляді невеликих куполоподібних підняттів, тому розкрита поверхня ділянок нерівна, з окремими поглибленнями та незначними підняттями [1].

Четвертинні відкладення мають повсюдне розташування й залягають на третинних відкладеннях або ж безпосередньо на кристалічних породах. Потужність четвертинних відкладень на водорозділах і плато складає 10 м і більше, на схилах балок потужність їх значно зменшується. Потужність вивітрілого граніту коливається від 0,8 до 5,2 м.

Гідрогеологія родовища характеризується наявністю на розроблюваних ділянках водоносного горизонту, приуроченого до продуктів руйнування кристалічного масиву та тріщин кристалічних порід. Водоносний горизонт безнапірний, живлення його відбувається за рахунок фільтрації атмосферних опадів. Гідрогеологічні умови родовища сприятливі для ведення робіт на глибину до відмітки +64 м. При розробці нижчележачих горизонтів необхідним є облаштування спеціального водовідливу.

Гірничий відвід Каранського родовища має площу 195 га. Розкривні породи представлені ґрунтово-рослинним шаром 0,1 – 0,3 м суглинками жорствяних гранітів. Розкривні породи підрозділяються на м'які та скальні. До м'якої вскриші відноситься ґрунтово-рослинний шар і делювіальні суглинки потужністю від 0,1 до 2,5 м. Заплановані об'єми скальної вскриші намічені по площі, де ґрунтово-рослинний шар знятий і заскладований у відвал м'якої вскриші.

Розробка скальної вскриші здійснюється екскаватором ЕКГ-5А із застосуванням буропідривних робіт. Скальна вскриша представлена вивітрілими жорствяними та слабкими гранітами потужністю від 7 до 20 м. Промисловий коефіцієнт вскриші згідно з робочим проектом розробки дорівнює 0,049.

Фізико-механічні властивості корисної копалини, що видобувається, наведено у Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Фізико-механічні властивості гранітів продуктивної товщі

Об'ємна вага, т/м <sup>3</sup>	Водопоглинання, %	Пористість, %	Межа міцності при стисканні, кг/см <sup>2</sup>	
			у повітряно-сухому стані	у водонасиченому стані
2,50 – 2,62	0,33 – 1,32%	0,2 – 4,3	720 – 2440	836 – 2162

У відповідності до фізико-механічних властивостей корисної копалини та прийнятої системи розробки здійснення видобувних і вантажних робіт прийнято одноковшовими екскаваторами у комплексі з автомобільним транспортом із попереднім рихленням корисної копалини за допомогою буропідривних робіт.

Каранське родовище гранітів розробляється з 1950 року двома кар'єрами, проектна потужність яких складає 1200 тис. м<sup>3</sup>/рік. Враховуючи гірничо-геологічні умови залягання корисної копалини та розкривних порід, їх потужність і фізико-механічні властивості, а також наявність на родовищі двох відокремлених кар'єрів, проектом прийнята транспортна система розробки відкритим способом з паралельним переміщенням фронту робіт і зовнішнім відвалоутворенням.

При заданій продуктивності кар'єра розробку корисної копалини раціонально здійснювати одноковшовими екскаваторами з ковшом ємністю 5 м<sup>3</sup> у комплексі з автомобільним транспортом. Розпушення корисної копалини прийнято за допомогою буропідривних робіт методом свердловинних зарядів.

Кар'єр №2 розташований у південно-східній частині родовища, корисна копалина розкрита до відмітки +50 м і відпрацьовується п'ятьма видобувними уступами. Розкриття обох кар'єрів здійснено внутрішніми в'їзними траншеями на видобувні уступи (в кар'єрі №3 – до південної межі, в кар'єрі №2 – до південної та східної меж) для розширення фронту робіт, а також розкриття нижчележачих горизонтів. Глибина кар'єру №2 складає 60 м. Поперечний розріз кар'єру №2 наведено на Рисунку 2.2.

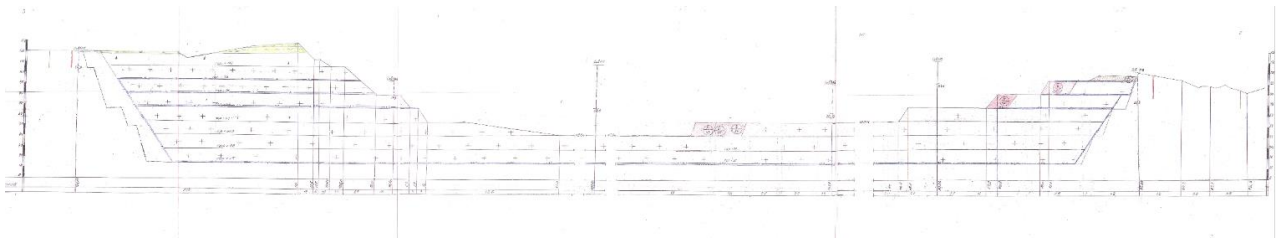


Рисунок 2.2 – Розріз по Каранському кар'єру №2

На кар'єрах прийнята транспортна система розробки відкритим способом з паралельним переміщенням фронту робіт із зовнішнім і внутрішнім відвалоутворенням. Основні фактичні параметри системи розробки наведено в Таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Фактичні параметри системи розробки, що застосовується

№ з/п	Найменування параметра	Значення	
		вскриша	видобуток
1.	Висота уступа, м	11 – 12	11,5 – 13,0
3.	Ширина робочого майданчика, м	50	35
4.	Ширина транспортної берми, м	20	20
5.	Ширина берми безпеки, м	8 – 9	8 – 9
6.	Кути відкосів робочого уступа, град	65 – 70	75 – 80
7.	Кути відкосів стійкого уступа, град	50 – 60	70
8.	Ширина екскаваторної заходки, м	15	15
9.	Ширина бурової заходки, м	17 – 25	17 – 25
10.	Ширина в'їзної траншеї, м	20	20 – 25

Розкриття родовища здійснюється у міру необхідної потреби в підготовлених і готових до виймання запасів. В даний час розкривні роботи зі зняття м'якої вскриші не здійснюються. У зв'язку з тим, що Каранські гранітні кар'єри мають потужність вскриші 0,8 – 1,0 м, а потужність відпрацьованої корисної копалини – 60 м, можливості засипки відпрацьованих кар'єрів складованими породами розкриву виключаються, хоча залишається вірогідність заповнення пустот техногенним матеріалом, таким як шлаки чорної металургії.

До теперішнього часу площа порушених земель гірничими роботами складає 224,2 га, складування родючого ґрунтового шару – 5,8 тис. м<sup>3</sup>. В процесі

розробки родовища утворюються відходи виробництва у вигляді розкритих скальних порід та м'якої вскриші. Скальна вскриша представлена жорсткою та вивітрілими гранітами, її потужність досягає 37 м і складає в середньому 11,3 м. М'яка вскриша представлена ґрунтово-рослинним шаром і суглинками, потужність її досягає 12 м і становить в середньому 3,7 м.

На підприємстві є відвал скальної вскриші кар'єра №2 з максимальною висотою відсипки 35 м (сумарна висота відсипки двох ярусів) та відвал скальної вскриші кар'єра №3 з максимальною висотою відсипки 35 м (один ярус). Також є відвал м'якої вскриші з максимальною висотою відсипки 10,2 м, згідно з робочим проектом на ведення відвальних робіт. Робочий кут відкосу відвала скальної вскриші дорівнює  $37^\circ$ , кут стійкого відкосу –  $30^\circ$ ; робочий кут відвалу м'якої вскриші –  $40^\circ$ , кут стійкого відкосу –  $36^\circ$ .

Джерелом обводненості кар'єра є ґрунтові води, атмосферні опади, які випадають на площу кар'єру, а також стікання з прилеглих до кар'єру площ. За 9 місяців 2014 року притік ґрунтових вод в кар'єр №2 склав 38,1 тис. м<sup>3</sup> (5,3 м<sup>3</sup>/год), в кар'єр №3 – 51,3 тис. м<sup>3</sup> (7,4 м<sup>3</sup>/год). При повному розвитку притік у кар'єр буде становити 806 м<sup>3</sup>/год згідно до проекту розробки. Механічний водовідлив організований за наступною схемою: на підшві кар'єра обладнують водозбірник (зумпф), який може переноситися у міру поглиблення кар'єра. Вода, що накопичилася у зумпфі кар'єру, відкачується насосами і водопроводом відводиться за межі кар'єру у ставок-відстійник технічної води або в балку Столову.

Для зниження потрапляння зливових та паводкових вод у кар'єри зі сторони водорозділу споруджені нагорні канали повного профілю з поперечним перетином 1,5 м. На водовідливні кар'єру №2 встановлено насос Д-630-90, ємністю зумпфа 120 м<sup>3</sup>; в кар'єрі №3 – насос Д-630-90, ємністю зумпфа 150 м<sup>3</sup>. Для скидання води використовується трубопровід діаметром 220 мм.

У зв'язку з тим, що з 2014 по 2021 роки кар'єр №2 є непрацюючим, відбулось його часткове затоплення. У випадку ведення закладних робіт щодо заповнення пустот кар'єру необхідно здійснити повне відкачування води.

Для заповнення відпрацьованих кар'єрних пустот потрібно оперувати їх утвореними обсягами ( $m^3$ ). Для цього на першому етапі використовується план гірничих робіт кар'єра та аналізується ситуація на момент їх зупинки (Рис. 2.3).

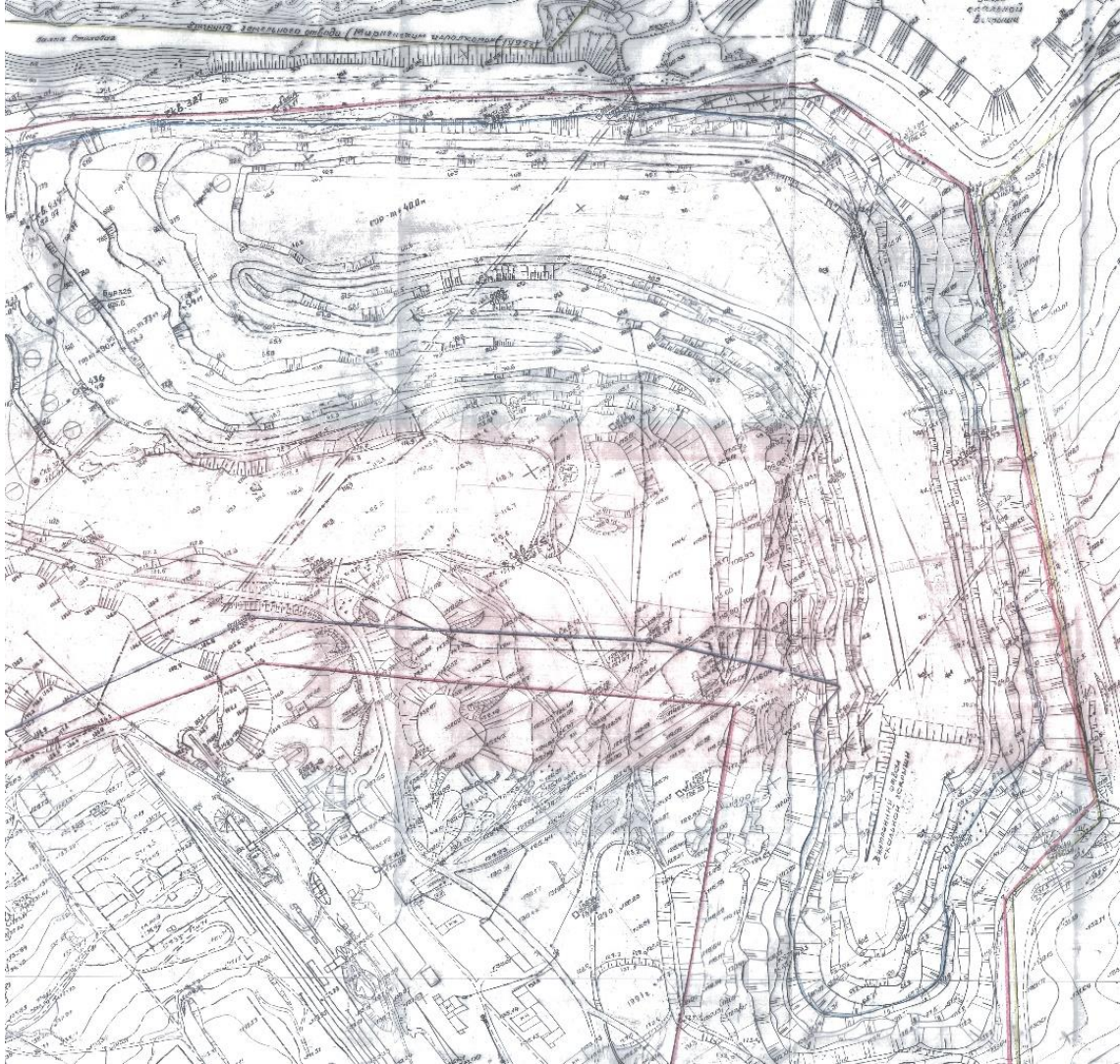


Рисунок 2.3 – Викопіювання з плану гірничих робіт  
Каранського родовища (кар'єр №2)

На другому етапі пропонується із застосуванням сучасних програмних пакетів, таких як Autocad та 3D MAX розробка 3D-моделі виробленого простору кар'єру. За допомогою масштабу плану гірничих робіт і географічних прив'язок встановлюється масштаб 3D-моделі. На Рисунку 2.3 вказуються висотні відмітки як елементів рельєфу місцевості, так і видобувних та неробочих уступів, що дозволяє максимально точно відтворити у вигляді комп'ютерної моделі утворений



вироблений простір кар'єру. Програмний комплекс дозволяє розрахувати як загальні обсяги виробленого простору для закладання металургійними шлаками, так і обсяги щодо конкретних частин кар'єру, наприклад між горизонтами. Визначення таких параметрів як насипна щільність закладного матеріалу, коефіцієнт ущільнення та об'єми виробленого простору дозволить обґрунтувати необхідну кількість металургійних шлаків для закладання.

## **2.2. Характеристика металургійних шлаків**

### **як закладного матеріалу техногенних пустот**

Для заповнення кар'єрних пустот закладним матеріалом пропонується використання металургійних шлаків, які не відносяться до небезпечних матеріалів [2, 3]. 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 порівняно безпечними для довкілля.

Так, згідно Національного класифікатора «Єдиний закупівельний словник» ДК 021:2015, шлаки чорної металургії є продукцією та товаром (код СРВ: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) [4], будівництва доріг (ДСТУ Б В.2.7-35-95; ДСТУ 9043:2020) [5, 6], виробництва будівельних матеріалів, таких як цементи, бетони, мінеральні вати тощо (ДСТУ Б В.2.7-302:2014; ДСТУ Б В.2.7-209:2009) [7, 8]. 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 докільця, неодноразово доводилась дослідженнями вітчизняних і закордонних вчених.

Деякі металургійні комбінати для розширення сфери використання власних металургійних шлаків з метою утилізації та покращення стану докільця розроблюють нормативну документацію у вигляді технічних умов (ТУ), які проходять етапи експертизи і затверджуються відповідними державними установами. Так, на ПрАТ «ММК ім. Ілліча» 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, за участі автора роботи, технічні умови ТУ У 08.1-00191158-002:2020 для використання металургійних шлаків як закладних сумішей для технічної рекультивації техногенно порушених земель (додаток Б). Всі вищезазначені документи, що регламентують використання металургійних шлаків, та, враховуючи їх віднесення до IV класу небезпечності відходів (малонебезпечні), свідчить про безпечність даних шлаків для докільця. 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 заповнення кар'єрних пустот Каранського кар'єру №2 розглядаються шлакові матеріали металургійного комбінату ПрАТ «ММК ім. Ілліча», що розташований у м. Маріуполь. ПрАТ «ММК ім. Ілліча» складається з наступних структурних підрозділів: аглофабрика, доменний цех, конвертерний цех, прокатне виробництво, цех переробки шлаків, трубоелектрозварювальний цех вапняно-обпалювальний цех та інші допоміжні підрозділи. ПрАТ «ММК ім. Ілліча» спеціалізується на виробництві агломерату, вапна, чавуну та чавунних виробів, сталевих злитків, катаної та литої заготовки, високоякісного сталевих листа. Основною продукцією комбінату є плоский прокат з вуглецевих, низьколегованих і легованих сталей різного призначення.

Шлаки підприємств чорної металургії утворюються як побічна продукція від виробництва чавуну та сталі. Шлаки випускаються із металургійних печей у

розплавленому вигляді, а після обробки приймають стійку кристалічну або скловидну форму. Доменні шлаки переробляються у гранульований доменний шлак (граншлак) або шлаковий щебінь. Сталеплавильні шлаки після охолодження та кристалізації, зазвичай, проходять частковий рециклінг. У металургійний цикл повертається відсепарований металевий скрап та частина шлакового щебню в якості замітника флюсуєчих матеріалів.

Цех переробки шлаків комбінату ім. Ілліча виробляє гранульований шлак на гідрожолобних установках та шлаковий щебінь на дробарно-сортувальній установці з ковшових залишків фракцій 0 – 40 та 0 – 70 мм для потреб дорожнього й громадського будівництва. Також на комбінаті функціонують дві установки АМКОН для магнітної сепарації сталеплавильних шлаків і промислових відходів. Найбільший об'єм займають шлаки доменні (до 75% річного об'єму) і шлаки сталеплавильні, перероблені на установках цеху переробки шлаків і відходів виробництва АМКОН-1 та АМКОН-2 (до 15% річного об'єму) [9]. Найбільші запаси шлакових матеріалів сконцентровано у відвалі балки Грековата, що наведена на Рисунку 2.4.



Рисунок 2.4 – Шлаковий відвал ПрАТ «ММК ім. Ілліча»  
(балка Грековата)

Окрім цього на комбінаті має місце значний обсяг нереалізованих шлакових матеріалів з технічних та економічних причин – доменний гранульований шлак, доменний відвальний шлак та сталеплавильний шлак. За результатом аналізу технологічного процесу переробки, обсягів накопичення шлакових матеріалів та дійсних обсягів їх комерційної реалізації виявлено питому вагу нереалізованих шлаків при щорічному утворенні відходів шлаків 2,0 млн т, що наведено у Таблиці 2.3. Слід зазначити, що у щорічному балансі утворення металургійних шлаків може бути присутній доменний гранульований шлак в обсязі до 10%, який не був реалізований як продукція.

Таблиця 2.3 – Щорічні обсяги нереалізованих шлакових матеріалів ПрАТ «ММК ім. Ілліча»

Тип шлакового матеріалу	Питома вага, %	Кількість, млн т
Шлак доменний відвальний (фр. 0 – 400 мм)	70	1,4
Шлак сталеплавильний (фр. 0 – 250 мм)	30	0,6

Був проведений аналіз паспортів відвантаження споживачам зазначених шлакових матеріалів за даними цеху переробки шлаків на ПрАТ «ММК ім. Ілліча» щодо їх фізичних та хімічних властивостей.

Доменний гранульований шлак утворюється при швидкому охолодженні водою, повітрям або комбінованим способом вогнево-рідкого розплаву шлаків. Гранульований шлак представлений фракцією 0 – 10 мм. Цей різновид шлаку має насипну вагу 1,18 – 1,25 т/м<sup>3</sup>. Коефіцієнт якості складає 1,2 – 1,3. Модуль крупності – 3,0 – 3,3. Майже 80% гранульованого шлаку знаходиться у склоподібному стані. Хімічний склад та гранулометричний склади наведено у Таблицях 2.4 та 2.5. Доменний відвальний шлак утворюється при повільному охолодженні на повітрі вогнево-рідких шлаків, які набувають пінистої або осередчастої структури. Цей різновид шлаків має насипну вагу 1,27 – 1,33 т/м<sup>3</sup>. Шлак здебільшого складається з крупних фракцій (100 – 400 мм) та крупної щебено-піщаної суміші (0 – 70 мм).

Таблиця 2.4 – Хімічний склад доменного гранульованого шлаку

CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	FeO	TiO <sub>2</sub>	CaO
44,70	39,30	0,18	8,41	6,78	0,79	0,46	0,08	44,70

Таблиця 2.5 – Гранулометричний склад доменного гранульованого шлаку

20 – 10	10 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1,25	1,25 – 0,63	0,63 – 0,315	0,315 – 0,14	< 0,14
2,75	8,0	14,5	17,0	36,0	23	5,0	4,5

Хімічний та гранулометричний склади наведено у Таблицях 2.6 та 2.7.

Таблиця 2.6 – Хімічний склад доменного відвального шлаку фракції 0 – 70 мм

CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	FeO	TiO <sub>2</sub>
44,7	38,3	0,23	6,67	6,65	0,83	2,33	1,71

Таблиця 2.7 – Гранулометричний склад доменного відвального шлаку

400 – 120	120 – 70	70 – 40	40 – 25	25 – 20	20 – 15	15 – 10	10 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1,25	< 1,25
54,73	11,16	13,79	0,83	2,63	0,3	2,72	2,37	0,42	0,99	2,61

Сталеплавильний шлак утворюється під час конверсії гарячого металу з доменної печі в основний кисневий конвертер. Розплавлений шлак наливають у ями або ґрунтові відсіки, де він охолоджується повітрям у контрольованих умовах, утворюючи кристалічну речовину. Шлак представлений щебенево-піщаною сумішшю (0 – 70 мм), питома вага якої 60%, та крупними фракціями (70 – 250 мм), що становлять 40%. Шлак має насипну вагу 1,6 – 1,85 т/м<sup>3</sup>. Щільність зерен сталеплавильних і чавуноливарних шлаків знаходиться в межах 2600 – 2900 кг/м<sup>3</sup>. Міцність шлаків на стиск – 80 – 120 МПа. Хімічний та гранулометричний склади наведено у Таблицях 2.8 та 2.9.

Таблиця 2.8 – Хімічний склад сталеплавильного шлаку

CaO	SiO <sub>2</sub>	MnO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	FeO
36,84	14,04	2,57	5,27	2,45	0,134	23,55

Таблиця 2.9 – Гранулометричний склад сталеплавильного шлаку

> 250	250 – 120	120 – 70	70 – 40	40 – 25	25 – 20	20 – 15	15 – 10	10 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1,25	< 1,25
5,65	20,2	14,0	2,61	0,64	3,59	8,55	13,45	26,83	1,53	3,85	2,61

Аналіз фізико-хімічних та фізичних властивостей шлакових матеріалів дозволив встановити низку особливостей:

– шлакові матеріали мають кристалічну структуру, є практично нерозчинними у воді, їх агрегатний стан – не змінюється;

– щільність часток зазначених шлакових матеріалів сягає 2,7 – 3,4 т/м<sup>3</sup>, а за міцністю шлакові матеріали фракцій 0 – 70 мм відносяться до марок М 800 – 1200, що дозволяє їм конкурувати з природними наповнювачами у будівельній галузі;

– за гранулометричним складом шлакові матеріали містять як крупні фракції 400 – 120 мм – 65% (доменні відвальні), 250 – 120 мм – більше 25%, так і дрібні фракції 120 – 0 мм – до 35% (доменні відвальні), 120 – 0 мм (сталеплавильні) та 10 – 0 мм – 95% (доменні гранульовані);

– за результатами державної санітарно-епідеміологічної експертизи як компоненти закладних сумішей металургійні шлаки ПрАТ «ММК ім. Ілліча» відповідають вимогам діючого санітарного законодавства України.

Враховуючи фізико-механічні властивості шлакових матеріалів ПрАТ «ММК ім. Ілліча» та досвід ведення закладних робіт на провідних рудних шахтах, можна розглядати можливість їх використання як закладного матеріалу для відпрацьованих кар'єрних пустот.

Для остаточного доведення безпечності використання доменних і 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 новий перспективний напрям утилізації значних обсягів шлаків.

### 2.3. Теоретичні особливості способу формування закладного масиву з металургійних шлаків у кар'єрних пустотах

Для заповнення кар'єрних пустот закладним матеріалом пропонується використання металургійних шлаків, які за класифікацією небезпечності відходів є найбільш безпечними (IV клас), а при безпосередньому контакті з компонентами навколишнього природного середовища не завдають критичної шкоди. Закладанню металургійними шлаками, які одночасно є і рекультиваційним матеріалом, підлягають техногенні пустоти закритих кар'єрів, що вичерпали свої промислові запаси. Для формування закладних масивів у гірничодобувній галузі є характерним принцип його шаруватості [10], адже виникає потреба за висотою формувати його різні фізико-механічні властивості.

Передбачається наступний спосіб зведення закладного масиву у кар'єрних пустотах, що схематично наведено на Рисунку 2.5. Після припинення видобувних робіт з днища кар'єру насосними водовідливними установками відкочується вода, що прибуває з водонасичених порід, після чого водовідливний комплекс демонтується. Далі за даними спостережень гідрогеологічної служби встановлюються основні точки прибуття підземних вод з масиву гірських порід та виконується їх тампонування спеціальними цементним розчинами.

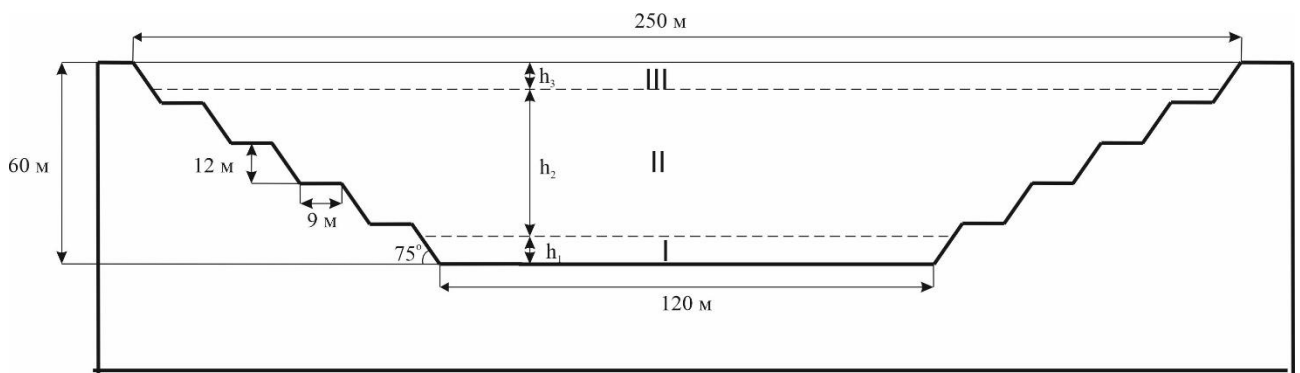


Рисунок 2.5 – Структура заповненого кар'єру закладним матеріалом після завершення рекультивації кар'єру: I – III – шари закладного масиву

Формування донного закладного шару кар'єру (Рис. 2.5, I) пропонується здійснювати зі сталеплавильних шлаків на висоту  $h_1$ , які характеризуються найбільшою міцністю й щільністю часток та найменшою пористістю, що

забезпечить стійкість при навантаженні на донний шар вище розміщених закладних шарів. Залежно від відстані та наявності транспортних розв'язок між металургійним комбінатом, що містить запаси закладного матеріалу, та закритим кар'єром, економічно обґрунтовується ефективний вид транспорту з доставки закладного матеріалу до місця укладання. Після доставки закладного матеріалу до кар'єру закладний матеріал розвантажується та розміщується у днищі кар'єру. За допомогою бульдозерів закладний матеріал розрівнюється по площині днища кар'єру та ущільнюється під вагою бульдозеру, що зменшує пористість масиву та його проникність стосовно атмосферних опадів. Для підвищення ефекту герметизації й зменшення коефіцієнту фільтрації сталеплавильні шлаки також можуть розміщуватись у комбінації із суглинками, які складовані разом з розкритими породами біля кар'єру.

Формування наступних закладних шарів (Рис. 2.5, II) здійснюється при комбінації доменних відвальних та сталеплавильних шлаків з певним пропорційним співвідношенням на висоту  $h_2$ . Гранулометричний та компонентний склади цих закладних шарів регламентуються обсягами утворення різних видів металургійних шлаків, що підлягають утилізації на металургійних комбінатах, та задовільними фізико-механічними властивостями закладного масиву (пористість, насипна щільність, зчеплення). Закладні матеріали переміщуються на пункті розвантаження і доставляються до виробленого простору у вигляді суміші.

Формування останнього закладного шару (Рис. 2.5, III) виконується на висоту  $h_3$  з комбінації доменних відвальних шлаків, доменних гранульованих шлаків і розкритих відвальних порід для створення підґрунтового шару та сприятливих умов для нанесення родючого шару.

Після завершення рекультиваційних заходів щодо земельної площі, порушеної гірничими роботами кар'єру, приймається рішення з наряду використання відновленої території. Основна вимога, що висувається до сформованого у кар'єрних порожнинах закладного масиву, – безпечність закладного матеріалу та відсутність критичних деформацій денної поверхні. Далі науково обґрунтовуються параметри закладання виробленого простору металургійними шлаками.



## 2.4. Методика дослідження продуктів взаємодії металургійних шлаків з водним середовищем при їх безпосередньому контакті

Розв'язання проблеми утилізації значних обсягів шлаків може бути досягнуто шляхом їх розміщення як закладних матеріалів у проєктах технічної рекультивації техногенно порушених земель. Для маріупольських металургійних комбінатів це можуть бути відпрацьовані гірничі виробки найближчих кар'єрів з видобутку природного каменю, вапняку або глини.

Звичайно, закладні матеріали з металургійних шлаків мають відповідати вимогам безпеки щодо впливу на навколишнє середовище та здоров'я людей. В проєктах технічної рекультивації гірничих виробок кар'єрів закладними матеріалами з металургійних шлаків, в якості підготовчого етапу, необхідно передбачати повне водовідведення та тампонування джерел прибування води. Але ймовірність контактування закладних шарів шлакових матеріалів із водою існує.

Таким чином завдання полягає у дослідженні потенційних наслідків контактування шлакових матеріалів з водою як закладного рекультиваційного матеріалу. Для вирішення цього завдання нами було розроблено відповідний алгоритм досліджень, який складається з 6 послідовних етапів (Рис. 2.6) [11].

*Етап 1.* Дослідження безпечності використання шлаків як заповнювачів техногенних пустот розпочинається з відбору проб металургійних (доменних та сталеплавильних шлаків) для проведення лабораторних досліджень. За визнаними фізико-хімічними методами або за фактичними даними лабораторних випробувань відвантаженої партії визначають характерний хімічний склад доменних і сталеплавильних шлаків:  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{TiO}_2$ , а також вміст сірки S. Далі за допомогою ситового аналізу визначається гранулометричний склад металургійних шлаків. Також встановлюється насипна вага та вологість матеріалу.

*Етап 2.* При закладанні металургійними шлаками днища кар'єру до нього можуть потрапляти підземні води, якщо рівень їх прибування вище рівня робочого горизонту кар'єру.

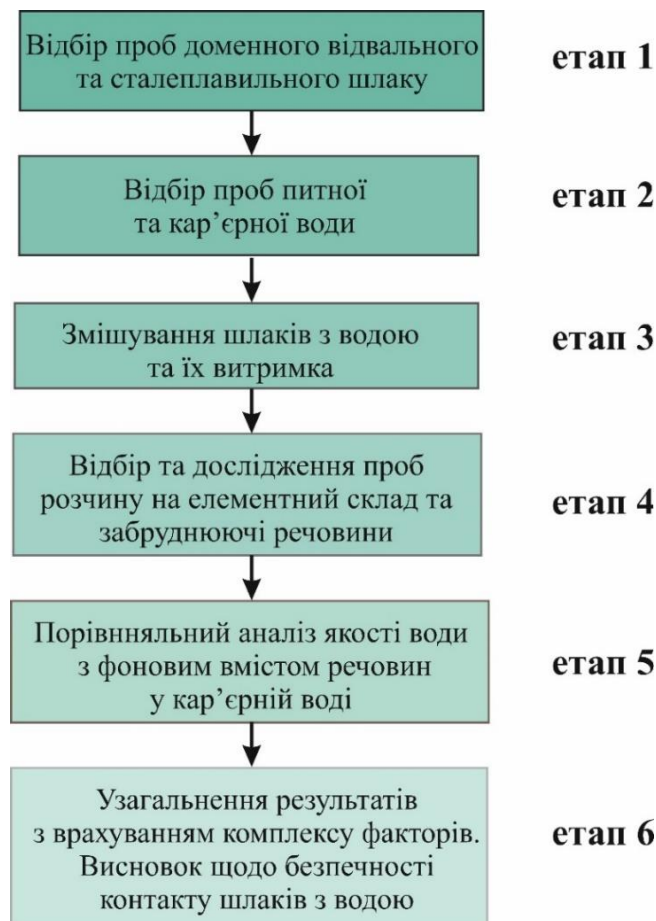


Рисунок 2.6 – Алгоритм дослідження наслідків контактування шлакових матеріалів з водою (для екстремальних випадків при виконанні проектів технічної рекультивації техногенно порушених земель)

Тому для експерименту необхідно відібрати та провести хімічний аналіз контрольних зразків кар'єрної води, що потенційно може контактувати із донним закладним шаром з металургійних шлаків. Зразки проб контрольної води аналізуються на вміст хімічних елементів та концентрації забруднюючих хімічних речовин (мг/дм<sup>3</sup>).

*Етап 3.* В лабораторних умовах виконується змішування металургійних шлаків з кар'єрною водою. Для проведення експерименту використовуються пластикові ємності об'ємом 6 л, на яких нанесена об'ємна розмітка через кожний літр (Рис. 2.7). В індивідуальні ємності (6 л) закладаються серії проб металургійних шлаків, які заливаються контрольною водою. Рекомендований обсяг контрольної води для заливання ємності в кожному експерименті – 3 л.



Рисунок 2.7 – Проби металургійних шлаків, що змішуються з контрольною водою для дослідження фізико-хімічних властивостей контактної води (після відповідної витримки)

Вага проби шлаку в ємності змінюється з кроком 1,5, 3,0 і 4,5 кг. Фіксується загальний об'єм суміші в ємності. Це дозволить дослідити зміни хімічного складу контактної води залежно від пропорційного співвідношення шлаку та води, що контактують. Запропоновані співвідношення характерні лише для екстремальних умов – у разі повного затоплення укладеного шару із шлаків на відмітках нижче рівня підземних вод. Навіть за умови виконання підготовчих робіт з водовідведення та тампонування місць перебування води у днищі кар'єру така ситуація може бути ймовірною.

Відбір проби контактної води на лабораторний аналіз із відповідних експериментальних єдностей здійснюється через: 1, 15 та 30 діб витримки. Експериментальну витримку рекомендується проводити в навколишньому середовищі (просто неба). При відборі проби контактної води на хімічний аналіз фіксуються також каламутність, осад та запах.

Для оцінки подальшого потенціалу виділення хімічних елементів із шлаків у воду проводиться вторинне змішування зразків шлаків з контрольною водою та їх витримка протягом того ж самого часу – 1, 15 та 30 діб. Після вторинної витримки відбирається проба контактної води для хімічного аналізу. За

результатами цих аналізів контактної води досліджується залежність концентрацій хімічних речовин від часу витримки. Результати експериментів пропонується заносити у форму, що наведена у Таблиці 2.10.

Таблиця 2.10 – Форма журналу результатів експериментальних досліджень контактної води на фізичні властивості

№ суміші	Склад суміші			Фізичні параметри					
	Шлак, кг	Вода, л	Об'єм суміші, л	Час втри- мки, днів	Об'єм поглинан- ня води шлаком, л	Об'єм проби води, л	Кала- мутність води (так/ні)	Осад (так/ні)	Запах (так/ні)
a									
b									

Примітка: a, b – первинна та вторинна витримка

*Етап 4.* Серії експериментів змішування проб металургійних шлаків із контрольною водою відбуваються протягом фіксованого часу (1, 15 та 30 діб). Після відповідної витримки з експериментальної ємності відбирається проба контактної води обсягом від 0,5 л. Здійснюють виявлення складу проби контактної води на хімічні елементи. Дослідження хімічного складу контрольної води та контактної води рекомендується здійснювати за допомогою атомно-емісійної спектрометрії з індуктивно зв'язаною плазмою [12]. Спектрометр iCap 7000 Duo з індуктивно зв'язаною плазмою дозволяє визначити масову долю 33-х хімічних елементів (Рис. 2.8). Для цілей досліджень контактної води пропонується вибрати основні елементи, які потенційно можуть зустрічатися у складі шлаків, наприклад: Al, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, P, Na, Pb, S, Sr, Zn, Si, Ag, As, Co, Ni. Перелік елементів може бути підібраний індивідуально для конкретних умов металургійного підприємства. Результати аналізу елементного складу контактної води та її загальної жорсткості пропонується зводити у форму, що наведена в Таблиці 2.11. Окрім проби (0,5 л) для визначення елементного складу контактної води з дослідної ємності також відбирається проба (від 2 л) для визначення хімічних властивостей контактної води та концентрації забруднюючих речовин.



Рисунок 2.8 – Спектрометр iCap 7000 Duo для дослідження хімічного складу контактної води

Таблиця 2.11 – Форма журналу результатів експериментальних досліджень контактної води на елементний склад

Розчин	Масова частка елементів, мг/дм <sup>3</sup>																		Жорсткість	
	Al	Ca	Cd	Cr	Cu	Fe	K	Mg	Mn	P	Na	Pb	S	Sr	Zn	Si	Ag	As		Co
а																				
б																				

Примітка: а, б – первинна та вторинна витримка шлаків в воді

За чинними методиками [13 – 19] визначається вміст наступних хімічних речовин у контактній воді: зважені речовини, сухий залишок, рН, хлориди, сульфіді, азот амонійний, фосфати, нітрати, нітрیتی, нафтопродукти, залізо загальне, кальцій, магній, сульфати тощо. Рекомендована форма зведення результатів досліджень наведена у Таблиці 2.12.

*Етап 5.* Після отримання експериментальних даних елементного складу та концентрації забруднюючих речовин у контактній воді із закладним матеріалом з металургійних шлаків виконується порівняння з відповідними аналізами фонових концентрацій у кар'єрній воді, тобто з аналізами контрольної води.

Таблиця 2.12 – Форма журналу результатів експериментальних досліджень контактної води на забруднюючі речовини

Розчин суміші №...	Концентрація забруднюючих речовин, мг/дм <sup>3</sup>											
	Зважені речовини	Сухий залишок	pH	Хлориди	Сульфіди	Азот амонійний	Фосфати	Нітрати	Нітри	Нафтопродукти	Залізо загальне	Сульфати
a												
b												

Примітка: a, b – первинна та вторинна витримка

Для прогнозування розвитку найбільш екстремальної ситуації, коли можлива взаємодія шлаків з кар'єрною водою, визначається загальний об'єм (м<sup>3</sup>) та інтенсивність (м<sup>3</sup>/ч) прибутих до пустот кар'єру підземних вод і атмосферних опадів до природного рівня водоносного горизонту (м). Далі визначається загальний об'єм (м<sup>3</sup>) та інтенсивність (м<sup>3</sup>/ч) формування закладного масиву з металургійних шлаків. Після чого у програмі EXCEL шляхом функції прогнозу експериментальних даних, згідно встановленого математичного закону, визначаються концентрації хімічних елементів та забруднюючих речовин у при відповідній пропорції шлаків і води.

Для зниження коефіцієнту фільтрації донного шару закладного матеріалу з металургійних шлаків рекомендується передбачати його ущільнення при виконанні рекультиваційних робіт.

*Етап 6.* Після порівняльного аналізу формулюється загальний висновок щодо безпечності використання металургійних шлаків як закладного матеріалу кар'єрних відпрацьованих пустот. Для остаточного висновку щодо безпечності використання шлаків як закладних матеріалів слід врахувати фактори:

– наявність або відсутність у регіоні інтенсивного водозабору поблизу кар'єру, де планується технічна рекультивація з використанням металургійних шлаків як закладних матеріалів;

- характеристику порід днища кар'єру, їх фільтраційні властивості та відмітки горизонту підземних вод;
- здатність закладного матеріалу до ущільнення під впливом механічного навантаження технікою та з тиском верхніх закладних шарів;
- коефіцієнт фільтрації закладного матеріалу;
- схильність закладного матеріалу до саморозпаду та здатність утворювати нові кристалічні решітки, що сприятиме зміцненню закладного масиву.

Моніторинг можливого впливу закладного масиву з кар'єрними водами впроваджується шляхом буріння спостережних свердловині з періодичним аналізом проб води з цих свердловин. Розроблена методика може бути корисна для дослідження безпечності використання металургійних шлаків як закладних матеріалів у проєктах технічної рекультивації порушених земель при різних гідрогеологічних умовах.

Також у процесі закладення бульдозерами шарів металургійних шлаків після формування донного герметичного шару (Рис. 2.5) доменні відвальні та гранульовані шлаки при дії атмосферних опадів можуть проявляти слабкі в'язучі властивості й процес гідратації протікатиме при контакті з водою. Це пояснюється схожістю мінерального та хімічного складів доменних шлаків з цементами. Внаслідок гідратації утворюються нові кристалічні сполуки між частками шлаків – гідросилікати кальцію – які у подальшому цементуються, а цей ефект називають «злежуваністю». Подібні явища спостерігаються та характерні для старих відвалів металургійних шлаків, які сформовано багато років назад, де шлаки зцементовані і втрачена їх сипучість.

## **2.5. Методика дослідження фізико-механічних властивостей та параметрів закладного масиву з металургійних шлаків**

### **2.5.1. Дослідження проникності атмосферних опадів крізь донний шар закладного масиву**

Донний закладний шар, що укладається протягом певного терміну і завдяки визначеному обсягу, повинен забезпечувати відсутність появи фільтрату

від впливу атмосферних опадів, який може виділятися крізь закладний масив у днище кар'єру. Встановлення факту появи інфільтрату у днищі кар'єру та ступеню його проникності в закладний масив з металургійних шлаків має ґрунтуватись, перш за все, на визначенні кількості атмосферних опадів, що характерні для кліматичних умов розташування кар'єру протягом тривалого часу, та на визначенні обсягу закладного матеріалу й величини пустотності (ступеню ущільнення) закладного масиву. Більш раціональним для формування донного шару є сталеплавильний шлак, що характеризується кращими фізико-механічними властивостями у порівнянні з доменними, проте потрібно дослідити продукти їх взаємодії з кар'єрною водою.

Наукове завдання цього етапу досліджень полягає у встановленні ступеня проникності атмосферних опадів у закладний масив певної потужності, формування якої обумовлено встановленим добовим раціональним обсягом доставки закладного матеріалу зі сталеплавильних шлаків (згідно Рис. 2.5), і 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 Рисунку 2.9.

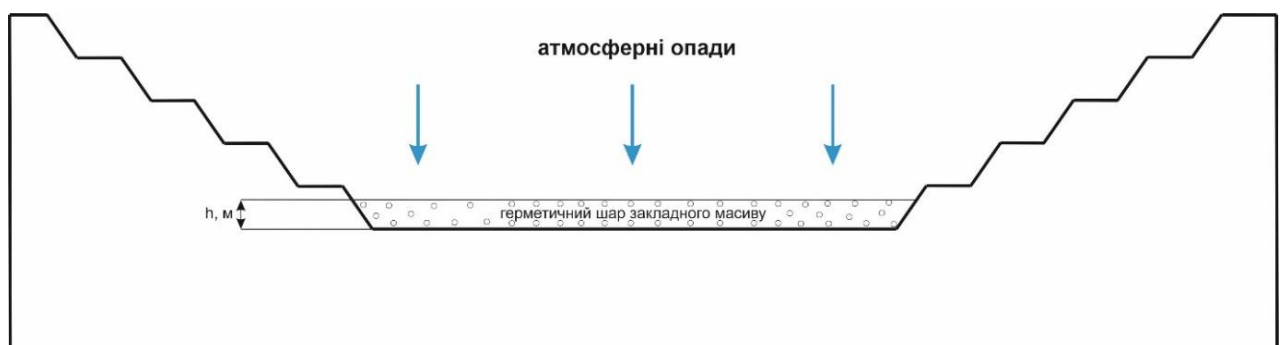


Рисунок 2.9 – Формування герметичного шару закладного масиву у днищі кар'єру під впливом атмосферних опадів

Визначення обсягу атмосферних опадів пропонується здійснювати, ґрунтуючись на статистичних даних щодо погодних умов на території України. З використанням даних Українського гідрометеорологічного центру з'являється



можливість визначити стійку та середньозважену кількість атмосферних опадів і похмурих дощових днів за місяць протягом 120-річного періоду (з 1899 по 2019 рр.).

Визначимо вірогідні величини атмосферних опадів, що можуть покривати площу закладного донного шару Каранського кар'єру №2. Найближче розташованим до кар'єру крупним центром, де є метеорологічна станція з масивом значних статистичних даних, є м. Волноваха [20]. Кількість сонячних і похмурих днів з опадами, середня мінімальна та максимальна кількість опадів (мм) у м. Маріуполь, за даними Українського гідрометеорологічного центру, наведено на Рисунку 2.10. Після цього аналітично визначається максимально можлива кількість атмосферних опадів, що покриває закладний масив.

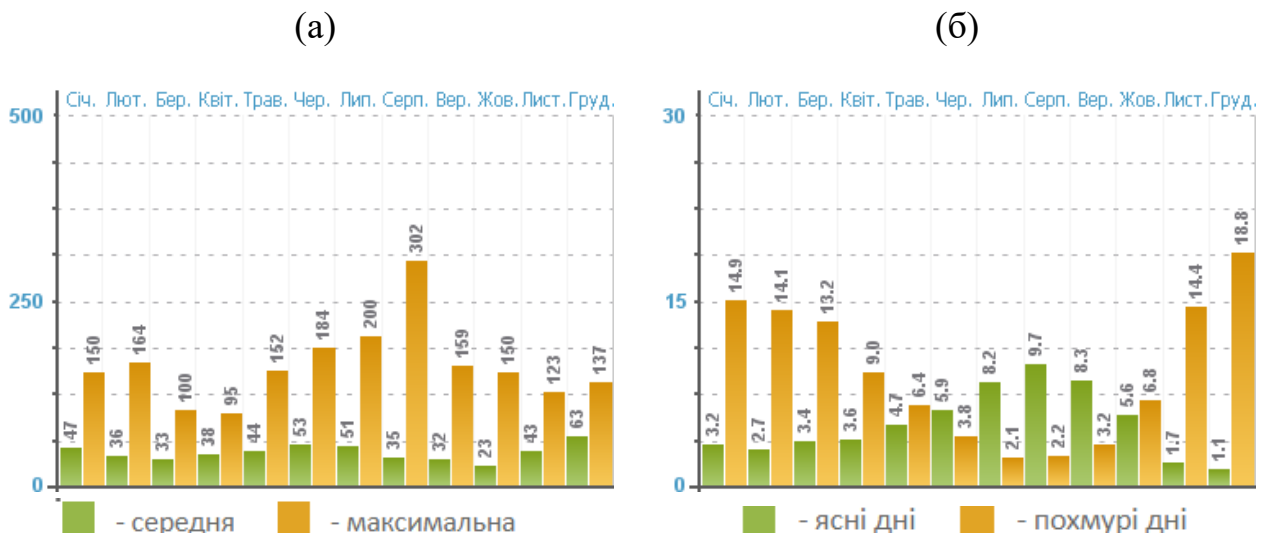


Рисунок 2.10 – Дані щодо середньої та максимальної кількості опадів, мм (а) та кількості сонячних і похмурих днів з опадами (б) з 1899 по 2020 роки

Аналіз Рисунка 2.10а показує, що найменше середнє арифметичне значення опадів спостерігається вкінці літа – на початку осені і складає 32 – 35 мм/міс, тому доцільніше закладні роботи починати саме в цей період. Згідно Рисунка 2.10, вкінці літа – на початку осені спостерігається найменша середня кількість дощових днів – 2,2 – 3,3. Узагальнюючи дані Рисунка 2.10, встановлено, що у серпні – вересні в середньому спостерігається 2 дощових дня, при середніх 30 мм опадів, при цьому один дощ падає раз в 15 днів з кількістю опадів 15 мм.

Таким чином встановлюються важливий параметр процесу досліджень проникності води – термін часу до початку дощового дня, який складає 15 днів. В подальших дослідженнях проникності атмосферних опадів в закладний масив необхідно приймати потужність закладного шару, що буде сформований за 15 днів у днище кар’єру.

Вирішення задачі ступеня проникності води в закладний масив є можливим шляхом виконання лабораторних досліджень на основі фізичного моделювання процесу проникнення води від атмосферних опадів крізь донний шар закладного матеріалу з металургійних шлаків. Для цього необхідно врахувати критерії подібності природи та моделі.

На підставі загальних положень теорії подібності, процеси руйнування масивів сипучого середовища описуються наступною системою критеріїв [21 – 23]:

$$\begin{cases} c_M = \alpha_l^{-1} \cdot \alpha_\gamma^{-1} \cdot c_N, \\ \tan \varphi_M = \tan \varphi_N, \end{cases} \quad (2.1)$$

де  $\alpha_l^{-1}$  – лінійний масштаб моделі;

$\alpha_\gamma^{-1}$  – відношення щільності матеріалу природи та моделі;

$c_M$  – зчеплення в моделі;

$c_N$  – зчеплення в природі;

$\tan \varphi_N$  і  $\tan \varphi_M$  – коефіцієнти кута внутрішнього тертя природи та моделі відповідно.

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 природних умовах сила зчеплення у металургійних шлаків майже відсутня ( $c_N \approx 0$ ), 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  $c_N \approx 0$ , то для того, щоб зберіглося значення у моделі потрібно виключити частки фракційного складу менше 1 мм [24]. 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 проведення фізичного моделювання закладного масиву у спеціальному резервуарі зменшуємо розмір закладного матеріалу у масштабі 1:15 до натурних умов, після чого укладаємо шар сталеплавильних шлаків. Підбір фракційного складу для моделі здійснюється у пропорційному їй зменшенні (у розмірі 1:15) до натурних умов з урахуванням критеріїв подібності (Табл. 2.13).

Таблиця 2.13 – 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 закладного шару, мм (1:15)	> 17,0	17,0 – 8,0	8,0 – 4,0	4,0 – 0,7	–

Імітація натурних умов можлива за рахунок розміщення шару металургійних шлаків у спеціальному посуді зменшеного об'єму розмірами 21,5×29,5×22,0 см з наступним додаванням певної кількості води по площі закладного шару (Рис. 2.11). Резервуар формується з мірною лінійкою.

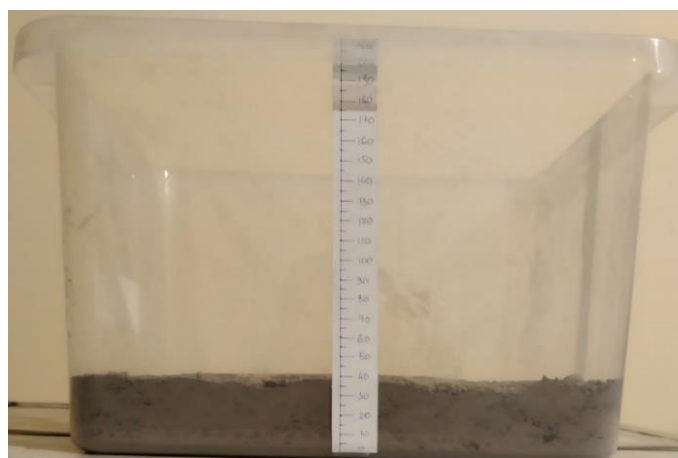


Рисунок 2.11 – Лабораторний резервуар для фізичного моделювання проникності атмосферних опадів крізь донний шар закладного масиву

Першочерговим етапом створення фізичної моделі є підготовка закладного матеріалу зі сталеплавильного шлаку для визначення його гранулометричного складу згідно Таблиці 2.13 шляхом усунення вологості у сушильній шафі типу СНОЛ-25 та зважування електронними лабораторними вагами AXIS потрібної кількості для експерименту (Рис. 2.12).

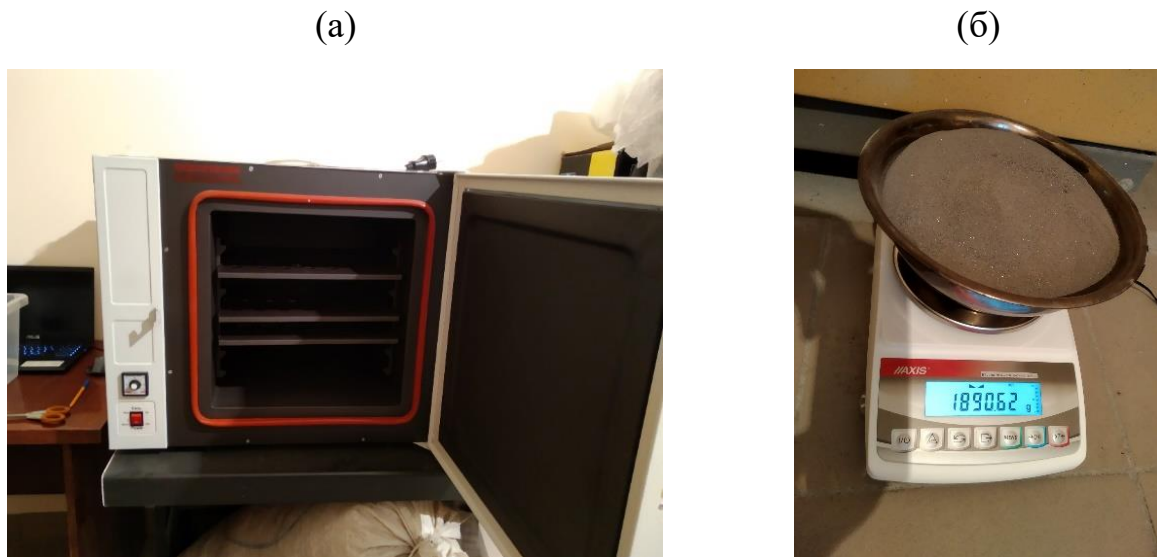


Рисунок 2.12 – Сушильна шафа СНОЛ 25 (а) та електронні лабораторні ваги AXIS зі зважувальною ємністю (б)

Для безпосереднього створення фізичної моделі закладного шару використовується ситовий аналіз. Застосовуються сита розмірами від  $-20,0$  до  $0,1$  мм (Рис. 2.13). Здійснюється розсіювання сталеплавильного шлаку згідно встановленим фракціям фізичної моделі (Табл. 2.13), після чого фракції перемішуються для приготування готової донної закладної суміші і укладаються в резервуар для імітації заповнення днища кар'єру.

Враховуючи значення кількості атмосферних опадів в регіоні на рівні  $15$  мм, що дорівнює  $15$  л/м<sup>2</sup>, і площу лабораторного резервуару  $S = 0,063$  м<sup>2</sup>, то на фізичну модель з урахуванням геометричної подібності  $1:15$  будуть впливати зімітовані атмосферні опади об'ємом  $0,07$  л. Приймаємо  $0,1$  л для запасу, на випадок можливого впливу більш інтенсивних дощів у регіоні.

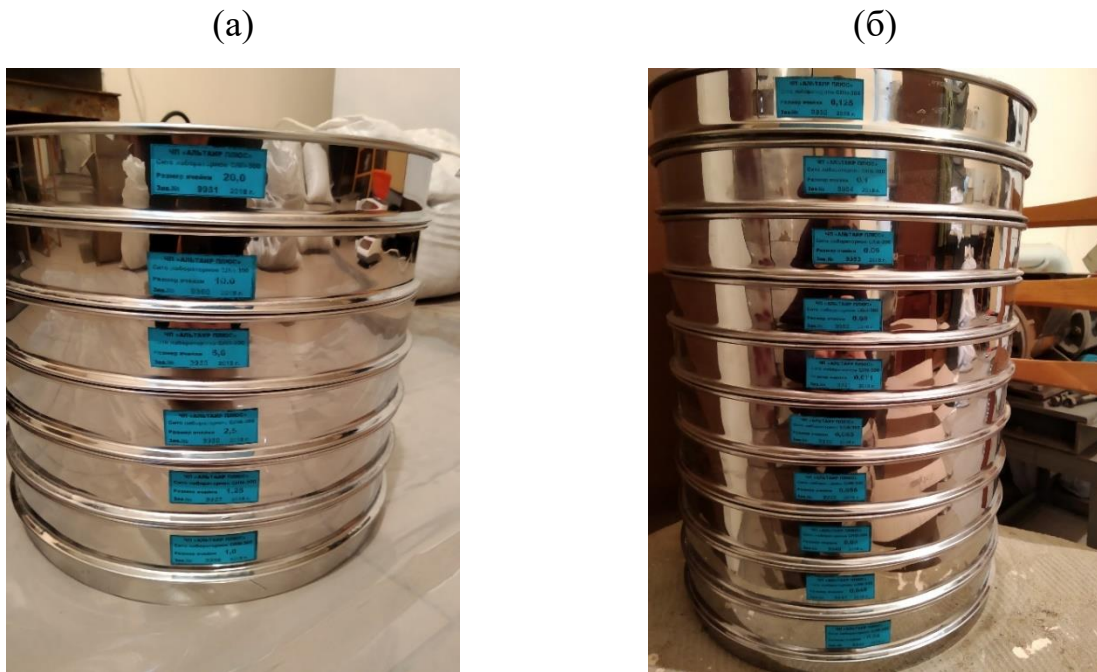


Рисунок 2.13 – Комплекс сит для дослідження гранулометричного складу закладного матеріалу ( $-20,0 \dots -1,0$  мм)

Для відтворення у фізичній моделі закладного масиву фільтраційно-гідродинамічних параметрів відповідно до натури допускається підбір матеріалу моделі, представленого породами натури, не за величиною коефіцієнта фільтрації, а за величиною коефіцієнта пористості. Для сипких матеріалів, на відміну від гірських порід, пористість матеріалу може бути замінена на пустотність, яка характеризує величину водопроникності матеріалу. Матеріал моделі повинен мати приблизно таку ж пористість, що і закладний матеріал натури, що відтворюється [25]. При фізичному моделюванні зберігається аналогія пустотності матеріалу натури та моделі (Табл. 2.14).

Таблиця 2.14 – Відповідність пустотності матеріалу натури та моделі

Параметр	Натура	Модель
Матеріал	Сталеплавильний шлак 0...250 мм	Сталеплавильний шлак 0...17 мм
Насипна щільність, т/м <sup>3</sup>	1,7	1,7
Щільність зерен сталеплавильного шлаку, т/м <sup>3</sup>	2,65	2,65
Пустотність, %	35,8	35,5

У фізичному моделюванні фактор часу є константою, адже виконано геометричну і матеріальну подібність природи та моделі, тоді  $t_n = t_m = \text{const}$ .

Для покращення деформаційних властивостей і зменшення водопроникності закладного масиву, особливо донного шару, передбачається його ущільнення механічним способом. Підвищення щільності закладного масиву з металургійних шлаків може бути ефективно досягнуто застосуванням бульдозерів. В дослідженні розглядаються бульдозери фірми «ЧЕТРА». Широкий типовий ряд обладнання показує, що їх експлуатаційна вага коливається від 16 до 70 т. В лабораторних дослідженнях імітується вплив ваги бульдозера шляхом прикладання навантаження на площу поверхні, еквівалентно натурному. Враховуючи технічні характеристики бульдозерів та масштаб прийнятої фізичної моделі (1:15), обґрунтовано величину прикладеного навантаження на поверхню закладного масиву (634 см<sup>2</sup>), що наведено у Таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 – Обґрунтування прикладення навантаження на модель закладного масиву залежно від типу бульдозеру

Параметр / тип бульдозеру	ЧЕТРА Т15	ЧЕТРА Т20	ЧЕТРА Т25
Експлуатаційна вага, т	30	35	50
Тиск на ґрунт, Мпа	0,054	0,067	0,079
Прикладене навантаження на модель, кг (1:15)	20	25	30

Величина проникності води крізь закладний масив досліджувалась без навантаження та з величиною прикладеного навантаження 20, 25 і 30 кг. По площі лабораторного резервуару 21,5×29,5 см на закладний масив подавалась вода об'ємом 0,1 л і прикладалось відповідне навантаження. Після кожного затворення певним обсягом води ємність резервуару заповнювалась новим обсягом сталеплавильного шлаку того ж самого гранулометричного складу моделі. Величина проникності води визначалась шляхом вирізання певного об'єму закладного масиву з подальшим вимірюванням глибини проникності у розрізі. Визначено, що через 10 днів потужність закладного шару складе 1,5 м в натурі, що еквівалентно 10 см в моделі.

Поверхня ущільненого сталеплавильного шлаку в заповненому резервуарі поливається водою пропорційно по площі, при цьому експериментально вимірюється глибина проникнення води через термін 1 доба. Глибина проникнення визначається шляхом вирізання ділянки закладного масиву, насиченого водою, та вимірюванням лінійкою потужності частини закладного шару, насиченого водою. Дані досліджень зводяться у журнал (Табл. 2.16).

Таблиця 2.16 – Журнал даних фізичного моделювання проникнення води крізь герметичний шар закладного масиву

Потужність шару, см	Водонасичена область закладного масиву за його потужністю, %			
	Без ущільнення	Ущільнення прикладеним навантаженням		
		20 кг (0,054 Мпа)	25 кг (0,067 Мпа)	30 кг (0,079 Мпа)

Далі аналізуються дані лабораторних досліджень (Табл. 2.16) для обґрунтування потужності закладного донного шару зі сталеплавильних шлаків, а саме, – раціональні значення прикладеного навантаження, потужності шарів 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.

### **2.5.2. Дослідження фізико-механічних та деформаційних властивостей закладного масиву**

При проєктуванні закладних робіт із заповнення кар'єрної пустоти закладним матеріалом з металургійних шлаків необхідно враховувати динаміку можливих осадкових явищ. 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 [26]. Враховуючи ущільнення закладного масиву бульдозерним способом, суттєві деформації поверхні закладного масиву маловірогідні, але можливі. Тому підхід до формування закладного масиву повинен бути науково обґрунтованим на відміну від існуючого звичайного відсипання техногенних відходів.

Для формування стійкого закладного масиву кар’єрних пустот з металургійних шлаків важливим науково-технічним завданням є дослідження таких важливих фізико-механічних характеристик як насипна щільність, пустотність та коефіцієнт ущільнення закладного масиву, які пов’язані між собою фізичним змістом.

Насипна щільність щебню або сумішей визначається згідно з [27, 28]; дрібних заповнювачів у складі сумішей – згідно з [29]. У нашому випадку щебнем або сумішшю є закладний матеріал із суміші металургійних шлаків. Насипна щільність показує вагу зерен сипучого матеріалу з урахуванням пор і пустот в природному стані без його ущільнення і залежить від форми зерен та гранулометричного складу матеріалу.

Насипна щільність закладного матеріалу  $\gamma_n$  (кг/м<sup>3</sup>) визначається за наступною формулою:

$$\gamma_n = \frac{m_1 - m}{V}, \text{ кг/м}^3, \quad (2.2)$$

де  $m$  – маса ємності, кг;

$m_1$  – маса вільно насипаного закладного матеріалу, кг;

$V$  – об’єм ємності, м<sup>3</sup>.

Пустотність закладного матеріалу визначається також за методикою, викладеною у [27 – 29]. Цей параметр показує наявність пустот між зернами



сипучого матеріалу і визначається розрахунковим шляхом на підставі попередньо встановлених значень середньої щільності зерен і насипної щільності. Пустотність закладного матеріалу  $V_{n.з.}$  визначають за формулою:

$$V_n = \left( 1 - \frac{\gamma_n}{\gamma_k \cdot 1000} \right) \cdot 100, \% \quad (2.3)$$

де  $\gamma_n$  – насипна щільність, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_з$  – середня щільність зерен закладного матеріалу, кг/см<sup>3</sup>.

Пустотність закладного матеріалу з металургійних шлаків можна визначити в ущільненому стані, увівши у формулу насипну щільність в ущільненому стані. Величина пустотності закладного масиву впливає на його деформаційні характеристики при прикладенні навантаження. Тому ставиться завдання дослідження усадки закладного масиву з металургійних шлаків. Складність натурального моделювання полягає у тому, що натурний закладний матеріал з доменних шлаків має фракції в широкому діапазоні: сталеплавильних – 0 – 250 мм, доменних відвальних шлаків – 0 – 400 мм. Крупні фракції при дослідженні навантаження складно відтворити, тому використано фізичне моделювання закладного матеріалу з дотриманням геометричної та матеріальної подібностей. Обрано масштаб 1:5 природи до моделі, величина навантаження також масштабувалась відповідно до прийнятого значення. Гранулометричний склад закладних матеріалів масштабувався відповідно до натурних значень гранулометричного складу доменних відвальних і сталеплавильних шлаків, що наведено у Таблицях 2.7 та 2.9.

Дослідження усадки закладних матеріалів проводили на лабораторному пресі КС-200 (Італія), що є в наявності кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки НТУ «Дніпровська політехніка» (Рис. 2.14). Була виготовлена циліндрична металічна ємність довжиною 24 см, діаметром 16 см і площею 256 см<sup>2</sup>. Для прикладення навантаження від плити пресу виготовлено металеву пластину діаметром 15,7 см для її розташування на поверхні засипаного матеріалу й передачі навантаження за допомогою різних металевих деталей.

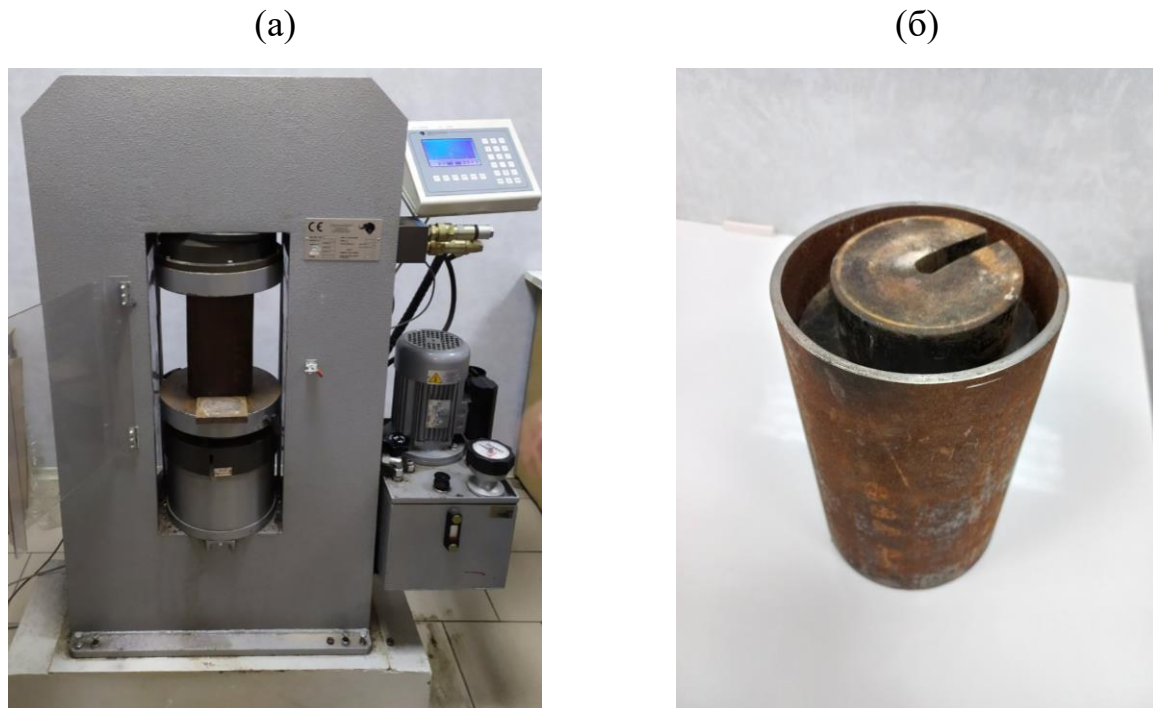


Рисунок 2.14 – Лабораторний прес КС-200 (а) та виготовлена ємність (б) для дослідження усадки закладного масиву

На поверхню закладних матеріалів впливало навантаження в межах 0 – 15 кН, діапазон якого охоплює як імітацію навантаження ущільненням бульдозеру, так і вплив різних промислових або цивільних об'єктів, що можуть бути розташовані над закладним масивом після завершення рекультивації.

Після прикладення різного кроку навантаження вимірювалась величина усадки закладного масиву, яка характеризує коефіцієнт його ущільнення, що може бути визначений за формулою:

$$k_y = \frac{h_1}{h_2}, \quad (2.4)$$

де  $k_y$  – коефіцієнт ущільнення закладного матеріалу;

$h_1$  – висота вільно насипаного закладного масиву після навантаження, мм;

$h_2$  – висота вільно насипаного закладного масиву перед навантаженням, мм.

У зв'язку з різними фізико-механічними властивостями та гранулометричним складом сталеплавильного й доменного відвального шлаку, та, враховуючи обсяги утворення різних видів металургійних шлаків, що

підлягають утилізації (продукт, що не реалізується) на металургійних комбінатах, пропонується дослідити, окрім доменного відвального шлаку, що є компонентом основної заповнювальної закладної суміші, двокомпонентну закладну суміш із співвідношенням доменного до сталеплавильного шлаку 70:30, що дозволить покращити властивості закладного масиву. 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, насипна щільність ( $\text{кг/м}^3$ ), пустотність (%), 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 Таблиці 2.17. Наступним етапом є проведення аналізу цих експериментальних даних та встановлення закономірностей зміни пустотності й коефіцієнту ущільнення від компонентного складу закладної суміші та величини прикладеного навантаження.

Таблиця 2.17 – Журнал експериментальних даних  
з визначення фізичних властивостей закладного матеріалу

Закладний матеріал/ закладна суміш	Прикладене навантаження до закладного шару, МПа	Насипна щільність, $\text{кг/м}^3$	Пустотність, %	Коефіцієнт ущільнення

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

## 2.6. Чисельне моделювання прогнозу деформацій закладного масиву кар'єрних пустот

Для дослідження напружено-деформованого стану природних і штучних масивів у гірничій науці широке розповсюдження отримав метод чисельного моделювання скінченними елементами [30 – 33]. Шляхом виконання чисельного моделювання встановлюються напруження та деформації масиву гірських порід

навколо підземних гірничих виробок і бортів кар'єрів та укосів відвалів порід, прогнозується їх коефіцієнт стійкості [34].

Для опису геомеханічних процесів у масиві укосу застосовують різні критерії міцності, однак всі вони використовують різні набори вихідних даних і фізико-механічних характеристик. Критерії Кулона-Мора і 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 [35]. Для сипучого закладного матеріалу найважливішими фізико-механічними властивостями є кут внутрішнього тертя та зчеплення, а наявний програмний пакет SolidWorks або Ansys для проведення чисельного моделювання методом скінченних елементів у 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 передують розробка розрахункової схеми досліджень деформаційних процесів у сформованому закладному масиві на завершальному етапі технічної рекультивації (Рис. 2.15), а загальний вигляд моделі у програмі SolidWorks 2016 наведено на Рисунку 2.16. У моделі враховується вплив гравітаційних сил, що сприяє осіданню закладного масиву під власною вагою. Після відновлення родючого шару на земельній площі заповненого закладним матеріалом кар'єру з часом можуть бути побудовані, за спеціальними проектами, об'єкти різної інфраструктури, які будуть чинити навантаження на закладний масив.

На поверхню моделі заповненого кар'єру моделюється прикладення з різним кроком навантаження – 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 та 1,0 МПа. Знизу модель жорстко зафіксована, а по боках моделі діє горизонтальна компонента тиску з урахування коефіцієнту бічного розпору. В кожний закладний шар вводяться вихідні дані фізико-механічних властивостей закладних шарів з металургійних шлаків, які визначаються лабораторно або у лабораторії металургійних комбінатів.

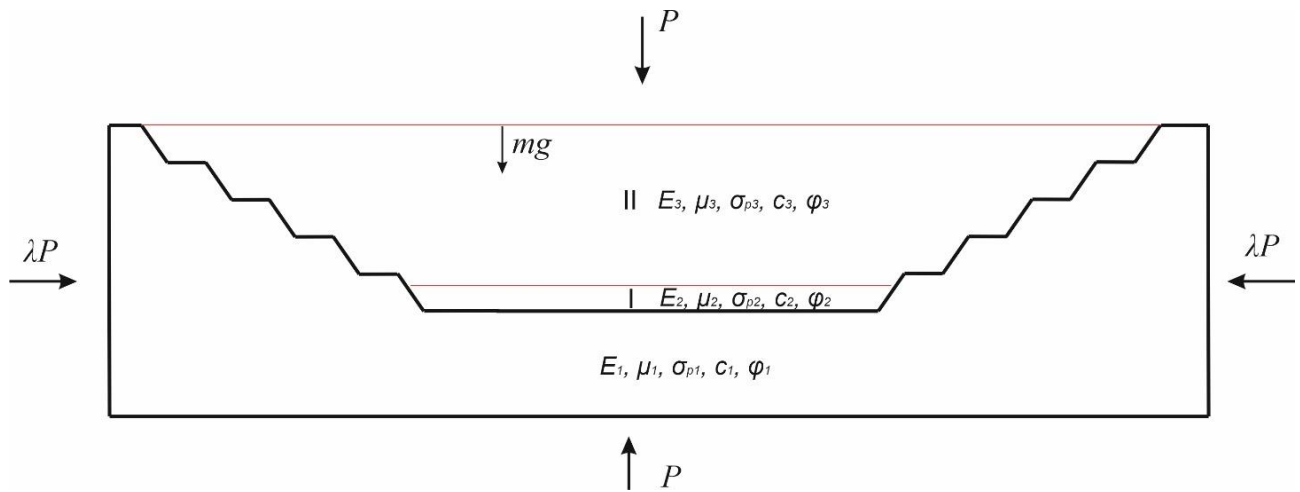


Рисунок 2.15 – Розрахункова схема до визначення деформацій закладного масиву



Рисунок 2.16 – Загальний вигляд побудованої моделі закладного масиву кар'єрних пустот

Після виконання чисельних розрахунків аналізується отримана еюра деформацій закладного масиву, а далі величини деформацій порівнюються з нормативними вимогами. Перелік вихідних даних фізико-механічних властивостей металургійних шлаків, граніту (днище кар'єру) та суглинків (поверхневий шар), які вводяться до моделі, наведено у Таблиці 2.17. За допомогою функції зондування в режимі Simulation SolidWorks представляється можливим зробити вимір деформацій в будь-якій точці моделі. Можливо проаналізувати деформаційний стан відновленої поверхні та закладного масиву в цілому й обґрунтувати раціональні параметри закладного масиву за умови мінімізації деформацій денної поверхні заповненого кар'єру.

Таблиця 2.17 – Фізико-механічні властивості закладного масиву

Найменування	СШ	ДВШ	Суміш ДВШ та СШ	Граніт
Модуль пружності $E$ , МПа				
Коефіцієнт Пуасона, $\mu$				
Щільність при ущільненні $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>				
Зчеплення, МПа				
Кут внутрішнього тертя, град				
Міцність на розтяг, $\sigma_p$ , МПа				

## 2.7. Висновки до розділу 2

Обрано вироблений простір непрацюючого кар'єру №2 Каранського родовища гранітів ТОВ «Соціальне відродження Донбасу» для подальшого заповнення металургійними шлаками ПрАТ «ММК ім. Ілліча» як закладного матеріалу в процесі рекультиваційних робіт. Найбільш доцільними для закладання металургійних шлаків є кар'єри, які знаходяться на стадії закриття за техніко-економічним обґрунтуванням або завершили відпрацювання промислових запасів.

Виконано аналіз фізико-хімічних та фізичних властивостей шлакових матеріалів, що дозволяє встановити їх відповідність закладному матеріалу:

- шлакові матеріали мають кристалічну структуру і є нерозчинними у воді;
- щільність часток зазначених шлакових матеріалів сягає 2,7 – 3,4 т/м<sup>3</sup>, а за міцністю шлакові матеріали відносяться до марок М 800 – 1200, що дозволяє їм конкурувати з природними наповнювачами у будівельній галузі;
- за гранулометричним складом шлакові матеріали містять як крупні фракції (400 – 120 мм – 65% (доменні відвальні); 250 – 120 мм – більше 25%), так і дрібні фракції (120 – 0 мм – до 35% (доменні відвальні); 120 – 0 мм (сталеплавильні); 10 – 0 мм – 95% (доменні гранульовані). Такий гранулометричний склад дозволяє сформувати щільний закладний масив;
- за результатами державної санітарно-епідеміологічної експертизи як компоненти закладних сумішей металургійні шлаки ПрАТ «ММК ім. Ілліча» відповідають вимогам діючого санітарного законодавства України.

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

Розроблено методику оцінки потенційного впливу металургійних шлаків на підземні води за умови їх контакту. Методика дозволяє визначити безпечність використання металургійних шлаків як закладних матеріалів для технічної рекультивації техногенно порушених земель. Методика базується на проведенні експериментальних досліджень контакту металургійних шлаків з водою і встановленні залежності щодо вимивання хімічних елементів зі шлаків при змінному співвідношенні об'єму шлаків та рідини, а також при змінній тривалості їх контакту.

Викладено 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 з урахуванням ступеня проникності атмосферних опадів та утворення фільтрату. Визначено характеристики фізичної моделі закладного масиву та максимальної кількості опадів, що чинитимуть вплив 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. Встановлено особливості чисельного моделювання деформацій закладного масиву на основі моделі міцності Друккера-Прагера для сипких матеріалів у програмному пакеті SolidWorks 2016.

За результатами досліджень опубліковані роботи [3, 10, 11, 30].

## **2.8. Список використаних джерел до розділу 2**

1. *Пояснювальна записка до річного плану розвитку гірничих робіт на 2015 рік ТОВ «Соціальне відродження Донбасу». (2015). Донецьк, 27 с.*

2. 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.

3. 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* (p. 55-60). Riga, Latvia: Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-588-13-6-17>

4. ДСТУ Б В.2.7-71-98. (1998). *Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний*. Москва: Росстандарт.

5. ДСТУ Б В.2.7-35-95. (1995). *Строительные материалы. Щебень, песок и щебеночно-песчаная смесь из доменных и сталеплавильных шлаков для общестроительных работ. Общие технические условия*. Москва: Росстандарт.

6. ДСТУ 9043:2020. (2020). *Матеріали щебеневі зі шлаків металургійних для дорожнього будівництва. Технічні умови*. Київ: Технічний комітет стандартизації.

7. ДСТУ Б В.2.7-302:2014. (2014). *Шлак доменный гранулированный для цементов, бетонов и строительных растворов. Технические условия и оценка соответствия (EN 15167-1:2006, NEQ)*. Киев: КП «НТЦ Академии строительства Украины».

8. ДСТУ Б В.2.7-209:2009. (2009). *Будівельні матеріали. Щебінь з доменного шлаку для виробництва мінеральної вати. Технічні умови*. Київ: Науково-технічний комітет «Будстандарт».

9. Ляшок, Я.О., Подкопаев, С.В., Повзун, О.І., & Калініченко, В.В. (2020). Ніздрюватий бетон з використанням доменного гранульованого шлаку. *Сталий розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування* (колективна монографія) (с. 345-363). Львів, Україна: ТЗОВ «ЗУКЦ». <https://doi.org/10.23939/book.ecocongress.2020>

10. 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. <https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.011>

11. Filonenko, O. (2021). Environmental impact assessment of ferrous slags application as backfill material for technical rehabilitation of lands degraded by mining. *Insights in Mining Science & Technology*, 2(5), 555597. <https://doi.org/10.19080/IMST.2021.02.555597>

12. КНД 211.1.4.021-95. (1995). *Методика визначення хімічного споживання кисню (ХСК) в поверхневих і стічних водах*. Харків, Україна: Український науковий центр охорони вод.

13. МВВ № 081/12-0109-03. (2004). *Поверхневі, підземні та зворотні води. Методика визначення масової концентрації сухого залишку (розчинених речовин) гравіметричним методом*. Харків, Україна: Український науково-дослідний інститут екологічних проблем.

14. МВВ № 081/12-0317-06. (2007). *Поверхневі, підземні та зворотні води. Методика виконання вимірювань водневого показника (рН) електрометричним методом*. Харків, Україна: Український НДІ екологічних проблем.

15. Семенов, А.Д. (1977). *Руководство по химическому анализу поверхностных вод суши*. Ленинград, Россия: Гидрометеиздат.

16. МВВ № 081/12-0106-03. (2010). *Поверхневі, підземні та зворотні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації амоній-іонів фотоколориметричним методом з реактивом Неслера. Зі зміною № 1*. Харків, Україна: Український науково-дослідний інститут екологічних проблем.

17. *Унифицированные методы исследования качества вод. Часть 1. Методы химического анализа вод. Том 1. Основные методы*. (1987). Москва, Россия: Совещание руководителей водохозяйственных органов стран-членов СЭВ.

18. МВВ 081/12-0007-01. (2002). *Поверхневі та очищені стічні води. Методика виконання вимірювань масової концентрації сульфатів гравіметричним методом*. Харків, Україна: Український науково-дослідний інститут екологічних проблем.

19. КНД 211.1.4.034-95. (1995). *Методика фотометричного визначення загального заліза з ортофенентраліном в поверхневих та стічних водах*. Харків, Україна: Український науковий центр охорони вод.
20. *Український гідрометеорологічний центр*. (2021). Режим доступу: [https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/climate\\_stations/120/18/](https://meteo.gov.ua/ua/33345/climate/climate_stations/120/18/)
21. 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.
22. Федорова, Е.А. (2011). Моделирование деформаций отвалов, нагруженных шагающим экскаватором при подрезке откосов. *Вестник ЧитГУ*, (2), 112-116.
23. Баловнев, В.И. (2014). *Подобие и моделирование в системе проектирования дорожно-строительных машин*. Москва: МАДИ, 148 с.
24. 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.
25. *Рекомендации по лабораторному фізическому моделюванню карстовых процессов*. (1984). Москва: ПНИИИС, 48 с.
26. *Методические указания по проектированию рекультивации нарушенных земель на действующих и проектируемых предприятиях Минуглепрома СССР*. (1988). Пермь: ВНИИОСуголь, 292 с.
27. ДСТУ Б В.2.7-71-98. (1998). *Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний*. Москва: Росстандарт.
28. ДСТУ Б В.2.7-264:2011. (2011). *Заполнители пористые неорганические для строительных работ. Методы испытаний*. Москва: Росстандарт.
29. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. (2010). *Строительные материалы. Песок для строительных работ. Методы испытаний*. Москва: Стандартинформ.

30. Філоненко, О.В., & Петльований, М.В. (2021). Методика дослідження параметрів формування закладного масиву кар'єрних пустот з металургійних шлаків. *Збірник наукових праць НГУ*, (64), 81-98. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.081>

31. Shashenko, O.M., Hapieiev, 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>

32. 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>

33. Petlovanyi, M., Lozynskyi, 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>

34. Шустов, О.О., Петльований, 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. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/58.154>

35. 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.

## РОЗДІЛ 3

### ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ ЕКОЛОГОБЕЗПЕЧНИХ І СТІЙКИХ ЗАКЛАДНИХ МАСИВІВ У КАР'ЄРНИХ ПУСТОТАХ

#### 3.1. Оцінка обсягів взаємодії кар'єрних вод та закладного матеріалу у кар'єрних пустотах

При заповненні кар'єрних пустот закладним матеріалом на основі металургійних шлаків важливою складовою є прогнозування інтенсивності та загальних обсягів кар'єрних водопритоків, які безпосередньо можуть контактувати із закладним матеріалом. При видобутку гранітів з Каранського кар'єру №2 пересічено водоносний горизонт, що розташований на відмітці +64 м. У зв'язку з тим, що гірничі роботи та водовідлив на кар'єрі припинені з 2014 року, відбувається процес його затоплення, що пов'язано з відновленням природного рівня водоносного горизонту. За допомогою програми Google Earth 7.3.3 та функції перегляду історичних знімків з 2011 по 2019 роки наглядно проілюстровано динаміку затоплення кар'єру (Рис. 3.1).

Аналіз Рисунка 3.1а показує, що у 2011 році кар'єр був сухим, адже здійснювались видобувні роботи та працював кар'єрний водовідлив. Після зупинки й подальшої консервації видобувних робіт спостерігалися процеси більш інтенсивного затоплення днища кар'єру (Рис. 3.1б, в, г), а з часом, відбулося зниження інтенсивності підйому кар'єрних вод з причини досягнення природного рівня (Рис. 3.1д, е), що відповідає відомими законам гідродинаміки підземних вод у кар'єрах.

З моменту зупинки кар'єру та водовідливу (2013 р.) і станом на 2020 рік відбувся підйом рівня кар'єрних вод на 8 м з відмітки днища кар'єру +50 до +58 м. Висота підйому рівня кар'єрних вод за 6 років склала 8 м. Від днища кар'єру (+50 м) до природного рівня підземних вод (+58 м) їх об'єм становить 1,5 млн м<sup>3</sup>. Формування закладного масиву з металургійних шлаків у Каранському кар'єрі передбачає осушення днища природно затопленого кар'єру.

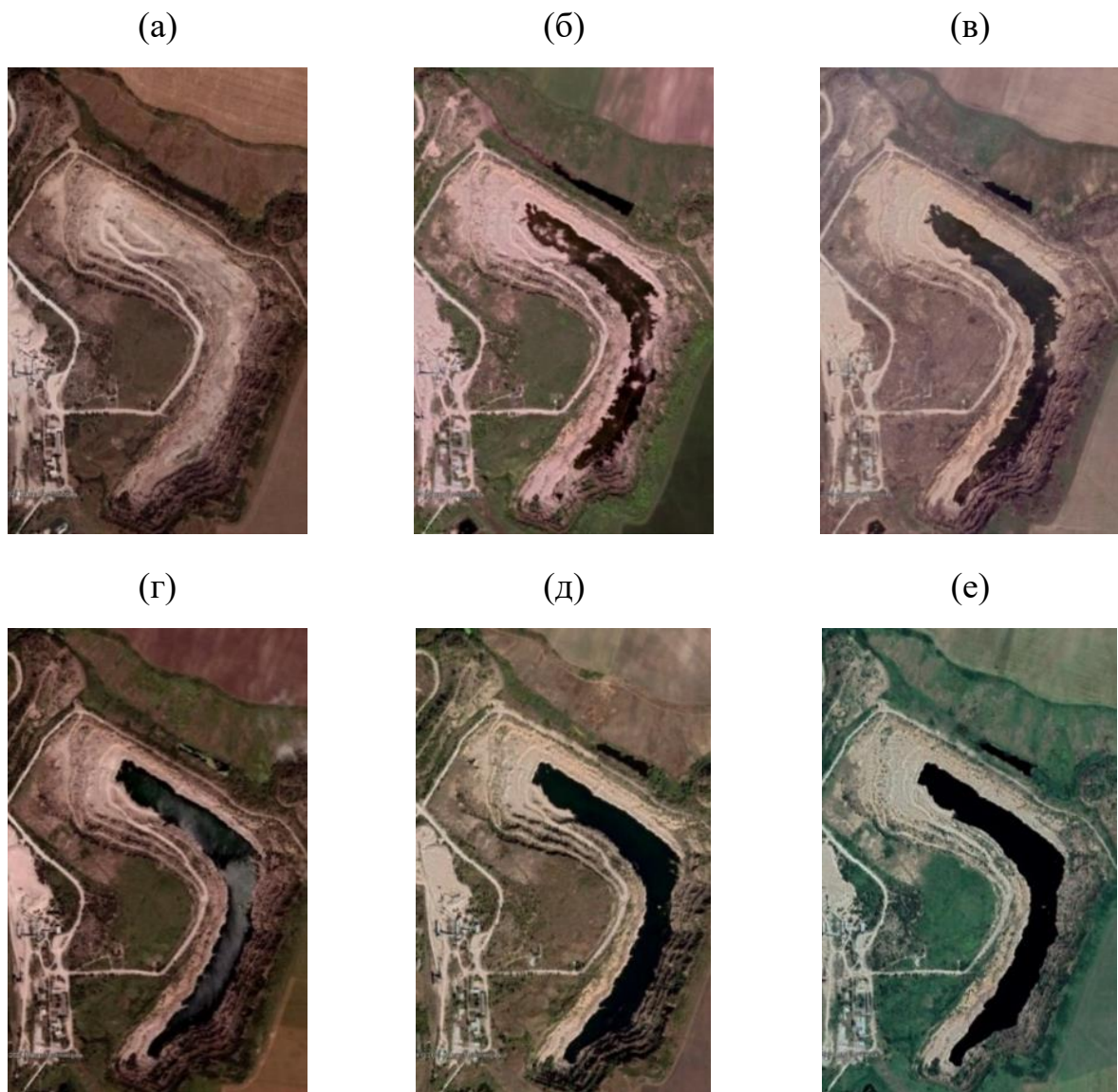


Рисунок 3.1 – Динаміка зміни рівня підземних вод у Каранському кар'єрі №2 за 2013 (а), 2014 (б), 2015 (в), 2016 (г), 2017 (д), 2019 (е) роки

Після технологічних процесів відкачування води та початку заповнення кар'єру закладним матеріалом з металургійних шлаків із високою вірогідністю відбудеться його контакт з кар'єрними водами, які будуть поступово прибувати при відновленні природного рівня водоносного горизонту. Загальний водопритік до днища кар'єру складатиметься з притоку підземних вод водоносного горизонту докембрію, притоку води від середньорічних атмосферних опадів та притоку води від липневих дощів. Розрахунок притоку води в непрацюючий осушений Каранський кар'єр (при відмітці днища +50 м) з пересіченого водоносного горизонту кристалічних порід докембрію визначимо з формули «Великого колодязя»:

$$Q = \frac{1,36k \cdot H^2}{\log R \cdot \log r_0}, \text{ м}^3/\text{добу}, \quad (3.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт фільтрації,  $k = 0,31$  м/добу;

$H$  – потужність водоносного горизонту, що розкрита гірничими роботами,  
 $H = 14$  м;

$r_0$  – приведений радіус кар'єру,  $r_0 = 1000$  м;

$R$  – радіус впливу кар'єру,  $R = 1450$  м.

При середньорічній кількості опадів у районі 547 мм безпосередньо в кар'єр у вигляді дощу та снігу буде випадати наступна їх кількість (без урахування випаровування):

$$Q = \frac{S \cdot W}{365 \cdot 24}, \text{ м}^3/\text{год}, \quad (3.2)$$

де  $S$  – площа кар'єру по денній поверхні,  $S = 480000$  м<sup>2</sup>;

$W$  – кількість опадів, що випадають,  $W = 0,547$  м.

У період зливних дощів добовий максимум становить 60 мм, водопритік у кар'єр за рахунок злив може сягати:

$$Q_{зл} = \frac{S \cdot b}{24}, \text{ м}^3/\text{год}. \quad (3.3)$$

Результати аналітичних розрахунків джерел притоку води до кар'єру зведено до Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Величини джерел притоку води до Каранського кар'єру №2

Параметр	Джерело		
	Підземні води	Атмосферні опади (дощ, сніг)	Зливні дощі
Величина притоку води, м <sup>3</sup> /год	21,5	30	1200

Аналіз даних Таблиці 3.1 свідчить, що при відсутності зливних дощів притік води до кар'єру сягає близько 50 м<sup>3</sup>/годину, а у разі появи злив водопритік до кар'єру збільшиться до 1250 м<sup>3</sup>/годину, при цьому загальнодобовий

водопритік ( $\text{м}^3/\text{добу}$ ) буде визначатись тривалістю зливого дощу. Для достовірності розрахунку водопритоку порівнюємо розрахункові дані з фактичними. Фактичний стан природного затоплення кар'єру характеризується підняттям рівня води на один добувний уступ кар'єру з +50 до +64 м. Об'єм води складає 1,75 млн  $\text{м}^3$ . Аналітичні розрахунки показали, що притік води до кар'єру сягає близько 51,5  $\text{м}^3/\text{год}$ . Враховуючи кількість годин на добу (24 год), кількість днів у році (365 днів) та час затоплення кар'єру на один добувний уступ (4 роки), об'єм водопритоку складе 1,804 млн  $\text{м}^3$ . Величина розбіжності сягає значення 4,9%, що свідчить про достовірність проведених аналітичних розрахунків з фактичними даними.

Після осушення кар'єру для початку ведення закладних робіт і в процесі розміщення закладного матеріалу протягом проміжку часу певний об'єм закладного матеріалу з металургійних шлаків буде контактувати з певним об'ємом води, що прибуває у днище кар'єру. Попередніми теоретичними розрахунками, із врахуванням технологічних особливостей виробництва шлаків, логістики, наявності залізничного транспорту від м. Маріуполь до смт. Мирне (відстань 40 км), максимально можливий добовий об'єм транспортування закладного матеріалу до кар'єру, розвантаження й доставки до місця укладання складе 5400 т металургійних шлаків або 225 т/годину.

Прогнозні обсяги контакту металургійних шлаків (225 т/год) з кар'єрними водами (50  $\text{м}^3/\text{год}$ ) при відсутності зливних дощів складуть співвідношення 82% шлаку і 18% води. У разі появи зливних дощів загальні обсяги контакту металургійних шлаків (225 т/год) з кар'єрними водами (1250  $\text{м}^3/\text{год}$ ) становитимуть 18% шлак і 82% вода.

Таким чином, для встановлення безпечності застосування закладного матеріалу з доменних і сталеплавильних шлаків з метою формування донного закладного шару необхідно провести лабораторні дослідження продуктів їх взаємодії з кар'єрними водами при вмісті металургійних шлаків у межах від 18 до 82%. Приймається дослідження пропорції «шлак – вода» 1:2; 1:1; 2:1 або шлак (33%) : вода (67%); шлак (50%) : вода (50%); шлак (67%) : вода (33%).

Встановлення закономірностей зміни хімічних елементів та забруднюючих речовин у розчині шлаків з кар'єрною водою дасть можливість спрогнозувати за допомогою спеціальної функції у Microsoft Excel величини концентрації при вмісті шлаків від 0 до 100%.

### 3.2. Закономірності зміни концентрації хімічних елементів та забруднюючих речовин при взаємодії закладного матеріалу з кар'єрними водами

Для досліджень взаємодії закладного матеріалу на основі металургійних шлаків з кар'єрною водою були отримані експериментальні зразки кар'єрної води, що прибуває у днище Каранського кар'єру №2. Фонові концентрації елементного складу та забруднюючих речовин кар'єрної води приймаються еталонним значенням для поставлених умов досліджень щодо взаємодії шлаків з кар'єрною водою, виконаних за методикою, описаною у п. 2.3 (етап 4). Результати досліджень природного хімічного елементного складу кар'єрних вод наведено у Таблиці 3.2, а вміст забруднюючих речовин – у Таблиці 3.3.

Таблиця 3.2 – Результати експериментальних досліджень кар'єрної води на хімічний елементний склад

Масова частка елементів, мг/дм <sup>3</sup>								
Al, Cd, Cr, P, Pb Zn, Cu, Fe, Mn, Ag, As, Co, Ni, Ti, Mo	Ca	K	Mg	Na	S	Sr	Si	Жорсткість, мг-екв/дм <sup>3</sup>
< 0,1	127	2,7	95	128	288	2,2	3,2	14,1

Аналіз елементного складу відібраної кар'єрної води (Табл. 3.2) показує, що 15 з 22 хімічних елементів, що визначаються за загальноприйнятою методикою, мають низьку масову частку < 0,1 мг/дм<sup>3</sup>. За вмістом забруднюючих речовин (Табл. 3.3) у кар'єрній воді спостерігається низький вміст сульфідів < 0,05 мг/дм<sup>3</sup>, азоту амонійного < 0,1 мг/дм<sup>3</sup>, нітритів < 0,03 мг/дм<sup>3</sup> та заліза загального < 0,1 мг/дм<sup>3</sup>.



Таблиця 3.3 – Результати експериментальних досліджень кар’єрної води на вміст забруднюючих речовин

Концентрація забруднюючих речовин, мг/дм <sup>3</sup>													
Зважені речовини	Сухий залишок	pH	Хлориди	Сульфід	Азот амонійний	Фосфати	Нітраги	Нітрити	Нафтопродукти	Залізо загальне	Сульфати	Кальцій	Магній
22,4	1246	6,75	68,1	< 0,05	< 0,1	0,23	4,93	< 0,03	0,016	< 0,1	910,5	112,4	–

При pH = 6,75 кар’єрна вода відноситься до кислих, але за значенням дуже близька до нейтральної. При показнику жорсткості 14,1 мг екв/дм<sup>3</sup> кар’єрні води відносяться до наджорстких.

Для встановлення господарчої цінності підземних вод, що прибувають з водоносного горизонту до Каранського кар’єру №2, було виконано порівняння їх хімічного складу та вмісту забруднюючих речовин зі встановленими законодавством нормативами якості води щодо її придатності для водоймищ рибхозу, питної води і стічних вод, результати якого наведено у Таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Порівняльна характеристики відібраної кар’єрної води із затвердженими нормативами якості води

Показники, що відповідають нормативам (% відповідності)	Нормативи якості водойми рибхозу ПДК, мг/дм <sup>3</sup> [1]	Нормативи якості питної води ПДК, мг/дм <sup>3</sup> [2]	Нормативи якості стічних вод ПДК, мг/дм <sup>3</sup> [3]
		16 з 31 (51,6%)	22 з 34 (64,7%)

Аналіз даних Таблиці 3.4 показує, що кар’єрні води Каранського родовища лише на 52% відповідають водоймам рибхозу, на 65% – питній воді та на 88% – стічним водам. Таким чином, можна стверджувати, що вода не придатна для водозбору в господарчій цілях, що пов’язано, здебільшого, з невідповідністю

саме вмісту хімічних елементів та забруднюючих речовин, таких як Mg, S, сульфати, показника жорсткості.

Враховуючи водозабір у смт. Мирне з глибини 20 м, яке розташоване поруч з Каранським родовищем, продукти взаємодії закладного матеріалу з металургійних шлаків з кар'єрними водами, що прибувають з водоносного горизонту (відмітка +64 м), не чинитимуть негативного впливу на здоров'я людей. Проте, треба враховувати і те, що вплив закладного матеріалу не має кардинально погіршувати якість фонові концентрації речовин у кар'єрній воді та водоносного горизонту в цілому. Особливу увагу слід звертати на жорсткість, рН, сульфати, сульфід залізо, марганець, нафтопродукти, нітрати, фосфати, хлориди.

Були проведені комплексні дослідження взаємодії закладного матеріалу з доменних і сталеплавильних шлаків ПрАТ «ММК ім. Ілліча» з кар'єрними водами Каранського родовища [4, 5]. Дослідження виконувались згідно п. 2.3 (етапи 2, 3, 4). Проведено експерименти, де співвідношення доменного та сталеплавильного шлаків з кар'єрною водою змінювали з кроком 1:2 (33% шлак, 67% вода), 1:1 (50% шлак, 50% вода) та 1,5:1 (67% шлак та 33% вода). Досліджувався розчин після взаємодії шлаків з водою при первинній витримці, потім в ємність додавалась нова кар'єрна вода для дослідження інтенсивності утворення продуктів їх взаємодії при вторинній витримці. Процес витримки шлаків з водою в експериментальних умовах наведено на Рисунках 3.2 та 3.3.



Рисунок 3.2 – Дослідження продуктів взаємодії металургійних шлаків з кар'єрною водою при співвідношеннях 2:1 (а) та 1:2 (б) при первинній витримці



Рисунок 3.3 – Дослідження продуктів взаємодії металургійних шлаків з кар’єрною водою при співвідношеннях 2:1 (а) та 1:2 (б) при вторинній витримці

Ілюстрацію відбору проби води на хімічний аналіз після її взаємодії з металургійними шлаками наведено на Рисунку 3.4.



Рис. 3.4 – Відбір розчину шлаку з кар’єрною водою після їх взаємодії для дослідження хімічного складу та забруднюючих речовин

Загальною кількістю проведено 36 хімічних аналізів методом атомно-емісійної спектроскопії продуктів взаємодії доменного відвального та сталеплавильного шлаку з кар’єрною водою, з них 18 – на вміст хімічних елементів та 18 – на вміст забруднюючих речовин. Досліджено хімічний склад та вміст забруднюючих речовини при первинній і вторинній витримках зразків шлаків з кар’єрною водою для виявлення ступеня їх виділення (вимивання) зі збільшенням обсягів контакту з водою.

Аналіз отриманого масиву експериментальних даних показав, що з 22 хімічних елементів, за якими проаналізовано якість розчину взаємодії доменних і сталеплавильних шлаків з кар'єрною водою, вміст 15 хімічних елементів (Al, Cd, Cr, P, Pb, Zn, Cu, Mn, Ag, As, Co, Ni, Ti, Mo) становить менше  $0,1 \text{ мг/дм}^3$ , що відповідає фоновому значенню концентрацій у кар'єрній воді, і далі вони не аналізуються. Уваги заслуговує аналіз закономірностей зміни вмісту таких елементів як Ca, K, Mg, Na, S, Sr, Fe, Si, концентрації яких не є постійними, змінюються при різному співвідношенні «шлак – кар'єрна вода» і часу їх взаємодії, а також різняться у порівнянні з фоновим значенням кар'єрної води. Аналогічно увага приділялась вмісту забруднюючих речовин. Вміст нітритів і нафтопродуктів становить менше  $0,01 \text{ мг/дм}^3$  та не перевищує фонову концентрацію. Увагу слід зосередити на змінах концентрацій наступних речовин: TSS, TDS,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SO}_3^{2-}$ , показниках рН і загальної жорсткості, значення яких при різних співвідношеннях шлаку та води, а також часу їх взаємодії коливаються. Для порівняння ступеню впливу металургійних шлаків як закладного матеріалу на якість кар'єрних вод прийнята фонові концентрація мінералізованих кар'єрних вод Каранського кар'єру №2.

Отримано нові експериментальні дані щодо хімічного складу та вмісту забруднюючих речовин при взаємодії доменного відвального та сталеплавильного шлаків з кар'єрною водою при їх різних пропорційних співвідношеннях та часі взаємодії. При контакті закладного масиву з кар'єрними водами вкрай важливим є те, щоб динаміка зміни концентрації небезпечних елементів і забруднюючих речовин суттєво не підвищувалась з плином часу (на 30 добу), що свідчить про загрозу виділення їх концентрацій протягом тривалого терміну.

Було досліджено зміну вмісту хімічних елементів і забруднюючих речовин у розчині суміші доменного відвального шлаку з кар'єрною водою при його вмісті 33, 50 та 67% і терміні їх взаємодії протягом 1, 15 та 30 діб. Дослідження проведенні при первинній (3 л води) та вторинній (3 л нової води) витримках доменного відвального шлаку у кар'єрній воді. Порівняльні діаграми хімічного складу розчинів при обох витримках наведено на Рисунку 3.5.

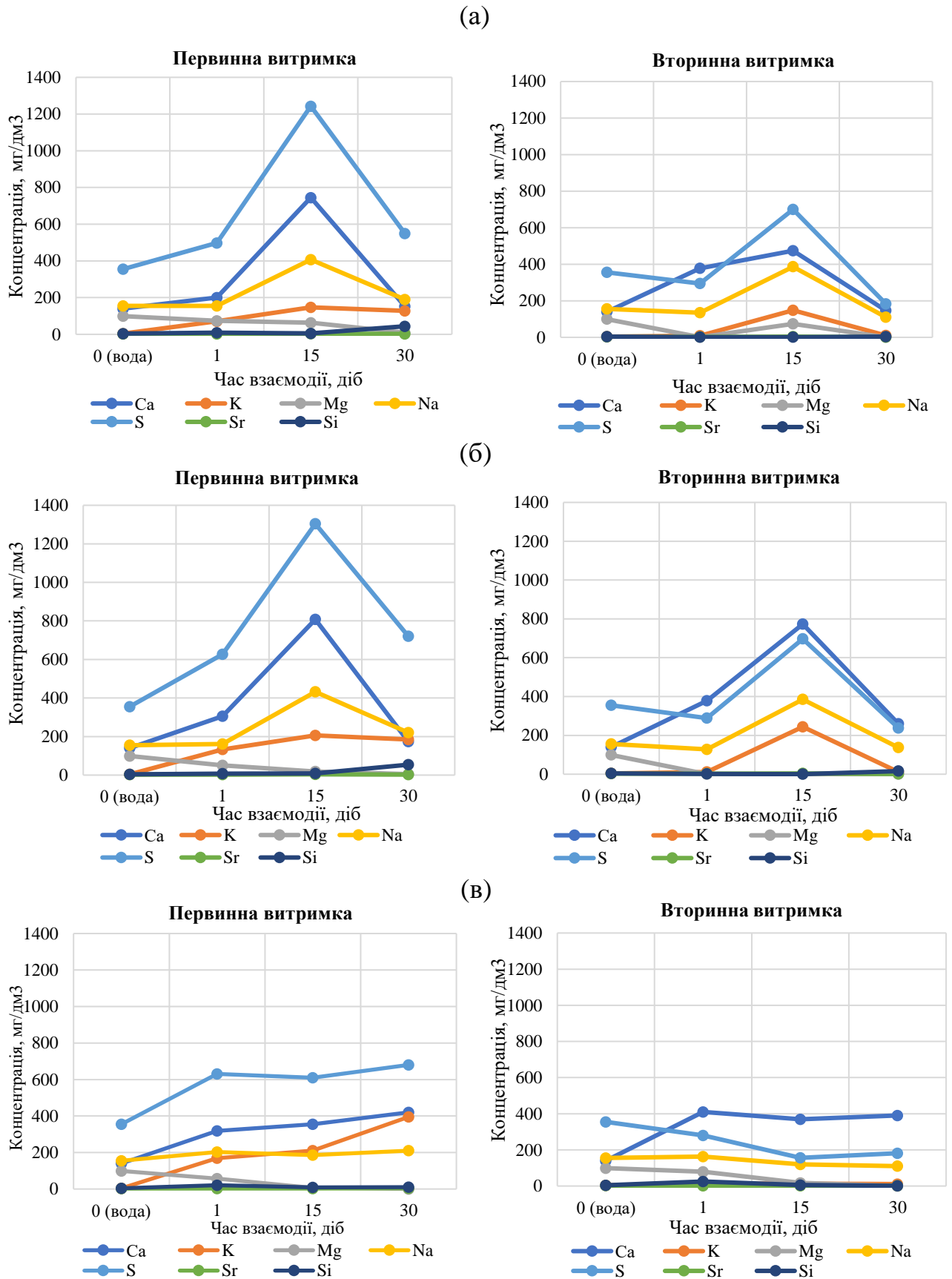


Рисунок 3.5 – Закономірності зміни концентрації хімічних елементів у суміші доменного відвального шлаку з кар'єрною водою при первинній та вторинній витримках від часу взаємодії при співвідношеннях: (а) шлак 33%, вода 67%; (б) шлак 50%, вода 50%; (в) шлак 67%, вода 33%

Аналіз графіків Рисунок 3.5 показує, що при контакті доменного відвального шлаку (при його вмісті 33 – 50%) з кар'єрною водою концентрації хімічних елементів з початку першої доби підвищуються, на 15 добу сягають пікових значень (підвищення у 2,0 – 3,5 рази) та зменшуються при терміні 30 діб. При вмісті шлаку у суміші 67% характер зміни концентрацій є дещо іншим – з початку контакту концентрації елементів підвищуються у 1,3 – 2,0 рази, з часом (15 – 30 діб) динаміка стабілізується, а приріст є мінімальним. Це, ймовірно, пов'язано з неповним обволіканням водою часток доменного шлаку, і, тим самим, меншою концентрацією виділення елементів. Динаміка зміни вмісту Ca, K, Na, S, Si, Mg, Sr при кількостях 33 – 50% відбувається за поліноміальними залежностями 2-го та 3-го ступенів, а при 67% – за логарифмічними залежностями. Найбільш небезпечним з хімічних елементів, концентрації якого перевищують фонові значення кар'єрної води, є сірка (S), підвищення якої свідчить про наявність солей сірководневої та сірчаної кислот. На 30 добу концентрації сірки зменшуються і наближуються до фонових значень, а при вторинній витримці навіть є нижчими за фонові. Перевищення концентрацій таких елементів як Ca, K, Na, Si з 1 по 15 добу не призведе до забруднення кар'єрних вод, адже ці показники, здебільшого, впливають лише на жорсткість води. Їх концентрації зменшуються до 30 доби, а при вторинній витримці є нижчими за фонові значення.

Детальний аналіз динаміки зміни хімічних елементів (Рис. 3.5) при обох витримках дозволяє простежити суттєве зменшення концентрацій хімічних елементів до рівня фонових і навіть нижчих. Вторинна витримка імітує надходження чистих об'ємів води з водоносного горизонту і поява небезпечних концентрацій деяких елементів і речовин свідчить про можливість довготривалого виділення.

Також досліджено вміст забруднюючих речовин у розчині суміші доменного відвального шлаку з кар'єрною водою при його вмісті 33, 50 та 67% і терміні їх взаємодії 1, 15 та 30 діб. Дослідження так само проведенні при первинній (3 л води) та вторинній (3 л нової води) витримках доменного відвального шлаку у кар'єрній воді. Порівняльні діаграми зміни концентрацій забруднюючих речовин при обох витримках наведено на Рисунок 3.6.

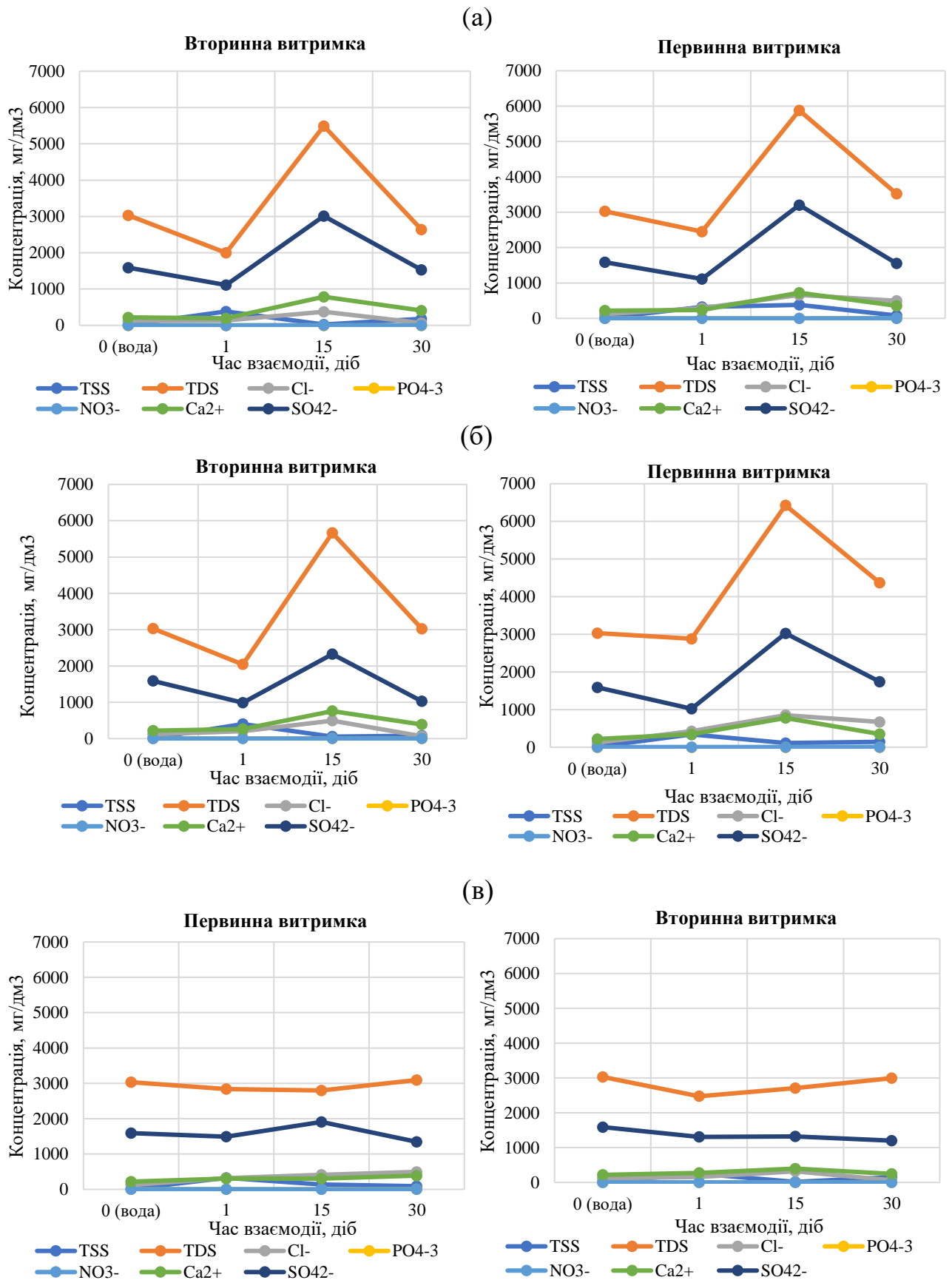


Рисунок 3.6 – Розподіл забруднюючих речовин у кар’єрній воді та її суміші з доменним відвальним шлаком при первинній та вторинній витримках від часу взаємодії при співвідношеннях: (а) шлак 33%, вода 67%; (б) шлак 50%, вода 50%; (в) шлак 67%, вода 33%

Аналіз динаміки зміни концентрацій забруднюючих речовин у розчині доменного відвального шлаку та кар'єрної води при його вмісті 33 – 50% та тривалості взаємодії 1 – 15 діб показує підвищення концентрацій, при чому на 15 добу спостерігаються пікові значення показників TSS, TDS, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>. На 30 добу концентрації речовин стрімко знижуються і сягають фонових значень.

Динаміка зміни концентрацій зазначених речовин при вмісті 33 – 50% доменного шлаку описується поліноміальними законами 2-го та 3-го ступенів. При вмісті шлаку 67% динаміка зміни концентрацій речовин значно відрізняється – спостерігається лінійний характер її зміни на рівні фонових концентрацій від 1 до 30 доби взаємодії з кар'єрною водою. Вторинна витримка показує незначне зменшення концентрацій у порівнянні з первинною.

Динаміка зміни концентрацій розглянутих речовин (Рис. 3.6) відображає позитивну тенденцію зниження їх вмісту на 30 добу і наближення значення до фонові концентрації кар'єрної води. Це свідчить про те, що зі шлаків у водоносні горизонти після 30 доби поступати високі концентрації речовин не будуть і вони не перевищуватимуть фонові протягом усього періоду взаємодії.

У зв'язку з тим, що концентрації речовин та показники якості води різняться між собою в широкому діапазоні (від 0,05 до 6000 мг/дм<sup>3</sup>), доцільно значно менші концентрації таких речовин як SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, NO<sup>3-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, NH<sup>4+</sup>, Fe<sub>заг</sub> та загальну жорсткість наводити на графіках окремо для більш якісного представлення. Динаміка зміни концентрації речовин SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, NO<sup>3-</sup>, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, Fe<sub>заг</sub> наведено на Рисунку 3.7, величини показника рН – на Рисунку 3.8, загальна жорсткість – на Рисунку 3.9.

Аналіз динаміки зміни концентрацій зазначених речовин при первинній витримці вказує на те, що при вмісті шлаку 33 – 50% такі забруднюючі речовини як сульфід (SO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) та азот амонійний NH<sup>4+</sup> мають негативну тенденцію до збільшення в інтервалі 15 – 30 доба. Це виражено підвищенням їх концентрації у 6 – 26 разів у кар'єрній воді над фонові. При вмісті шлаку 67% концентрації SO<sub>3</sub><sup>2-</sup> та NH<sup>4+</sup> набувають пікових значень на 15 добу і знижуються на 30-ту, проте все одно суттєво перевищують фонову концентрацію.



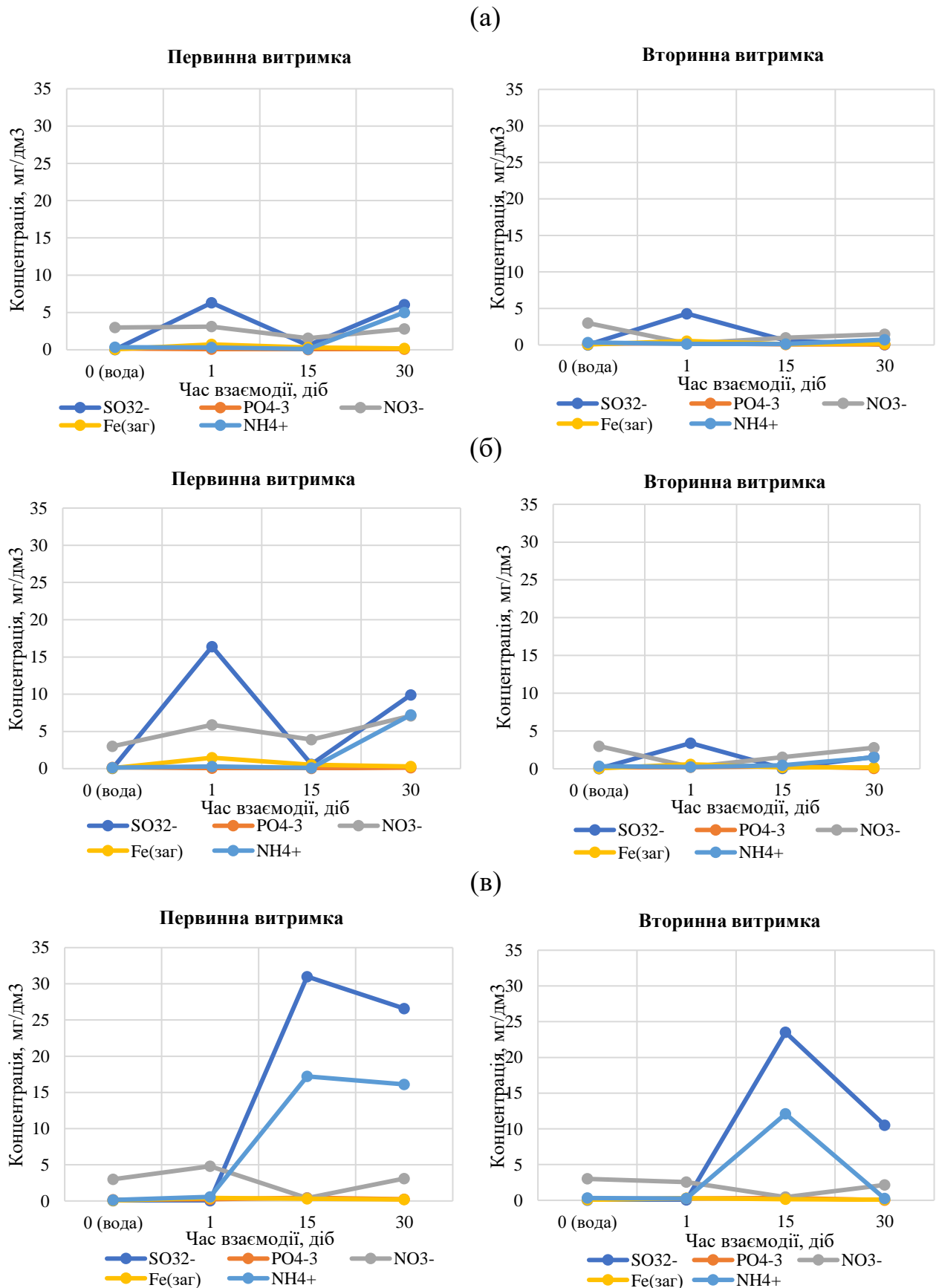


Рисунок 3.7 – Закономірності зміни концентрації забруднюючих речовин  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Fe}_{\text{заг}}$  у кар’єрній воді та її суміші з доменним відвальним шлаком обох витримок від часу взаємодії при співвідношеннях: (а) шлак 33%, вода 67%; (б) шлак 50%, вода 50%; (в) шлак 67%, вода 33%

При вторинній витримці при вмісті шлаку 33 – 50% концентрації  $\text{SO}_3^{2-}$  та  $\text{NH}_4^+$  суттєво нижчі протягом всього інтервалу (1 – 30 доба). Слід зазначити, що концентрація  $\text{SO}_3^{2-}$  на 30 добу зменшується, а  $\text{NH}_4^+$  – підвищується. При вмісті шлаку 67% на 30 добу концентрації  $\text{SO}_3^{2-}$  та  $\text{NH}_4^+$  значно знижуються у порівнянні з первинною витримкою, причому  $\text{NH}_4^+$  сягає фонових значень, а сульфідів  $\text{SO}_3^{2-}$  на 30 добу у 10 разів перевищують фонову концентрацію.

Динаміка підвищення концентрацій забруднюючих речовин на 30 добу та перевищення фонові концентрації навіть при вторинній витримці може свідчити про подальше тривале небезпечне виділення цих забруднюючих речовин у водоносний горизонт докембрію.

Було проаналізовано вплив різного співвідношення доменного відвального шлаку з кар'єрною водою на динаміку зміни показника рН та загальну жорсткість при первинній та вторинній витримках (Рис. 3.8, 3.9).

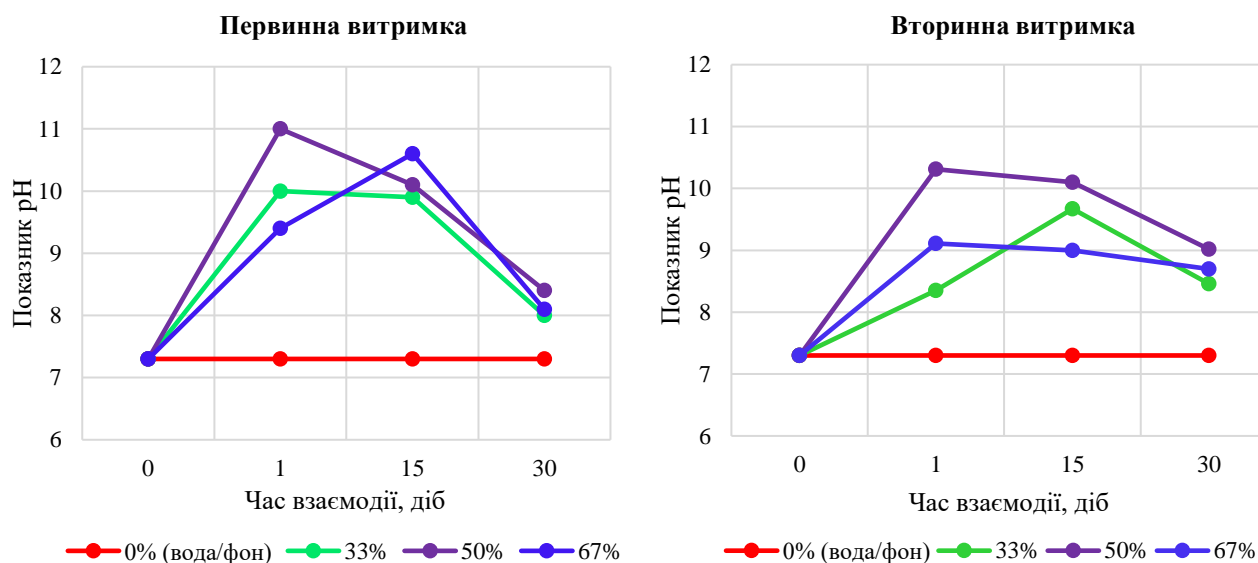


Рисунок 3.8 – Закономірності зміни показника рН розчину доменного шлаку і води від часу взаємодії при їх різних співвідношеннях

Аналіз Рисунка 3.8 показує, що показник рН води підвищується в період з першої по 15-ту добу в 1,3 – 1,5 рази залежно від співвідношення, сягає пікових значень і знижується на 30 добу взаємодії доменного відвального шлаку з кар'єрною водою до значення 8,0 – 8,5.

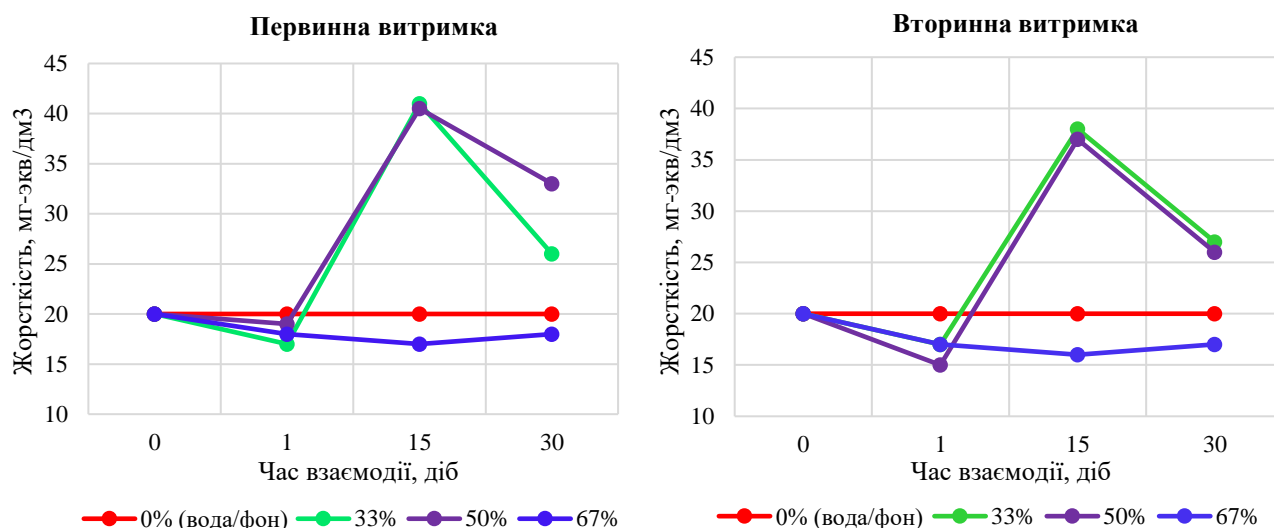


Рисунок 3.9 – Закономірності зміни показника жорсткості розчину доменного відвального шлаку та води від часу взаємодії при різних співвідношеннях

Показник рН кар'єрної води до контакту з доменним шлаком свідчить про нейтральність, при контакті води стають лужними (протягом 1 – 15 діб) і на 30 добу змінюються до слаболужних, трохи перевищуючи фоновий показник рН кар'єрної води (1,12 рази). Вторинна витримка доменного шлаку в кар'єрній воді, у порівнянні з первинною витримкою, показує зменшення величин рН. Зміна показника рН з високим ступенем достовірності ( $R^2 = 0,99 - 1,0$ ) описується поліноміальними залежностями 2-го та 3-го ступенів.

Аналіз Рисунка 3.9 показує динаміку зміни показника жорсткості розчину доменного шлаку з кар'єрною водою. Фонова концентрація кар'єрної води 20 мг-екв/дм<sup>3</sup> вказує на те, що води відносяться до наджорстких. Через одну добу взаємодії доменного шлаку та води показники жорсткості розчину при вмісті шлаку 33, 50 та 67% зменшуються нижче фонових значень. На 15 добу при вмісті шлаку 33 та 50% жорсткість підвищується у 2 рази – до 40 мг-екв/дм<sup>3</sup>, і на 30 добу зменшується до 25 мг-екв/дм<sup>3</sup>, що є близьким до фонового значення. При вмісті шлаку 67% на всьому інтервалі взаємодії (0 – 30 діб) показник жорсткості є менше фонового значення для кар'єрної води і коливається в межах значень 15 – 18 мг-екв/дм<sup>3</sup>. Жорсткість вод характеризується, здебільшого, наявністю у воді катіонів кальцію і високо корелює зі встановленою зміною вмісту Ca<sup>2+</sup>

залежно від співвідношення шлаку та води і часу їх взаємодії (Рис. 3.5, 3.6). При вторинній витримці жорсткість незначно зменшується. Зміна показника жорсткості також з високим ступенем достовірності ( $R^2 = 0,99 - 1,0$ ) описується поліноміальними залежностями 2-го та 3-го ступенів.

Наступним етапом було досліджено зміну вмісту хімічних елементів та забруднюючих речовин у розчині суміші іншого типу шлаку – сталеплавильного, що також у значних обсягах утворюється на підприємстві ПрАТ «ММК ім. Ілліча». Досліджувалась взаємодія сталеплавильного шлаку з кар'єрною водою при його вмісті 33, 50 та 67% і терміні їх взаємодії 1, 15 та 30 діб. Дослідження проведенні при первинній (3 л води) та вторинній (3 л нової води) витримках сталеплавильного шлаку у кар'єрній воді. Порівняльні діаграми хімічного складу розчину при первинній та вторинній витримках з різними співвідношеннями сталеплавильного шлаку й кар'єрної води і часу їх взаємодії наведено на Рисунку 3.10.

Аналіз графіків Рисунка 3.10 показує, що при контакті сталеплавильного шлаку (при його вмісті 33 – 50%) з кар'єрною водою концентрації хімічних елементів з початку першої доби підвищуються, на 15 добу вони сягають пікових значень та зменшуються ближче до 30 доби. Слід зазначити, що на 30 добу концентрації всіх зазначених хімічних елементів знижуються до рівня фонові, що є важливим аспектом для безпечності впливу розчину на водоносний горизонт. При вмісті шлаку у суміші 67% характер зміни концентрації є дещо іншим – з початку контакту концентрації елементів (K, S, Na, Si, Mg, Sr) знижуються на всьому інтервалі часу їх взаємодії (15 – 30 діб). Лише вміст Ca з початку першої доби підвищується і поступово знижується на 30 добу з перевищуючими значеннями фонові концентрації, що не представляє небезпеки, адже вміст Ca впливатиме лише на показник жорсткості. Динаміка зміни вмісту Ca, K, Na, S, Si, Mg, Sr при вмісті 33 – 67% відбувається за поліноміальними залежностями 2-го та 3-го порядків. Варто зазначити, що концентрація найбільш небезпечного з хімічних елементів – сірки (S) – не перевищує фонове значення кар'єрної води на 30 добу при будь-якому вмісті шлаку в інтервалі 33 – 67%.

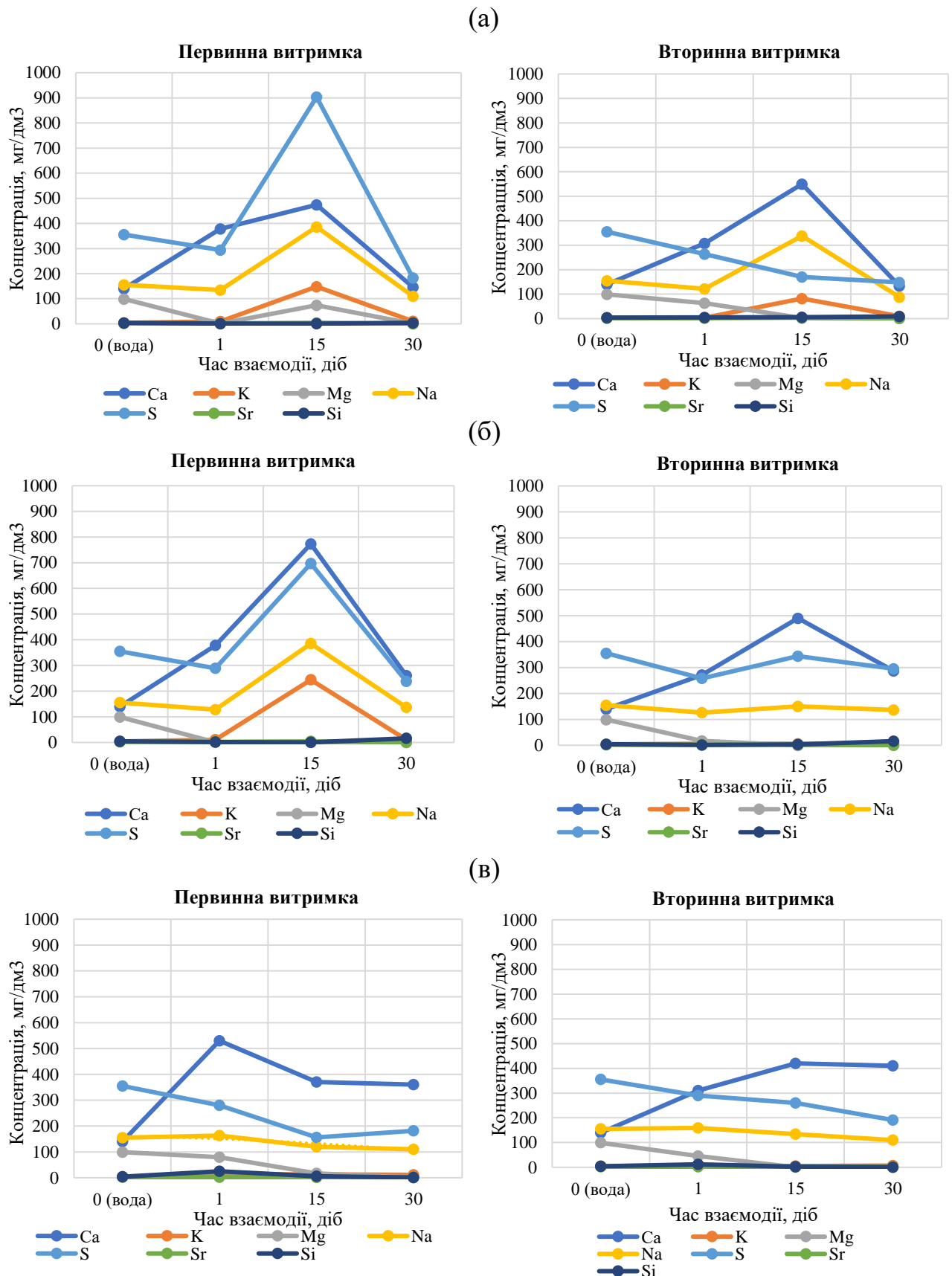


Рисунок 3.10 – Закономірності зміни концентрації хімічних елементів у суміші сталеплавильного шлаку з кар'єрною водою при первинній та вторинній витримці від часу взаємодії при співвідношеннях: (а) шлак 33%, вода 67%; (б) шлак 50%, вода 50%; (в) шлак 67%, вода 33%

При вторинній витримці концентрації хімічних елементів при вмісті шлаку на рівні 33 – 50% знижуються, у порівнянні з первинною витримкою, а при вмісті шлаку 67% – залишаються на рівні первинної витримки.

Також досліджено вміст забруднюючих речовин у розчині суміші сталеплавильного шлаку з кар'єрною водою при його вмісті 33, 50 та 67% і терміні їх взаємодії 1, 15 та 30 діб. Дослідження також проведенні при первинній (3 л води) та вторинній (3 л нової води) витримках сталеплавильного шлаку у кар'єрній воді. Порівняльні діаграми зміни концентрацій забруднюючих речовин при первинній та вторинній витримках наведено на Рисунках 3.11.

Аналіз динаміки зміни концентрацій забруднюючих речовин у розчині сталеплавильного шлаку та кар'єрної води при його вмісті 33 – 50% і тривалості взаємодії з першої по 15-ту добу показує підвищення концентрацій, при чому на 15 добу спостерігаються пікові значення показників TSS, TDS,  $\text{SO}_4^{2-}$ , а інтенсивність приросту інших речовин є значно нижчою. На 30 добу концентрації речовин стрімко знижуються і сягають фонових значень.

Динаміка зміни концентрацій зазначених речовин при вмісті 33 – 50% сталеплавильного шлаку описується поліноміальними законами 2-го та 3-го ступенів. При вмісті шлаку 67% динаміка зміни концентрацій речовин, таких як TDS,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , від першої до 30 доби взаємодії з кар'єрною водою також відбувається за поліноміальним законом, а стосовно інших речовин – спостерігається, здебільшого, лінійний характер зниження концентрацій нижче фонових значень. На 30 добу збільшується лише концентрація зависей TSS, але при вторинній витримці їх концентрація на 30 добу знижується.

Аналіз концентрації всіх досліджуваних забруднюючих речовин при вторинній витримці показує їх зменшення у порівнянні з первинною. Також встановлено факт відсутності зростання концентрацій небезпечних речовин на 30 добу, що усуває небезпеку для водоносного горизонту.

Окрему увагу приділено детальному дослідженню концентрації  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}^3$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{NH}^4+$ ,  $\text{Fe}_{\text{заг}}$ , фонові та фактичні концентрації яких значно менші, ніж інших складових (Рис. 3.11). Динаміка зміни цих речовин наведена на Рисунку 3.12.

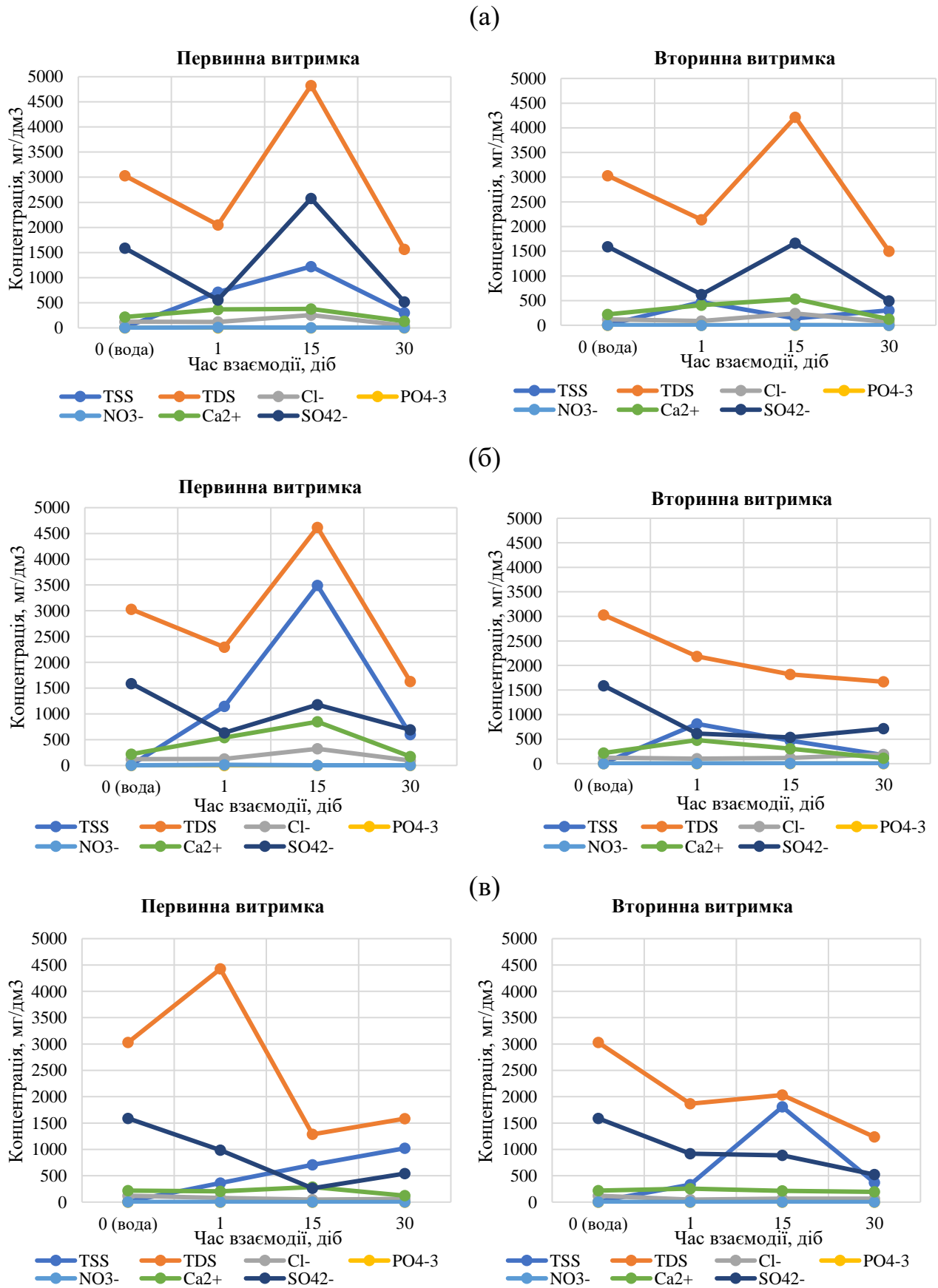


Рисунок 3.11 – Закономірності зміни концентрації забруднюючих речовин у суміші сталеплавильного шлаку з кар'єрною водою при первинній та вторинній витримках від часу взаємодії при співвідношеннях: (а) шлак 33%, вода 67%; (б) шлак 50%, вода 50%; (в) шлак 67%, вода 33%

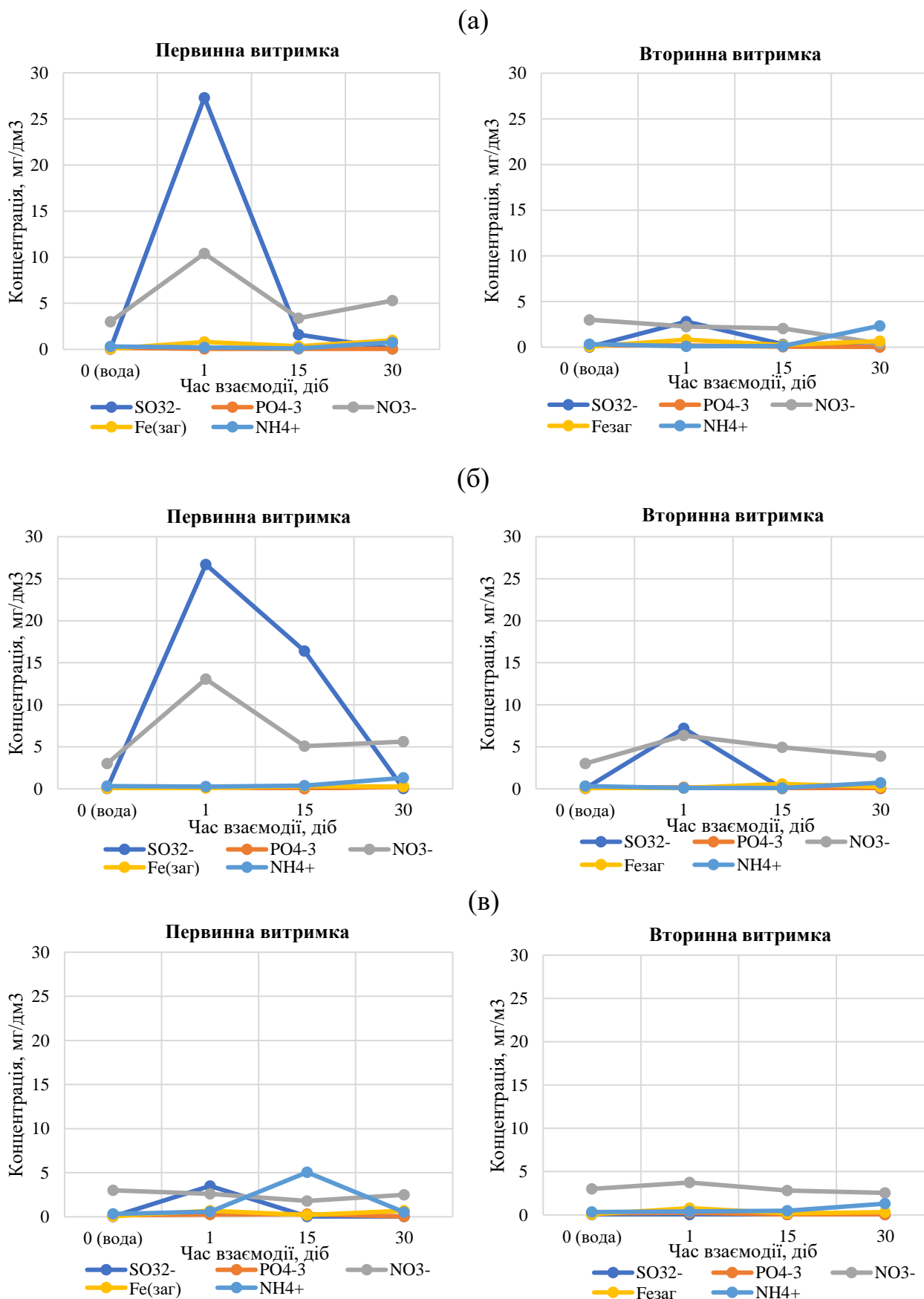


Рисунок 3.12 – Закономірності зміни концентрації забруднюючих речовин  $\text{SO}_3^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{Fe}_{\text{заг}}$  у кар'єрній воді та її суміші зі сталеплавильним шлаком обох витримок від часу взаємодії при співвідношеннях: (а) шлак 33%, вода 67%; (б) шлак 50%, вода 50%; (в) шлак 67%, вода 33%



Аналіз динаміки зміни концентрацій зазначених речовин при первинній витримці (Рис. 3.12) показує, що при вмісті шлаку 33 – 50% концентрації сульфідів ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) та нітратів ( $\text{NO}_3^-$ ) у першу добу контакту стрімко зростають і сягають пікових значень до 27 та 10 мг/дм<sup>3</sup> відповідно. Особливо високою є концентрація сульфідів ( $\text{SO}_3^{2-}$ ), адже фоновий їх вміст у воді – 0,03 мг/дм<sup>3</sup>. Проте, подальший аналіз динаміки їх зміни до 30 доби показує їх різке падіння до рівня фонового значення. Незначне підвищення концентрації нітратів ( $\text{NO}_3^-$ ) на 30 добу у порівнянні з фоновим значенням не призведе до забруднення водоносного горизонту, адже навіть за держвимогами до якості питної води та рибхозу встановлено значення не вище 40 – 50 мг/дм<sup>3</sup>. При вмісті шлаку 67% динаміка значно менша, ніж при вмісті 33 – 50%. Станом на першу добу спостерігається пік сульфідів ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) з концентрацією 4 мг/дм<sup>3</sup>, динаміка зміни концентрації нітратів ( $\text{NO}_3^-$ ) рівномірно лінійна на рівні фонових концентрацій кар'єрної води. На 30 добу спостерігається підвищення концентрації азоту амонійного  $\text{NH}_4^+$  до 2 мг/дм<sup>3</sup> при фоновій концентрації 0,3 мг/дм<sup>3</sup>. Згідно норм питної води та рибгоспів концентрація не повинна перевищувати 0,5 мг/дм<sup>3</sup>, а стосовно норм якості стічних вод на очисні спорудження – 50 мг/дм<sup>3</sup>, тому вважаємо, що підвищення концентрацій не є критичними.

При вторинній витримці небезпечне пікове значення концентрації сульфідів ( $\text{SO}_3^{2-}$ ) значно зменшується і на 30 добу сягає фонового значення, а концентрації нітратів ( $\text{NO}_3^-$ ) – лінійно змінюється на рівні фонових в інтервалі 0 – 30 діб. Концентрація  $\text{NH}_4^+$  складає 1,3 мг/дм<sup>3</sup>. Було проаналізовано вплив різного співвідношення сталеплавильного шлаку з кар'єрною водою та часу їх взаємодії на динаміку зміни показник рН та загальну жорсткість при первинній та вторинній витримках (Рис. 3.13, 3.14). Аналіз Рисунок 3.13 показує, що показник рН води підвищується в період з першої по 15 добу в 1,7 – 1,9 рази залежно від співвідношення, сягає пікових значень 11,5 – 12,5 і знижується на 30 добу взаємодії сталеплавильного шлаку з кар'єрною водою до значення 10,8 – 12,0. Показник рН = 7,3 кар'єрної води до контакту зі сталеплавильним шлаком свідчить про нейтральність, при контакті з ним (протягом 30 діб) води стають високолуужними, при чому на 30-ту добу спостерігається зниження показника рН.

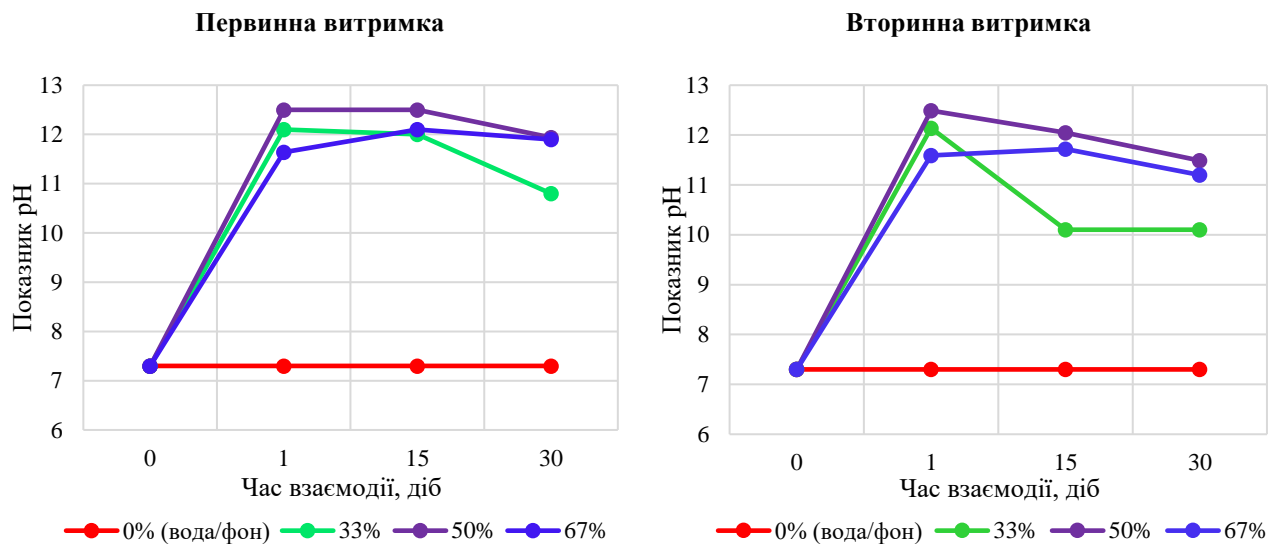


Рисунок 3.13 – Закономірності зміни показника рН розчину сталеплавильного шлаку та кар’єрної води при первинній та вторинній витримках від часу взаємодії при їх різних співвідношеннях

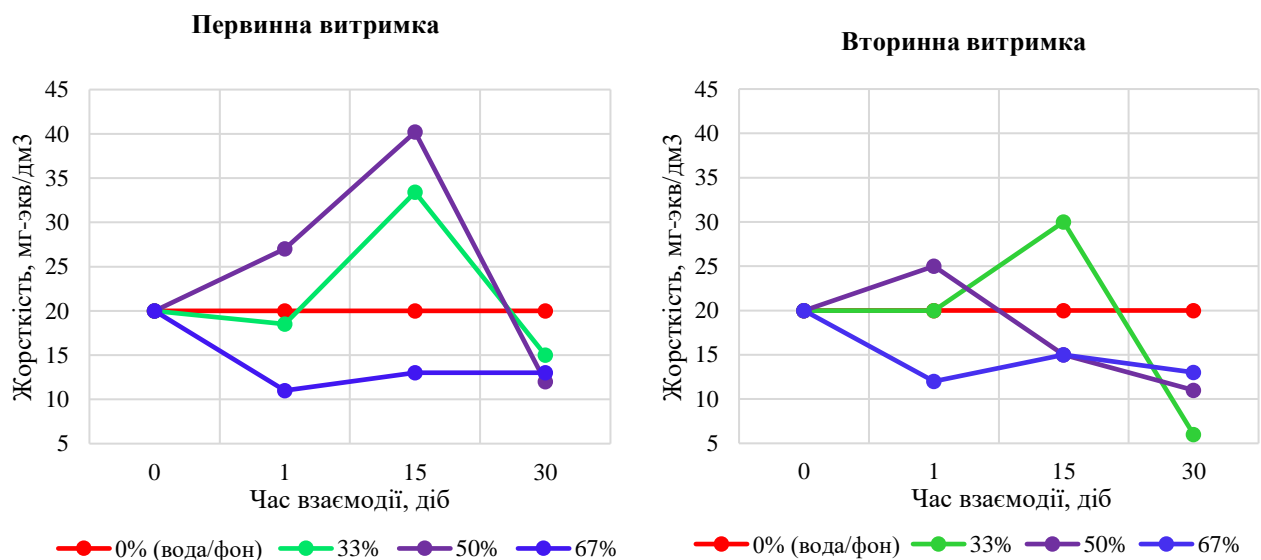


Рисунок 3.14 – Закономірності зміни показника жорсткості розчину сталеплавильного шлаку та кар’єрної води при первинній та вторинній витримках від часу взаємодії при їх різних співвідношеннях

Вторинна витримка сталеплавильного шлаку в кар’єрній воді, у порівнянні з первинною витримкою, на 30 добу показує зменшення величин рН на 7%. Зміна показника рН з високим ступенем достовірності ( $R^2 = 0,99 - 1,0$ ) описується поліноміальними залежностями 2-го та 3-го ступенів.

Аналіз Рисунка 3.14 показує динаміку зміни показника жорсткості розчину сталеплавильного шлаку з кар'єрною водою. Фонова концентрація кар'єрної води становить 20 мг-екв/дм<sup>3</sup> і вказує на те, що води відносяться до наджорстких. На 15 добу взаємодії сталеплавильного шлаку та води показники жорсткості розчину при вмісті шлаку 33 – 50% сягають пікових значень, збільшуючись до 32 і 40 мг-екв/дм<sup>3</sup> відповідно. На 30 добу при вмісті шлаку 33 та 50% жорсткість стрімко знижується нижче фонові концентрації до 12 мг-екв/дм<sup>3</sup>.

При вмісті шлаку 67% на всьому інтервалі взаємодії (0 – 30 діб) показник жорсткості менше фонового значення для кар'єрної води і коливається в межах значень 11 – 14 мг-екв/дм<sup>3</sup>. При вторинній витримці жорсткість значно зменшується протягом усього інтервалу при вмісті шлаку 33 – 67%. Зміна показника жорсткості також з високим ступенем достовірності ( $R^2 = 0,99 - 1,0$ ) описується поліноміальними залежностями 2-го та 3-го ступенів.

У Таблиці 3.5 надано порівняння показників доменних і сталеплавильних шлаків для формування донного закладного шару кар'єрних пустот.

Таблиця 3.5 – Порівняння якісних показників доменних і сталеплавильних шлаків для закладання

Параметр	Тип металургійного шлаку	
	доменний	сталеплавильний
<i>Фізичні параметри</i>		
Міцність часток (менша/більша)	менша	більша
Пористість (менша/більша)	більша	менша
Коефіцієнт фільтрації (менший/більший)	більший	менший
<i>Хімічні параметри</i>		
Перевищення концентрації забруднюючих речовини над фоновими (значне/незначне)	Сульфіди, азот амонійний (значне)	Азот амонійний (незначне)
pH	менший	більший
Жорсткість	більша	менша

Аналіз даних Таблиці 3.5 вказує, що найбільш ефективно та безпечно формування донного закладного масиву у кар'єрних пустотах досягається розміщенням у днище масиву саме сталеплавильних шлаків. Це обумовлено наступним: більшою міцністю часток сталеплавильного шлаку та меншою пористістю, що створює жорстку основу закладного масиву; меншим коефіцієнтом фільтрації; відсутністю критичного забруднення підземних вод, що прибуватимуть у днище кар'єру.

На основі проведених досліджень сформульовано *перше наукове положення*: при контакті кислих високомінералізованих природних кар'єрних вод із вмістом 33 – 67% сталеплавильних шлаків концентрації небезпечних забруднюючих речовин змінюються за поліноміальними залежностями від часу їх взаємодії, зменшуючись на 30-ту добу, що усуває небезпеку для водоносного горизонту. При контакті кар'єрних вод з доменними відвальними шлаками спостерігається зростання концентрацій сульфідів та азоту амонійного. Це дозволяє обрати й рекомендувати безпечніший тип металургійного шлаку для донного закладного шару кар'єрних пустот та його потужність.

### **3.3. Оцінка проникності атмосферних опадів при формуванні донного закладного шару зі сталеплавильних шлаків**

Важливим першочерговим етапом заповнення кар'єрних пустот закладним матеріалом є формування щільного донного закладного шару, який максимально забезпечує герметизацію з ґрунтом днища кар'єру. Враховуючи обсяг нереалізованих шлакових матеріалів ПрАТ «ММК ім. Ілліча» (Табл. 2.3) та їх оптимальні фізико-механічні й хімічні властивості, для формування донного шару закладного масиву прийнято сталеплавильні шлаки фракцій 0 – 250 мм. Сталеплавильні шлаки характеризуються більшою щільністю, міцністю фракцій та меншою пористістю. Фізико-механічні властивості сталеплавильних шлаків дозволяють їх використовувати для будівництва основи дорожнього одягу як баластний та каркасний матеріал [6]. Для забезпечення сухого днища кар'єру перед заповненням його пустот

передбачаються заходи з повного відкачування кар'єрної води з наступним тампонуванням джерел прибуття підземних вод. Тому розміщення сталеплавильних шлаків буде здійснюватися на суху поверхню днища кар'єра.

На етапі формування першого донного закладного шару пріоритетним завданням є оцінка можливої інфільтрації продуктів взаємодії сталеплавильних шлаків з атмосферними опадами.

Для прогнозування вірогідності проникнення води в закладний масив потрібно оперувати об'ємом шару закладного масиву, що буде сформований у днищі кар'єру, та ймовірністю початку атмосферних опадів. Згідно Рисунка 2.10, мінімальна кількість похмурих дощових днів спостерігається у липні – серпні й складає в середньому два дні або один дощовий день на 15 ясних днів.

Необхідно визначити, на яку висоту буде заповнено днище кар'єру об'ємом закладного матеріалу зі сталеплавильних шлаків протягом 15 днів. Визначення висоти (потужності) закладного масиву є необхідним для подальшого моделювання проникності атмосферних опадів крізь цей масив.

Висота шару закладного масиву зі сталеплавильних шлаків, укладеного протягом 15 днів, до початку дощового дня, визначатиметься за формулою:

$$h = \frac{Q \cdot \gamma_n \cdot n_{\text{дн}} \cdot k_y}{S_{\text{дн}}}, \text{ м} \quad (3.4)$$

де:  $Q$  – добова кількість закладання кар'єрних пустот металургійними шлаками, т;

$\gamma_n$  – насипна щільність сталеплавильних шлаків, т/м<sup>3</sup>;

$n_{\text{дн}}$  – кількість днів до початку дощового дня, днів;

$k_y$  – коефіцієнт ущільнення масиву;

$S_{\text{дн}}$  – площа днища кар'єру, га.

Орієнтовна запроєктована максимально можлива кількість щодобової доставки та закладання металургійних шлаків ПрАТ «ММК ім. Ілліча» з урахуванням логістики й особливостей залізничного транспорту оцінюється в 5500 т. Насипна щільність сталеплавильного шлаку природної вологості за даними лабораторних випробувань складає 1,8 т/м<sup>3</sup>. Коефіцієнт ущільнення масиву, визначається експериментально, орієнтовно складає  $k_y = 1,1 - 1,3$ .

Визначення площі днища кар'єру виконується за допомогою калькулятора розрахунку площ на основі даних програми Google Earth (Рис. 3.15). Визначена площа днища кар'єру склала 11,4 га або 114 тис. м<sup>2</sup>. Аналітичні розрахунки показують, що через 15 днів, на початок дощового дня, потужність закладного масиву зі сталеплавильних шлаків у днище кар'єру складе 1,5 м. Рекомендується розпочинати закладні роботи влітку, здебільшого у серпні, коли спостерігається найнижча вірогідність дощових днів і кількість атмосферних опадів, що нівелює утворення фільтрату від контакту сталеплавильного шлаку з водою.



Рисунок 3.15 – Визначення площі днища кар'єру за допомогою Google Earth

Далі, згідно розробленої методики (п. 2.3) [7], виконано фізичне моделювання проникності крізь закладний масив з дотриманням критеріїв подібності моделі – геометричного та матеріального. В лабораторних умовах створено фізичну модель неущільненого та ущільненого різним навантаженням закладного масиву потужністю 1,5 м для дослідження процесу проникнення води крізь закладний масив. На Рисунку 3.16 наведено підготовлену фізичну модель неущільненого закладного масиву потужністю 10 см (1,5 м в натурі). Підібраний матеріал зі сталеплавильних шлаків згідно критеріям подібності рівномірно розміщувався у лабораторному резервуарі.

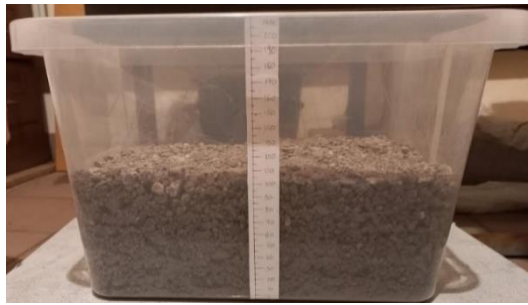


Рисунок 3.16 – Формування фізичної моделі донного закладного масиву без ущільнення (звичайне відсіпання)

Процес підготовки ущільненого закладного масиву потужністю 10 см (1,5 м в натурі), де через 3, 6 та 10 см (0,5; 1,0; 1,5 м в натурі) прикладається навантаження, що імітує ущільнення механічним способом, від навантаження бульдозером, наведено на Рисунку 3.17.



Рисунок 3.17 – Формування фізичної моделі донного закладного масиву з навантаженням

На площу поверхні закладного масиву резервуару з площею  $634 \text{ см}^2$  змодельовано вплив величини атмосферних опадів у вигляді дощу об'ємом 0,8 л, що відповідає натурним умовам 13 мм або  $13 \text{ л/м}^2$  (Рис. 3.18).



Рисунок 3.18 – Імітація впливу опадів на змодельований закладний масив

Величина проникності імітованих атмосферних опадів крізь донний закладний масив зі сталеплавильних шлаків фіксувалась через одну добу витримки. Проведено 4 експерименти: один – при впливі води на неущільнений масив та три – на ущільнений масив навантаженням 20, 25 і 30 кг. Через добу в закладному масиві лабораторного резервуару кожного експерименту здійснили виріз частини закладного масиву і дослідили водонасичену область за його потужністю.

Результати досліджень показали відсутність проникності води як крізь неущільнений, так і ущільнений закладний масив у днище резервуару. Водонасичена область в неущільненому закладному масиві через одну добу склала 70%, що ілюструється на Рисунку 3.19, а з підвищенням ступеню ущільнення масиву прикладеним навантаженням спостерігалось суттєве зменшення водонасиченої області. Зі ступенем ущільнення щільність упаковки зерен закладного масиву збільшується, що приводить до зменшення його пористості й створення сприятливих умов для появи капілярної води у мікропустотах, що дозволяє воді утримуватись у шарі закладного масиву.

Отримані результати доводять відсутність появи та, відповідно, потрапляння фільтрату, як продуктів взаємодії сталеплавильних шлаків з водою, у днище кар'єру, що створює безпечність формування закладного масиву на першому етапі закладання днища кар'єру.



Рисунок 3.19 – Глибина проникності величини атмосферних опадів в неущільнений закладний масив



Результати лабораторних досліджень з визначення глибини проникності води в неущільнений та ущільнений різним навантаженням закладний масив протягом однієї доби зведено у Таблицю 3.6.

Таблиця 3.6 – Результати експериментальних даних проникності атмосферних опадів крізь закладний масив через одну добу

Потужність шару, см	Водонасичена область закладного масиву за його потужністю, %			
	без ущільнення	Ущільнення прикладеним навантаженням		
		20 кг (0,054 МПа)	25 кг (0,067 МПа)	30 кг (0,079 МПа)
1,5	70	50	40	35

Аналіз експериментальних даних Таблиці 3.6 дозволив встановити залежність ступеня проникності води в закладний масив зі сталеплавильних шлаків залежно від величини прикладеного навантаження (Рис. 3.20). Аналіз Рисунка 3.20 дозволяє встановити, що глибина проникнення води в закладний масив зі сталеплавильних шлаків зменшується зі ступенем його ущільнення прикладеним навантаженням за поліноміальною залежністю 2-го порядку виду.

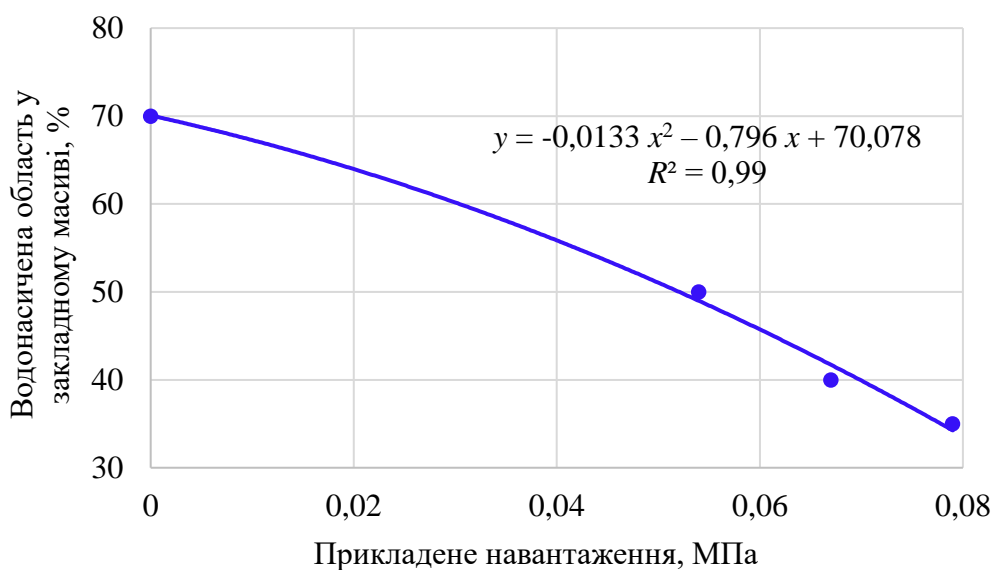


Рисунок 3.20 – Залежність проникності води в закладний масив зі сталеплавильних шлаків залежно від величини навантаження

Глибина проникнення води в закладний масив у певний проміжок часу пов'язана з коефіцієнтом фільтрації ( $k_f$ ), який від ущільнення закладного масиву навантаженням 0,054 – 0,079 МПа зменшиться у 1,4 – 2,0 рази. Таким чином, експериментально доведено відсутність утворення фільтрату при проходженні атмосферних опадів крізь донний закладний масив зі сталеплавильних шлаків.

### **3.4. Дослідження фізико-механічних та деформаційних властивостей закладного матеріалу з металургійних шлаків**

Найважливішим параметром формування стійкого закладного масиву з сипких закладних матеріалів є його мінімальна пустотність, що забезпечує мінімізацію величин деформацій. Мінімальна величина пустотності закладного масиву може бути забезпечена оптимальним підбором гранулометричного складу наявних закладних матеріалів – доменного відвального (0 – 400 мм), сталеплавильного (0 – 250 мм) та доменного гранульованого шлаків (0 – 10 мм).

Раніше було експериментально доведено (п. 3.2), що сталеплавильні шлаки більш безпечні та ефективні для закладання донного шару виробленого простору кар'єру, питома вага яких складає 35%, а їх наявний на сьогодні значний обсяг раціонально укласти саме у донний шар. Враховуючи значні об'єми утворення доменних відвальних шлаків (45%) можна стверджувати, що вони складуть основну частину наповнювальних сумішей всього закладного масиву, що формуватиметься над донним закладним шаром.

Було проведено комплекс експериментальних досліджень для визначення насипної щільності та пустотності масиву з різних видів шлаку залежно від гранулометричного складу. В польових умовах, безпосередньо на шлакових відвалах ПрАТ «ММК ім. Ілліча» досліджувалась насипна щільність доменного (в інтервалі фракцій 70 – 400 мм) та сталеплавильного шлаків (60 – 250 мм), а в лабораторних умовах в межах 0 – 70 мм даних видів шлаків. Фрагменти польових і лабораторних досліджень наведено на Рисунках 3.21 і 3.22, а результати проведених дослідів зведено у Таблиці 3.7 і 3.8.



Рисунок 3.21 – Дослідження насипної щільності крупних фракцій доменного відвального шлаку (в межах 400 – 70 мм) (а) та сталеплавильного шлаку (в межах 250 – 60 мм) (б) у польових умовах



Рисунок 3.22 – Дослідження насипної щільності фракцій доменного відвального шлаку (в межах 70 – 0 мм) та сталеплавильного шлаку (60 – 0 мм) у лабораторних умовах

Таблиця 3.7 – Результати визначення пустотності доменних відвальних шлаків залежно від їх гранулометричних характеристик

Параметр	Значення					
Фракційний склад, мм	400 – 250	250 – 120	120 – 70	70 – 40	40 – 20	20 – 0
Вміст фракції, %	10	44,73	11,1	13,79	3,46	9,41
Щільність зерен (масиву), т/м <sup>3</sup>	2,1					
Насипна щільність, т/м <sup>3</sup>	0,88	0,95	0,98	1,0	1,07	1,12
Насипна щільність, суміші, т/м <sup>3</sup>	1,35					
Пустотність, %	58,1	54,7	53,3	52,3	49,05	46,6
Пустотність суміші (0 – 400 мм), %	35,7					

Таблиця 3.8 – Результати визначення пустотності сталеплавильних шлаків залежно від їх гранулометричних характеристик

Параметр	Значення					
Фракційний склад, мм	400 – 250	250 – 120	120 – 70	70 – 40	40 – 20	20 – 0
Вміст фракції, %	–	25,85	14	2,61	4,23	56,82
Щільність зерен (масиву), т/м <sup>3</sup>	2,6					
Насипна щільність, т/м <sup>3</sup>	–	1,62	1,65	1,68	1,7	1,72
Насипна щільність, суміші, т/м <sup>3</sup>	1,75					
Пустотність, %	–	40,0	38,9	37,8	37,0	36,3
Пустотність суміші (0 – 250 мм), %	32,7					

Оскільки фракційний склад доменного гранульованого шлаку знаходиться в межах фракцій 0 – 10 мм, то експеримент проведено тільки при цьому гранулометричному розподілі: насипна щільність – 1,17 т/м<sup>3</sup>, пустотність при середній щільності зерен 1,8 т/м<sup>3</sup> – 35%. Аналіз даних Таблиць 3.7 і 3.8 показує, що насипна щільність доменного відвального та сталеплавильного шлаків залежить від їх гранулометричного складу. Збільшення насипної щільності

шлаків відбувається з причини зменшення об'єму пустот між фракціями, що сприяє більш щільному їх упакуванню в масиві. На Рисунку 3.23 представлено залежності зміни величини пустотності закладних матеріалів у взаємозв'язку з їх гранулометричним складом.

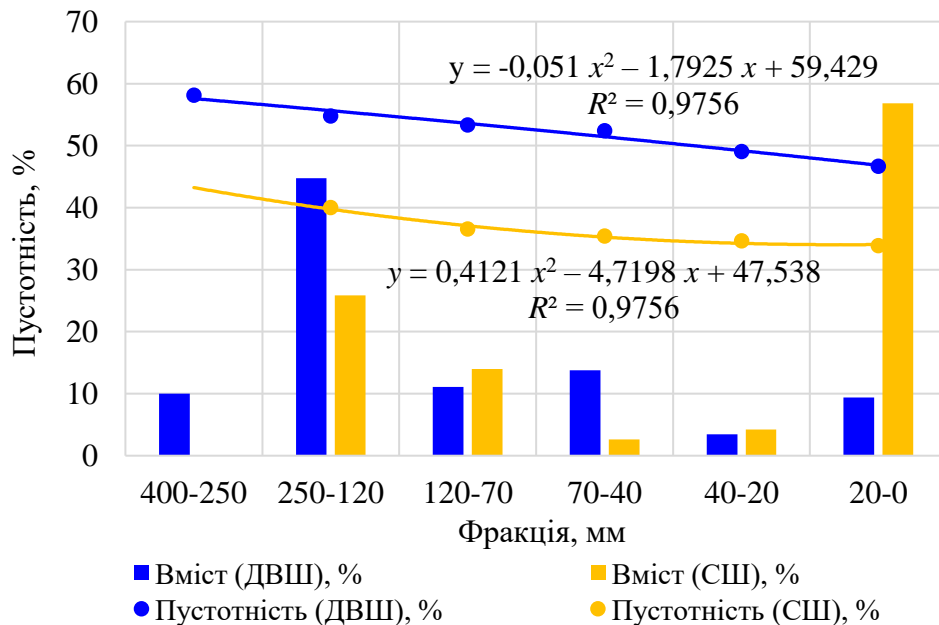


Рисунок 3.23 – Залежність пустотності масиву доменних відвальних і сталеплавильних шлаків від їх гранулометричного складу

Аналіз Рисунка 3.23 показує, що пустотність різних фракцій доменного відвального та сталеплавильного шлаків змінюється за поліноміальними залежностями з високим коефіцієнтом апроксимації ( $R^2 = 0,97$ ) від їх фракційного складу. При чому величина пустотності за різними фракціями у сталеплавильного шлаку по відношенню до доменного шлаку менша в середньому у 1,4 рази. Загальна пустотність суміші доменного відвального шлаку (0 – 400 мм) склала 35,8%, а сталеплавильного (0 – 250 мм) – 32,7%. Здебільшого різниця у пустотності пов'язана з більшим вмістом фракції 250 – 120 мм, а також меншим вмістом фракцій 20 – 0 мм, що обумовлює більший об'єм пустот.

Ефективність формування закладного масиву може бути оцінена за величиною його усадки при навантаженні. Досліджується широкий діапазон навантаження на масив, сформований з доменних і сталеплавильних шлаків, для

імітації впливу механічного ущільнення бульдозером при укладанні шарів закладного масиву, впливу ваги можливого розміщення промислових і цивільних об'єктів після рекультивації території та впливу власної ваги закладного масиву на ущільнення. В умовах навантаження на закладний масив важливо максимально можливо знизити його пустотність, що попередить утворення суттєвих для денної поверхні деформацій.

Для дослідження усадки закладних матеріалів використовувалось фізичне моделювання сипкого матеріалу з доменних і сталеплавильних шлаків з дотриманням геометричної та матеріальної подібностей гранулометричного складу й пустотності закладних матеріалів. Фізична модель сипкого матеріалу доменних і сталеплавильних шлаків зменшена у масштабі 1:5. Підбирався відповідний гранулометричний склад шлаків ситовим методом, величина їх пустотності складала 36,3 та 32,2%, відповідно.

Дослідження усадки закладних матеріалів проводили на лабораторному пресі КС-200 (Італія), що є в наявності кафедри будівництва, геотехніки і геомеханіки НТУ «Дніпровська політехніка» (Рис. 3.24). У циліндричній металічній ємності (чиста довжина – 23 см; діаметр – 16 см) по чергово розміщувались фізичні моделі доменних і сталеплавильних шлаків.



Рисунок 3.24 – Дослідження усадки закладних матеріалів на пресі

На металевій пластині товщиною 5 мм, рівній діаметру циліндру, що прикладалась до поверхні закладного матеріалу площею 256 см<sup>2</sup>, розміщувався металевий стержень діаметром 7 см, що забезпечує передачу тиску від пресу. Висота розміщення доменного відвального та сталеплавильного шлаків від дна циліндру складала 13 см. На поверхню закладних матеріалів впливало навантаження в діапазоні 0 – 15 кН, в якому представлено як імітоване навантаження від різних типів бульдозерів (0,43 – 0,61 кН), так і імітоване навантаження від промислових або цивільних об'єктів (1 – 5 кН), що можуть бути розміщені на відновленій поверхні. Результати досліджень усадки доменного відвального та сталеплавильного шлаків наведено на Рисунку 3.25.

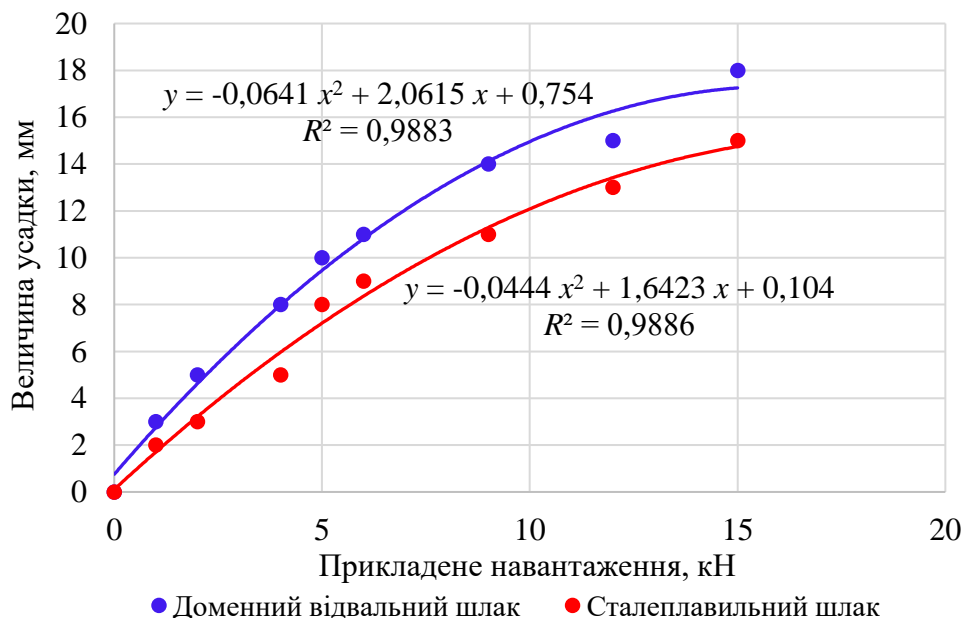


Рисунок 3.25 – Закономірності усадки доменного відвального та сталеплавильного шлаків від прикладеного навантаження

Аналіз Рисунка 3.25 показує, що величина усадки досліджених закладних матеріалів поліноміально залежить від прикладеного навантаження і описується наступними рівняннями:

– для доменного відвального шлаку:

$$\Delta = -0,0641 P^2 + 2,0615 P + 0,754, \text{ мм (при } R^2 = 0,98); \quad (3.5)$$

– для сталеплавильного шлаку:

$$\Delta = -0,0444 P^2 + 1,6423 P + 0,104, \text{ мм (при } R^2 = 0,98). \quad (3.6)$$

Для визначення точних величин усадки закладних матеріалів використано формули (3.5) та (3.6), а результати зведено у Таблицю 3.9.

Таблиця 3.9 – Результати визначення величини усадки моделі шлаків від різних видів навантаження

Усадка (модель), мм	Навантаження бульдозером, кН			Навантаження від об'єктів денної поверхні, кН				
	0,43	0,5	0,61	1	2	3	4	5
ДВШ	1,62	1,8	2,0	2,75	4,6	6,4	8	9,5
СШ	0,8	0,91	1,1	1,7	3,2	4,6	6	7,2

ДВШ – доменний відвальний шлак; СШ – сталеплавильний шлак

У зв'язку з тим, що при формуванні закладних шарів у виробленому просторі відбувається декілька механічних навантажень бульдозером у зв'язку з продольним розрівнюванням шарів металургійних шлаків у виробленому просторі кар'єру, враховується мінімум 5-ти кратне навантаження на укладені шари закладних матеріалів. З урахуванням цього, за допомогою графіка Рисунка 3.25 визначено усадку при 5-ти кратному навантаженні і за умови геометричної подібності 1:5 визначено усадку закладного матеріалу в натурних умовах (Табл. 3.10). Аналіз даних показує, що найбільша усадка спостерігається у доменного відвального шлаку, яка в 1,45 рази більша за сталеплавильний шлак, а пріоритетом формування стійкого закладного масиву є мінімізація деформацій поверхні.

Таблиця 3.10 – Результати визначення величини усадки шлаків в натурних умовах від різних видів навантаження

Усадка (натура), мм	Навантаження бульдозером, МПа			Навантаження від об'єктів денної поверхні, МПа	
	0,42	0,47	0,6	0,8	1,0
ДВШ	24,5	27,5	32,5	40	47,5
СШ	17	19,5	23,5	30	36



Більша усадка викликана безпосередньо більшою величиною пористості та меншою міцністю його часток. Враховуючи обсяги щорічного накопичення шлакових матеріалів (Табл. 2.3), очевидно, що основним наповнювачем закладного масиву є доменний відвальний шлак, накопичень якого на ПрАТ «ММК ім. Ілліча» найбільше всього. Проте, враховуючи більш якісніші фізико-механічні властивості сталеплавильних шлаків (насипна щільність, пористість, усадка), вихід яких теж являє собою відходи, та обсяги їх утворення у порівнянні з доменними шлаками, пропонується дослідити суміш доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30.

Були виконані лабораторні дослідження, аналогічні доменному відвальному та сталеплавильному шлаків, щодо визначення пористості та гранулометричного складу запропонованої суміші. З причиною того, що у лабораторних умовах відтворити запроповану суміш складно, було застосовано геометричну подібність 1:5, розміри фракцій компонентів у співвідношенні 70:30 відповідно зменшені. Суміш засипалась у лабораторний резервуар та зважувалась. Результати експериментальних даних наведено у Таблиці 3.11.

Таблиця 3.11 – Результати визначення пористості суміші доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30

Параметр	Значення					
Фракційний склад, мм	400 – 250	250 – 120	120 – 70	70 – 40	40 – 20	20 – 0
Вміст фракції, %	10,0	36,5	12,1	13,9	3,7	23,8
Щільність зерен (масиву), т/м <sup>3</sup>	2,45					
Насипна щільність, суміші, т/м <sup>3</sup>	1,63					
Пористість суміші (0 – 400 мм), %	33,4					

Аналіз результатів Таблиці 3.11 показує, що у порівнянні з закладним матеріалом з доменного відвального шлаку при суміші доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30 спостерігається зменшення

пустотності масиву у 1,07 раз, закономірне підвищення насипної щільності у 1,2 рази. Вірогідно, це викликано зменшенням в загальному об'ємі вмісту фракцій 250 – 120 мм та підвищенням вмісту дрібних фракцій 20 – 0 мм.

Було проведено експериментальні дослідження зміни усадки суміші від прикладеного навантаження. Результати досліджень наведено на Рисунку 3.26.

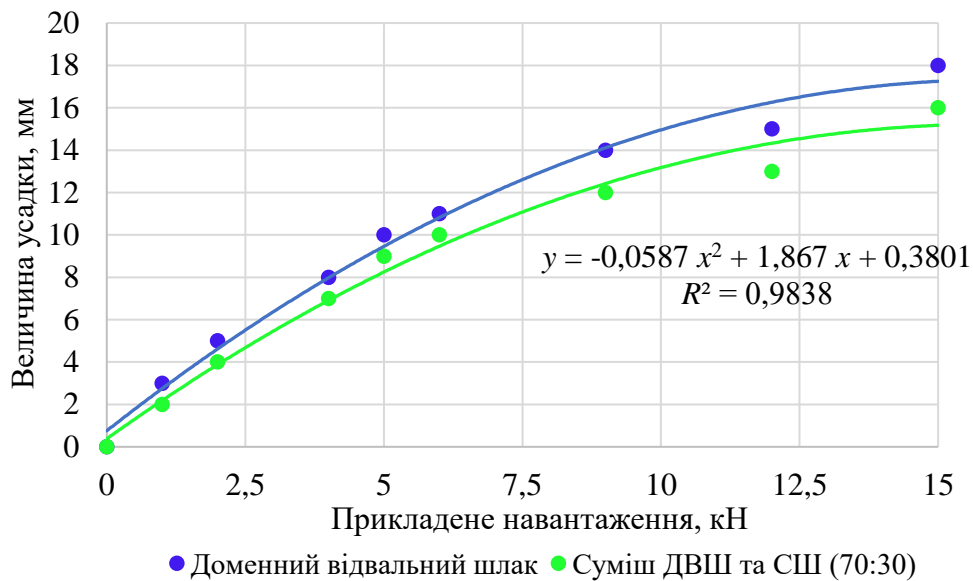


Рисунок 3.26 – Закономірність усадки суміші доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30 від прикладеного навантаження

Отримана залежність зміни величини усадки суміші доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30 характеризується більш позитивною динамікою зміни усадки, в контексті її зменшення, ніж використання однокомпонентного складу лише з доменних відвальних шлаків. Величина усадки дослідженої суміші доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30 поліноміально залежить від прикладеного навантаження і описується наступними рівнянням:  $\Delta = -0,0587 P^2 + 1,867 P + 0,3801$  (при  $R^2 = 0,98$ ).

За умови геометричної подібності 1:5 визначено усадку суміші шлаків, яка відповідає натурним умовам (Табл. 3.12).

Таблиця 3.12 – Результати визначення величини усадки шлаків  
в натурних умовах від різних видів навантаження

Усадка (натура), мм	Навантаження бульдозером, МПа			Навантаження від об'єктів денної поверхні, МПа	
	0,42	0,47	0,6	0,8	1,0
Суміш ДВШ/СШ 70:30	20,6	23,4	27,6	34,5	41,5

Для прогнозування величини усадки суміші закладних матеріалів залежно від потужності сформованої на основі неї потужності масиву визначено показник приросту усадки (мм/м), що представлено у Таблиці 3.13.

Таблиця 3.13 – Результати визначення приросту усадки  
(мм/м) від прикладеного навантаження

Прирощення усадки, мм/м	Навантаження, МПа				
	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
ДВШ	37,7	42,3	50,0	61,5	73,0
СШ	26,2	30,0	36,2	46,2	55,4
Суміш ДВШ/СШ 70:30	31,7	36	42,5	53,1	68,0

Результати Таблиці 3.13 дозволяють прогнозувати деформації однокомпонентних та двокомпонентних закладних сумішей залежно від потужності закладного шару. Так, наприклад, для доменного відвального шлаку при його потужності 40 м і тиску на денну поверхню 0,2 МПа слід очікувати величину деформації поверхні 1510 мм (при 37,7 мм/м).

Узагальнення даних досліджень усадки доменних відвальних шлаків, сталеплавильних шлаків та їх суміші у пропорції 70:30 і величини імітованого навантаження від ущільнення механічним способом (бульдозер) дозволило встановити залежності зміни коефіцієнта ущільнення (Рис. 3.27). Аналіз Рисунка 3.27 показує, що коефіцієнт ущільнення закладних матеріалів змінюється від величини навантаження за поліноміальною залежністю.

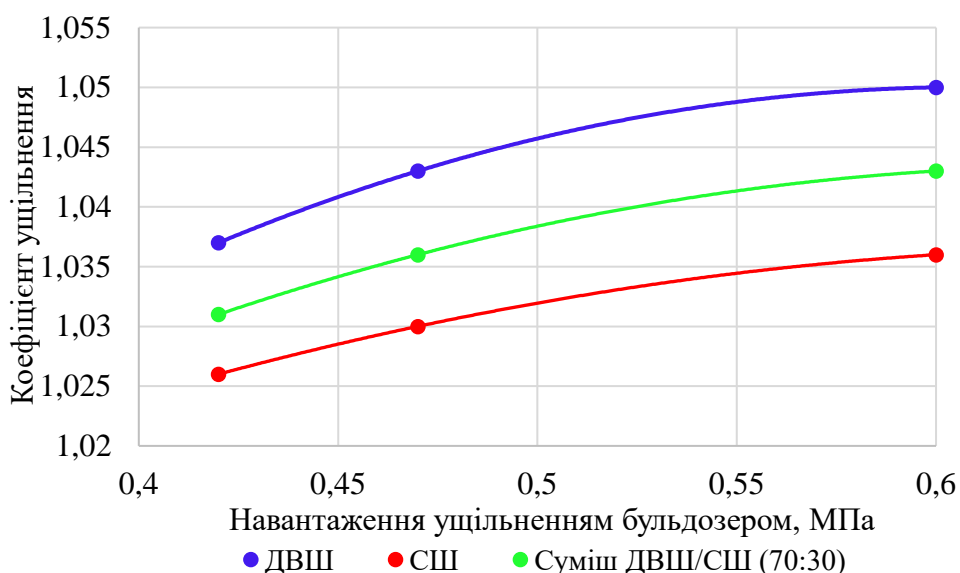


Рисунок 3.27 – Закономірність зміни коефіцієнта ущільнення металургійних шлаків та їх суміші від прикладеного навантаження

Найбільш ефективний коефіцієнт ущільнення спостерігається при навантаженні 0,6 МПа, що відповідає бульдозеру з вагою 50 т. Коефіцієнт ущільнення доменного відвального шлаку є найбільшим, адже цей матеріал характеризується більшою пористістю.

Коефіцієнт ущільнення закладних матеріалів показує як кількісно змінюється пористість, щільність матеріалу та низка фізико-механічних властивостей при дії механічного навантаження на закладний масив.

Для прогнозування деформацій закладного масиву за допомогою чисельного моделювання методом скінченних елементів із застосуванням критерія Друкера-Прагера необхідними є наступні фізико-механічні властивості закладних матеріалів [8]:

- щільність масиву, т/м<sup>3</sup>;
- кут внутрішнього тертя, град;
- зчеплення, МПа;
- коефіцієнт Пуассона;
- модуль пружності.

Кут внутрішнього тертя є постійним для сипких шлакових матеріалів і за даними лабораторії ПрАТ «ММК ім. Ілліча» знаходиться в межах 33 – 37 градусів.

За відсутності експериментальних даних значення коефіцієнта Пуассона приймається згідно з п.5.4.7.5 ГОСТ 12248-96, який для крупноуламкових ґрунтів дорівнює 0,27 [9]. Величина зчеплення та модуль пружності сипких шлакових матеріалів визначаються з низки прийнятих стандартів і нормативів дорожнього будівництва, де застосовуються аналогічні за властивостями шлако-піщані та гравійні суміші, шлаковий щебінь і крупноуламкові ґрунти [10 – 12]. Формування закладного масиву доцільно здійснювати за принципом шаруватості [13].

Узагальнення отриманих результатів при дослідженні фізико-механічних та деформаційних властивостей доменного відвального та сталеплавильного шлаків, а також їх суміші, дозволяє обрати найбільш доцільний порядок їх використання при формуванні закладного масиву:

- донний закладний шар – сталеплавильні шлаки фракції 0 – 250 мм;
- основний закладний наповнювальний шар – суміш доменних відвальних (0 – 400 мм) та сталеплавильних шлаків (0 – 250 мм) у співвідношенні 70:30.

### **3.5. Чисельне моделювання деформацій закладного масиву з металургійних шлаків**

Для підтвердження даних лабораторних досліджень деформацій закладного масиву, сформованого з металургійних шлаків, використовується чисельне моделювання переміщень методом скінченних елементів за допомогою програмного продукту SolidWorks 2016. Для більш достовірних даних обрано тип моделі Друккера-Прагера, який дозволяє досліджувати напружено-деформований стан сипких масивів та ґрунтів.

Для прогнозу деформацій денної поверхні після закладання виробленого простору Каранського кар'єру №2 виконується порівняння у двох варіантах:

- I варіант – у кар'єрні пустоти складуються сталеплавильні та доменні відвальні шлаки зі звичайним їх відсипанням;
- II варіант – у кар'єрних пустотах формується ущільнений закладний масив із застосуванням у донному закладному шарі сталеплавильних шлаків, а в основному наповнювальному закладному масиві – двокомпонентної закладної суміші з доменних відвальних та сталеплавильних шлаків.

Фізико-механічні властивості закладних матеріалів при різних варіантах заповнення гранітного Каранського кар'єру №2, що закладаються у чисельну модель, наведено у Таблицях 3.14 і 3.15.

Таблиця 3.14 – Фізико-механічні властивості закладного масиву (І варіант)

Найменування	Сталеплавильний шлак	Доменний відвальний шлак	Граніт
Модуль пружності $E$ , МПа	40	30	45000
Коефіцієнт Пуасона, $\mu$	0,27	0,27	0,15
Щільність $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	1750	1350	2500
Зчеплення, МПа	0,02	0,015	40
Кут внутрішнього тертя, град	33	33	36
Міцність на розтяг, $\sigma_p$ , МПа	0	0	3

Таблиця 3.15 – Фізико-механічні властивості закладного масиву (ІІ варіант)

Найменування	Сталеплавильний шлак	Суміш доменного та сталеплавильного шлаків	Граніт
Модуль пружності $E$ , МПа	50	50	45000
Коефіцієнт Пуасона, $\mu$	0,27	0,27	0,15
Щільність $\gamma$ , кг/м <sup>3</sup>	1800	1680	2500
Зчеплення, МПа	0,03	0,025	40
Кут внутрішнього тертя, град	35	35	36
Міцність на розтяг, $\sigma_p$ , МПа	0	0	3

У програмі SolidWorks побудовано комп'ютерну модель виробленого простору Каранського кар'єру, заповнену закладним масивом, розміри якої складають: висота – 90 м, довжина – 270 м. Донний закладний шар потужністю 8 м представлений сталеплавильними шлаками, а основна наповнювальна суміш, розміщена до денної поверхні, складена з доменних і сталеплавильних шлаків у

співвідношенні 70:30. На Рисунку 3.28 наведено комп'ютерну модель виробленого простору кар'єру із закладним масивом, розбиту на сітку скінченних елементів при дії лише гравітаційних сил та одночасно гравітаційних сил і прикладеного навантаження.

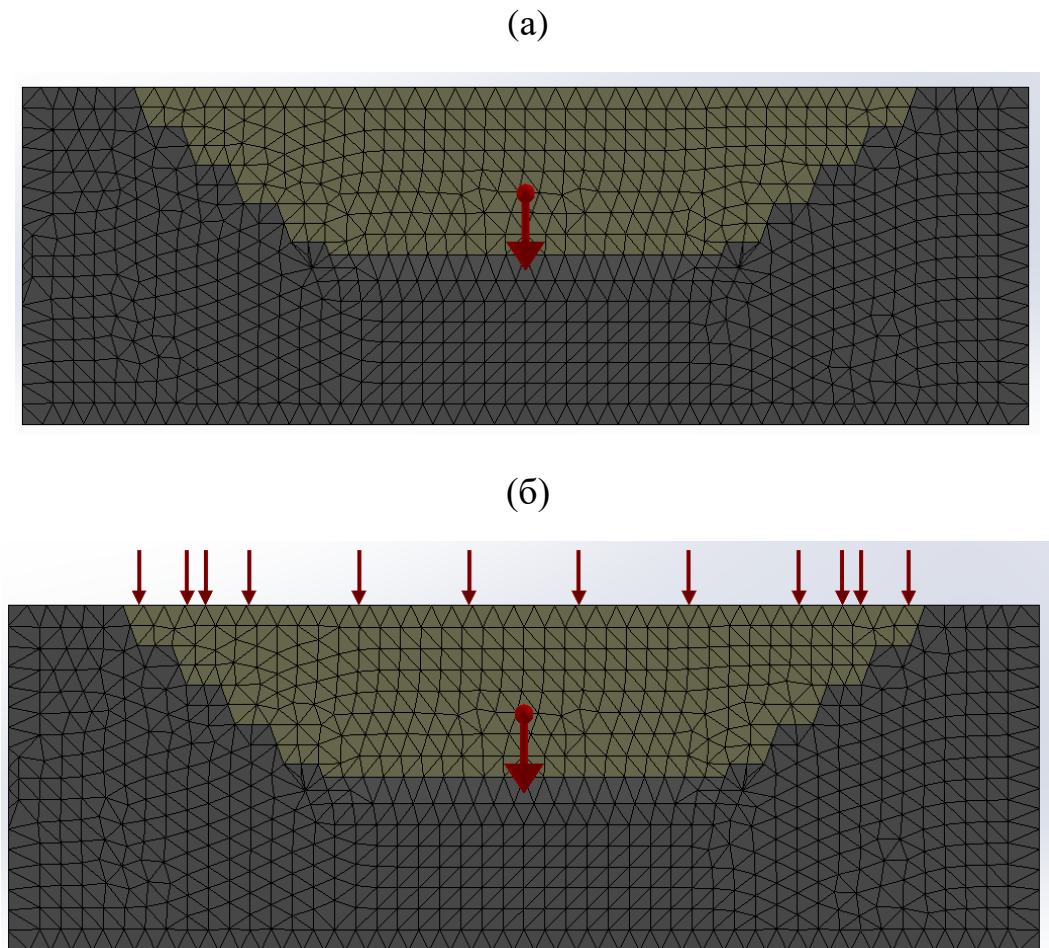
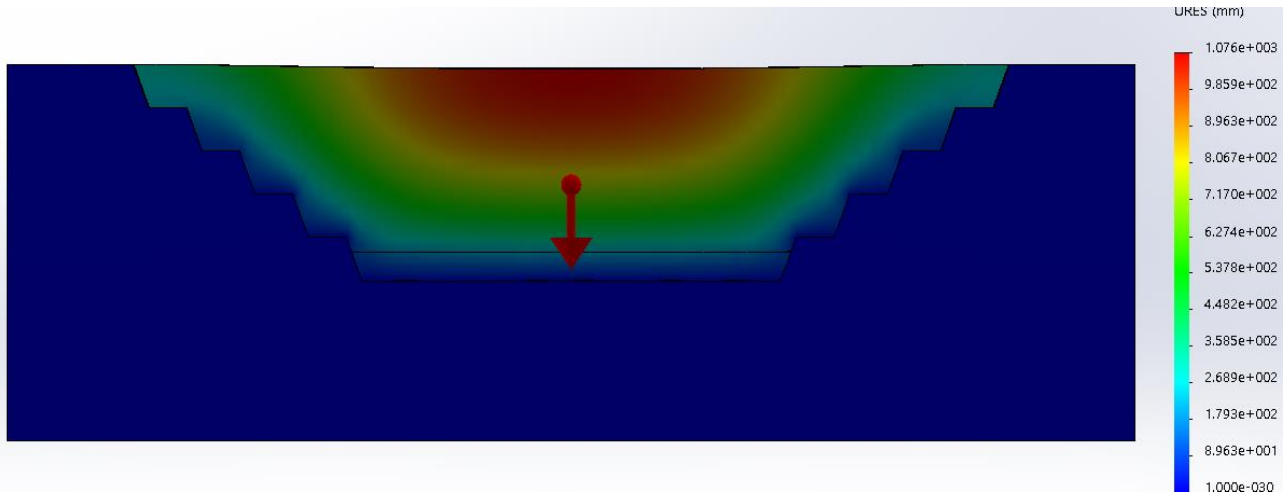


Рисунок 3.28 – Сітка розбиття моделі закладного масиву кар'єрних пустот на скінченні елементи: модель з дією гравітаційних сил (а); модель з дією гравітаційних сил і прикладеного навантаження (б)

На першому етапі моделювались переміщення в закладному масиві при звичайному засипанні й ущільненому закладному масиві (бульдозером вагою 50 т) при дії гравітаційних сил, епюри яких наведено на Рисунку 3.29. За допомогою функції зондування виконано заміри осідань поверхні закладного масиву при дії гравітаційних сил.

(a)



(б)

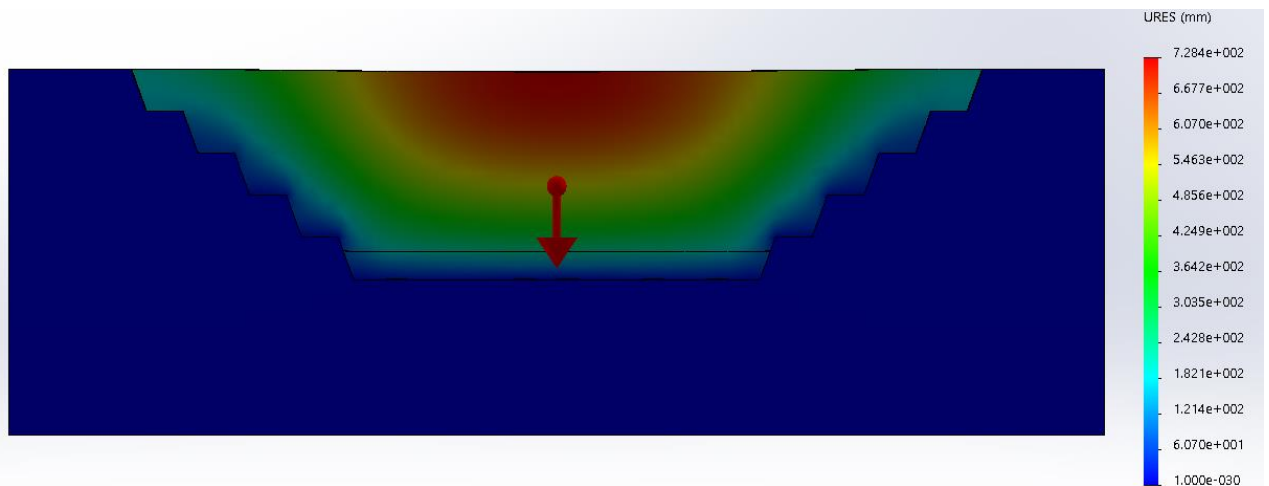


Рисунок 3.29 – Епюри переміщень звичайного відсипаного масиву (а) та масиву, ущільненого механічним способом (б)

Аналіз епюр Рисунок 3.29 показує, що величина переміщень в закладному масиві закономірно змінюється і зменшується від денної поверхні вглиб масиву. Максимальні переміщення спостерігаються на рівні денної поверхні і сягають 1007 мм при звичайному засипанні та 728,4 мм – при ущільненому закладному масиві механічним способом, а різниця складає 279 мм або 28%.

Це викликано зміною фізико-механічних властивостей закладного матеріалу при ущільненні, а саме його пористості при використанні суміші доменних відвальних шлаків зі сталеплавильними у співвідношенні 70:30. Таким чином, ефективність ущільнення закладного масиву на стадії його формування є очевидною.



На другому етапі моделювались переміщення в закладному масиві при поступовому навантаженні при 0,2; 0,6 та 1,0 МПа, що імітує вплив навантаження від можливих об'єктів на денній поверхні. Необхідності виконання моделювання звичайного відсипання немає, адже відома встановлена різниця величин деформацій поверхні у порівнянні із закладним масивом, ущільненим механічним способом, складає 30%. Епюри переміщень в закладному масиві наведено на Рисунку 3.30.

Аналіз Рисунка 3.30 показує характер зміни осідань денної поверхні при різній величині прикладених деформацій, які мають закономірний тренд збільшення. Обробка даних опускань при чисельному моделюванні дозволила встановити закономірність зміни осідань денної поверхні при різному навантаженні, що представлено на Рисунку 3.31.

На Рисунку 3.31 також представлені дані осідань, отримані при проведенні лабораторних експериментів усадки закладного масиву, для встановлення достовірності проведених досліджень. Аналіз Рисунка 3.31 показує, що величина осідань поверхні закладного масиву лінійно залежить від прикладеного навантаження і описується рівнянням  $y = 2,8822x + 0,7905$  (при  $R^2 = 0,99$ ).

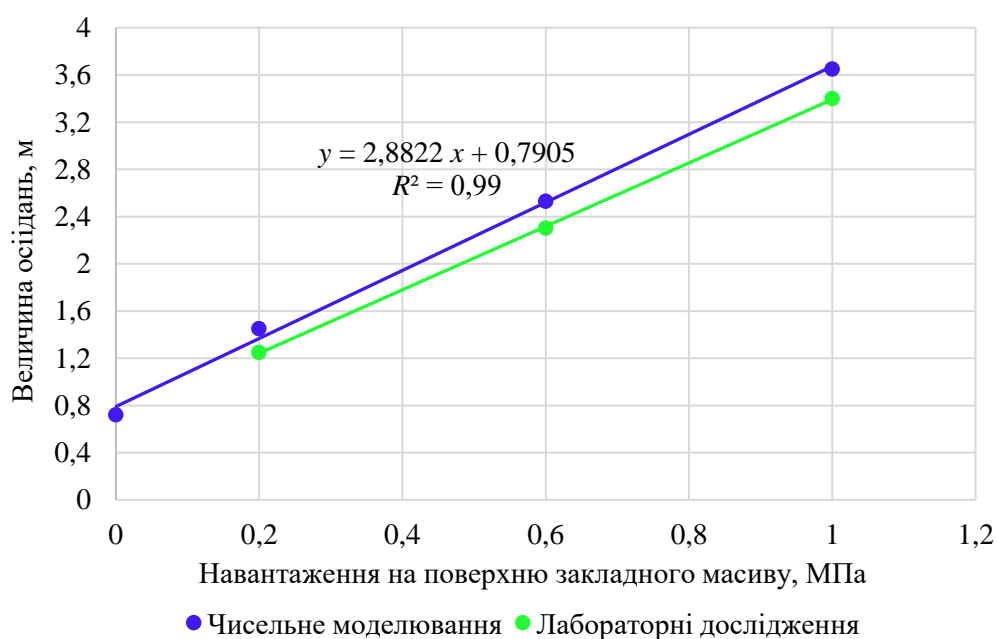


Рисунок 3.31 – Закономірності зміни величини опускань поверхні закладного масиву від прикладеного навантаження

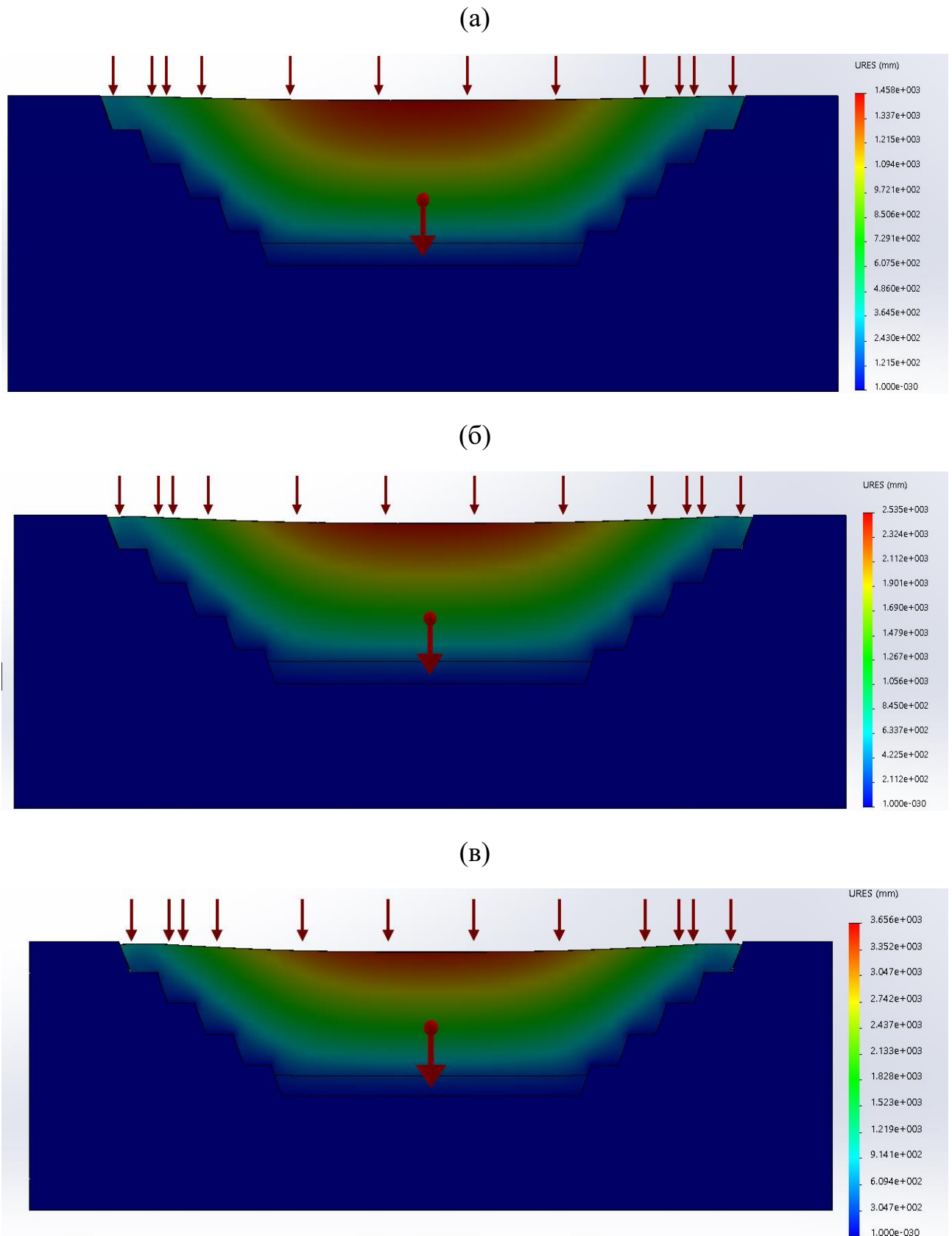


Рисунок 3.30 – Епюри переміщень ущільненого механічним способом закладного масиву при навантаженні на поверхню 0,2 МПа (а); 0,6 МПа (б); 1,0 МПа (в)

Встановлена закономірність може бути використана для прогнозу осідань поверхні закладного масиву від різного навантаження та для спрямування використання відновленої земельної площі від будівництва різних промислових і цивільних об'єктів, ландшафтно-техногенних парків до вирощування сільськогосподарських культур з дотриманням вимог щодо нормативних осідань.

Порівняння результатів визначення осідань при лабораторних дослідженнях та чисельному моделюванні показали задовільну збіжність, яка складає 86 – 93%, що свідчить про достовірність отриманих наукових даних.

На основі проведених досліджень сформульовано *друге наукове положення*: при компонентному складі основної наповнювальної закладної суміші кар'єрних пустот з доменних відвальних та сталеплавильних шлаків у співвідношенні 70:30 і впливі механічного ущільнення навантаженням 0,12 МПа величина деформацій поверхні сформованого закладного масиву знижується на 28% у порівнянні зі звичайним відсипанням, а лінійна залежність осідань від подальшого навантаження об'єктів поверхні дозволяє проектувати різноспрямоване використання відновленої земельної площі.

### **3.6. Висновки до розділу 3**

Проаналізовано динаміку затоплення Каранського кар'єру за 6 років і встановлено, що природний рівень підземних вод після припинення водовідливу сягнув 8 м. Визначено очікувані водопритоки і порівняно їх у часовому взаємозв'язку з добовим укладанням закладного матеріалу після осушення задля визначення інтервалів співвідношення вірогідного контакту шлаків з водою. Встановлено, що в лабораторних умовах необхідно дослідити пропорції «шлак – вода» 1:2, 1:1, 2:1 або шлак (33%), вода (67%); шлак (50%), вода (50%); шлак (67%), вода (33%).

Встановлено, що при контакті 33 – 50% сталеплавильного шлаку з кар'єрною водою зміни концентрацій забруднюючих речовин описуються поліноміальними законами 2-го та 3-го ступенів. При вмісті шлаку 67% динаміка зміни концентрацій речовин від 1 до 30 доби взаємодії з кар'єрною водою таких

речовин як TDS,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  відбувається також за поліноміальним законом, а для інших речовин спостерігається здебільшого лінійний характер зниження концентрацій нижче фонових значень. На 30 добу збільшується лише концентрація зависей TSS, але при вторинній витримці їх концентрація на 30 добу знижується. Аналіз всіх забруднюючих речовин при вторинній витримці показує зменшення їх концентрацій у порівнянні з первинною витримкою і доводить встановлення факту відсутності зростання концентрацій небезпечних речовин на 30-ту добу, що усуває небезпеку для водоносного горизонту.

Встановлено, що найбільш ефективно та безпечно формування донного закладного масиву у кар'єрних пустотах досягається розміщенням у днище закладного масиву саме сталеплавильних шлаків, що обумовлене наступним: більшою міцністю часток сталеплавильного шлаку та меншою пористістю, що створює жорстку основу закладному масиву; меншим коефіцієнтом фільтрації; відсутністю критичного забруднення підземних вод, що прибуватимуть у днище кар'єру.

Встановлено, що глибина проникнення води в закладний масив зі сталеплавильних шлаків зменшується зі ступенем його ущільнення прикладеним навантаженням за поліноміальною залежністю 2-го порядку. Глибина проникнення води в закладний масив у певний проміжок часу пов'язана з коефіцієнтом фільтрації ( $k_f$ ), який від ущільнення закладного масиву навантаженням 0,054 – 0,079 МПа зменшиться у 1,4 – 2,0 рази. Експериментально доведена відсутність утворення фільтрату при проходженні атмосферних опадів крізь донний закладний масив зі сталеплавильних шлаків.

Отримана залежність зміни величини усадки суміші доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30 характеризується більш позитивною динамікою зміни усадки, в контексті її зменшення, ніж використання однокомпонентного складу лише з доменних відвальних шлаків. Величина усадки дослідженої суміші доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30 поліноміально залежить від прикладеного навантаження.

Встановлено коефіцієнти ущільнення закладних матеріалів та суміші, що змінюються від величини навантаження за поліноміальною залежністю. Найбільш ефективний коефіцієнт ущільнення спостерігається при навантаженні 0,12 МПа, що відповідає бульдозеру з вагою 50 т. Коефіцієнт ущільнення закладних матеріалів показує як кількісно змінюється пустотність, щільність матеріалу та низка фізико-механічних властивостей при дії механічного навантаження на закладний масив.

Виявлено на основі чисельного моделювання, що закладання з ущільненням ефективніше за «звичайне відсіпання», про що свідчить зниження величини деформацій денної поверхні на 28%. Величина осідань поверхні закладного масиву лінійно залежить від прикладеного навантаження. Встановлена закономірність може бути використана для прогнозу осідань поверхні закладного масиву від різного навантаження й для спрямування використання відновленої земельної площі. Збіжність результатів лабораторних досліджень осідань закладного масиву з результатами чисельного моделювання склала 86 – 93%.

За результатами досліджень опубліковані роботи [4, 5, 7, 13].

### **3.7. Список використаних джерел до розділу 3**

1. *Гранично допустимі значення показників якості води для рибогосподарських водойм. Загальний перелік ГДК і ОБРВ шкідливих речовин для води рибогосподарських водойм.* (1990). Київ: Міністерство рибного господарства, 45 с.

2. *Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною».* (2010). Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 12.05.2010 №400. Київ: МОЗ України. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0452-1>

3. *Про затвердження Правил приймання стічних вод до систем централізованого водовідведення та Порядку визначення розміру плати, що справляється за понаднормативні скиди стічних вод до систем*

централізованого водовідведення. (2017). Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 01.12.2017 №316. Київ: МРРБЖКГ України. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0056-18>

4. Бондаренко, В.І., Філоненко, О.В., Петльований, М.В., & Руських, В.В. (2021). Обґрунтування використання металургійних шлаків як закладного матеріалу кар'єрних пустот. *Вісті Донецького гірничого інституту*, (2), 15-25. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-15-25>

5. Filonenko, O. (2021). Environmental impact assessment of ferrous slags application as backfill material for technical rehabilitation of lands degraded by mining. *Insights in Mining Science & Technology*, 2(5), 555597. <https://doi.org/10.19080/IMST.2021.02.555597>

6. Підлісна, О.А., & Філозоф, В.М. (2011). Економічна ефективність використання вторинних відходів промисловості. *Економічний вісник НТУУ «КПІ»*, (8), 173-178.

7. Філоненко, О.В., & Петльований, М.В. (2021). Методика дослідження параметрів формування закладного масиву кар'єрних пустот з металургійних шлаків. *Збірник наукових праць НГУ*, (64), 81-98. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.081>

8. *Справка по SolidWorks. Модель пластичности Drucker – Prager*. (2021). Режим доступу: [http://help.solidworks.com/2016/russian/SolidWorks/cworks/c\\_Plasticity\\_Drucker\\_Prager\\_Model.htm](http://help.solidworks.com/2016/russian/SolidWorks/cworks/c_Plasticity_Drucker_Prager_Model.htm)

9. ГОСТ 12248-96. (1996). *Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости*. Межгосударственный стандарт. Москва: НИИОСП им. Н.М. Герсевича.

10. СНиП 2.02.01-83. (1983). *Основания зданий и сооружений*. Москва: НИИОСП им. Н.М. Герсевича.

11. *Методические рекомендации по увеличению межремонтных сроков службы нежестких дорожных одежд*. (2015). Отраслевой дорожный методический документ ОДМ 218.2.065-2015. Москва: ФАУ РОСДОРНИИ.

12. *Методические рекомендации по повышению качества дорожных оснований из щебня различных пород.* (2021). Москва: СоюзДОРНИИ.

13. 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. <https://doi.org/10.37101/ftpgp21.01.011>

## РОЗДІЛ 4

### ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЇ ФОРМУВАННЯ ЗАКЛАДНОГО МАСИВУ З МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ ТА ЇЇ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

#### 4.1. Складання ланцюга технологічних процесів, що забезпечують закладання виробленого простору кар'єру металургійними шлаками

Прийняття рішення щодо технології закладання виробленого простору, утвореного внаслідок видобутку корисних копалин, вимагає наявності достатніх запасів закладних матеріалів місцевої мінерально-сировинної бази. Важливою складовою технології закладання є транспорт закладного матеріалу від джерела його утворення до виробленого простору, який зумовлює економічну ефективність всієї технології. Безпосереднє закладання виробленого простору Каранського кар'єру №2 здійснюється металургійними шлаками ПрАТ «ММК ім. Ілліча», безпечність та ефективні деформаційні характеристики яких підтвержені проведеними лабораторними дослідженнями і чисельним моделюванням. Найбільш доцільним видом транспорту від ПрАТ «ММК ім. Ілліча» до Каранського кар'єру №2 є залізничний, що обумовлено потрібною пропускною здатністю та експлуатаційними витратами.

Здійснення закладання виробленого простору Каранського кар'єру №2 потребує виконання низки допоміжних технологічних процесів, таких як завантаження закладного матеріалу, його транспортування до кар'єру, наступне розвантаження. Було виконано детальний аналіз логістичних шляхів залізничних сполучень від ПрАТ «ММК ім. Ілліча» до Каранського кар'єру №2, кількість необхідних залізничних вагонів, час руху залізничного потягу, аналіз топографічної ситуації місцевості для розвантаження закладних матеріалів на станції кар'єру, відстані транспортування від пункту розвантаження до виробленого простору кар'єру та складено перелік необхідного обладнання.



На Рисунку 4.1 наведено етапи необхідних підготовчих технологічних процесів, що безпосередньо забезпечують можливість здійснення закладних робіт у вироблений простір Каранського кар'єру №2.

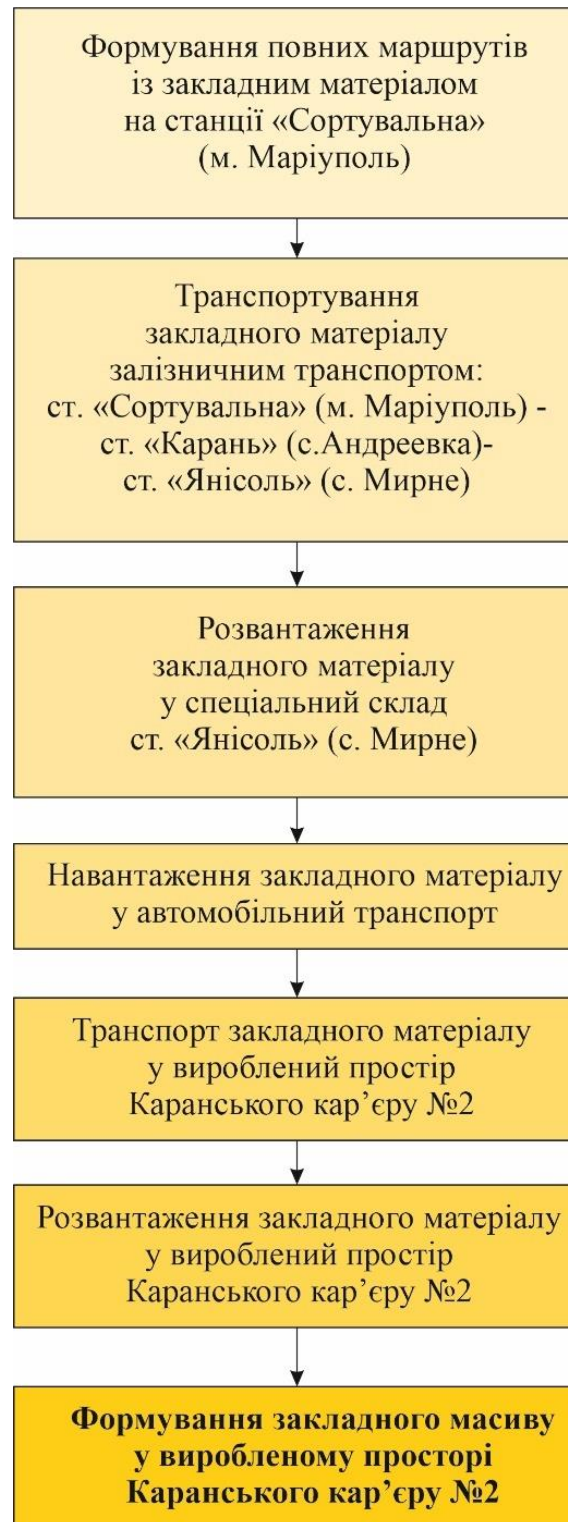


Рисунок 4.1 – Етапи необхідних технологічних процесів для забезпечення формування закладного масиву у виробленому просторі Каранського кар'єру

Безпосередня утилізація металургійних шлаків для закладання виробленого простору кар'єру передбачається щодобово, в умовах поточного виробництва ПрАТ «ММК ім. Ілліча». Початок підготовчих робіт процесів закладання пустот розпочинається на дільниці переробки сталеплавильних шлаків №4 (Рис. 4.2), де функціонує комплекс АМКОМ-1, де відходи переробки з фракційним складом 0 – 250 мм з певною періодичністю навантажуються у залізничні вагони кількістю 4 – 5 одиниць і прямують до крупного залізничного вузла станції «Сортувальна» на півночі м. Маріуполь.

*Етап 1.* З комплексу переробки металургійних шлаків вагони із закладними матеріалами з певною періодичністю прямують на станцію «Сортувальна», де поступово формуються повні маршрути залізничних потягів для доставки матеріалів до кар'єру (Рис. 4.3). Для щодобового забезпечення закладним матеріалом в обсязі 5400 т/добу формується 2 залізничних маршрути з кількістю вагонів 40 – 50 одиниць при ємності вагону 67 тон.

*Етап 2.* Від станції «Сортувальна» протягом доби прямують 2 потяги складом 40 – 50 вагонів із закладним матеріалом за прямим маршрутом до станції «Карань», що знаходиться у с. Андріївка. Від станції «Карань» у зворотному напрямку за допомогою тягача вагони із закладним матеріалом направляються до станції «Янісоль» Каранського кар'єру №2 (Рис. 4.4).



Рисунок 4.2 – Комплекс переробки сталеплавильних шлаків АМКОМ-1

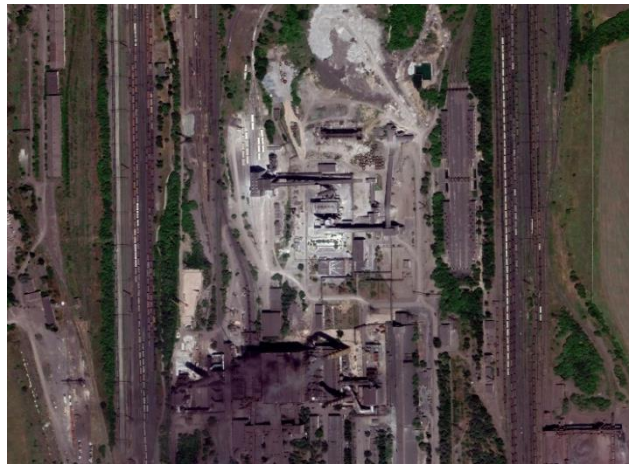


Рисунок 4.3 – Станція «Сортувальна»



Рисунок 4.4 – Маневрові операції маршрутів з доставки закладного матеріалу до Каранського кар'єру №2

*Етапи 3, 4, 5, 6* здійснюються прямо поблизу Каранського кар'єру (Рис. 4.5). Тягач доставляє вагони із закладним матеріалом на станцію кар'єру. Передбачається формування спеціального розвантажувального пункту-складу, ємністю не менше добового обсягу закладного матеріалу 5400 т або 10000 м<sup>3</sup>. На складі функціонує навантажувач, який виконує операції навантаження закладного матеріалу у автомобільний транспорт (типу Scania), яким закладний матеріал доставляється у днище кар'єру.

*Етап 7* передбачає здійснення безпосередньо у виробленому просторі кар'єру технологічних процесів закладання його пустот на основі встановлених результатів експериментальних і лабораторних досліджень та комп'ютерного моделювання.



Рисунок 4.5 – Пункт розвантаження і транспорт матеріалу до виробленого простору кар'єру

#### **4.2. Рекомендації раціональних параметрів закладання виробленого простору кар'єру металургійними шлаками**

Першочерговим завданням до початку виконання закладних робіт у виробленому просторі Каранського кар'єру є здійснення комплексу заходів з відкачування кар'єрних вод й осушення днища кар'єру. Передбачається застосування одноступеневих насосів Д-630-90 у кількості 2 одиниць, продуктивність яких 650 м<sup>3</sup>/год. В першому уступі накопичено 1,75 млн м<sup>3</sup> кар'єрних вод. При безперервній роботі час відкачування складе 2 місяці. Після відведення кар'єрних вод за даними гідрогеологічної служби кар'єру встановлюються основні точки прибуття підземних вод і виконується їх тампонування загальновідомими розчинами, стійкими до високомінералізованих вод. Підготовка закладного матеріалу та закладних сумішей здійснюється безпосередньо на розвантажувальному пункті станції «Янісоль». Закладні роботи розпочинаються з доставки на склад сталеплавильних шлаків для формування донного закладного шару, де за допомогою навантажувача фронтального CASE 1121F з ємністю ковша 4,0 м<sup>3</sup> здійснюється навантаження матеріалу у автосамоскиди Scania G480 вантажопідйомністю 40 т, необхідна кількість яких складає 4 одиниці.

Довжина транспортування автосамоскидами Scania G480 від пункту навантаження до кар'єру складає 1,8 км у вантажному стані, й 1,8 км – в порожньому; 15 хв – навантаження – розвантаження; швидкість самоскиду – 30 км/год; 40 хв – організаційні заходи; тривалість рейсу – 21 хв; кількість рейсів на добу – 137 шт. Це забезпечить доставку у вироблений простір кар'єру добового об'єму закладного матеріалу у кількості 5480 т.

Загальний вигляд навантажувально-транспортних засобів механізації для поводження із закладним матеріалом наведено на Рисунку 4.6. Безпосереднє формування закладного масиву здійснюється у виробленому просторі кар'єру. Автосамоскиди доставляють сталеплавильні шлаки у днище кар'єру, де здійснюється їх розвантаження.



Рисунок 4.6. – Загальний вигляд автосамоскида Scania G480 (а)  
та навантажувача фронтального CASE 1121F (б)

У кар'єрі функціонує бульдозер типу Четра Т25 вагою 50 т, який здійснює технологічні операції з розрівнювання доставленого сталеплавильного шлаку по площі днища кар'єру, призводячи тим самим до його ущільнення під дією власної ваги (Рис. 4.7). Формування донного закладного шару потрібно здійснювати на висоту 8 м, яка обґрунтовується підняттям рівня підземних вод до природного. Встановлено, що сталеплавильний шлак безпечніший за доменний відвальний, тому виступає як герметичний шар, враховуючи його ущільнення.



Рисунок 4.7 – Загальний вигляд бульдозеру Четра Т25

Після заповнення днища кар'єру сталеплавильними шлаками здійснюється підготовка основної наповнювальної закладної суміші, з якої буде сформовано 85% всього закладного масиву. Дослідженнями встановлено раціональний склад основної наповнювальної суміші, яка на 70% складається з доменного відвального шлаку та на 30% – зі сталеплавильного. Змішування зазначених компонентів відбувається наступним чином. Потяг з вагонами на станції «Сортувальна» формується за наступною схемою – 2 вагони з доменним шлаком і 1 вагон зі сталеплавильним. На станцію «Янісоль» тягач доставляє вагони, які розвантажуються поступово. При розвантаженні двох вагонів з доменним шлаком і одного вагону зі сталеплавильним відбувається їх змішування і навантажувач виконує навантаження вже змішаної маси доменних і сталеплавильних шлаків. При транспортуванні у автосамоскидах суміш додатково перемішується. Закладний масив формується до половини 5 уступа кар'єру. Схематичне представлення процесів формування донного та основного шару закладного масиву представлено на Рисунку 4.8. Після формування основного наповнювального закладного масиву виконуються операції із завершення технічного етапу рекультивації – формується шлако-ґрунтова суміш з різних видів шлаків та розкривних порід, що розташовані біля кар'єру, у пропорції 50:50. Після укладання шлако-ґрунтової суміші доцільно розмістити суміш суглинків та супісєй з наступним укладанням родючого шару. Закладний масив з цією сумішшю укладається за 5 м до нульової відмітки денної поверхні.

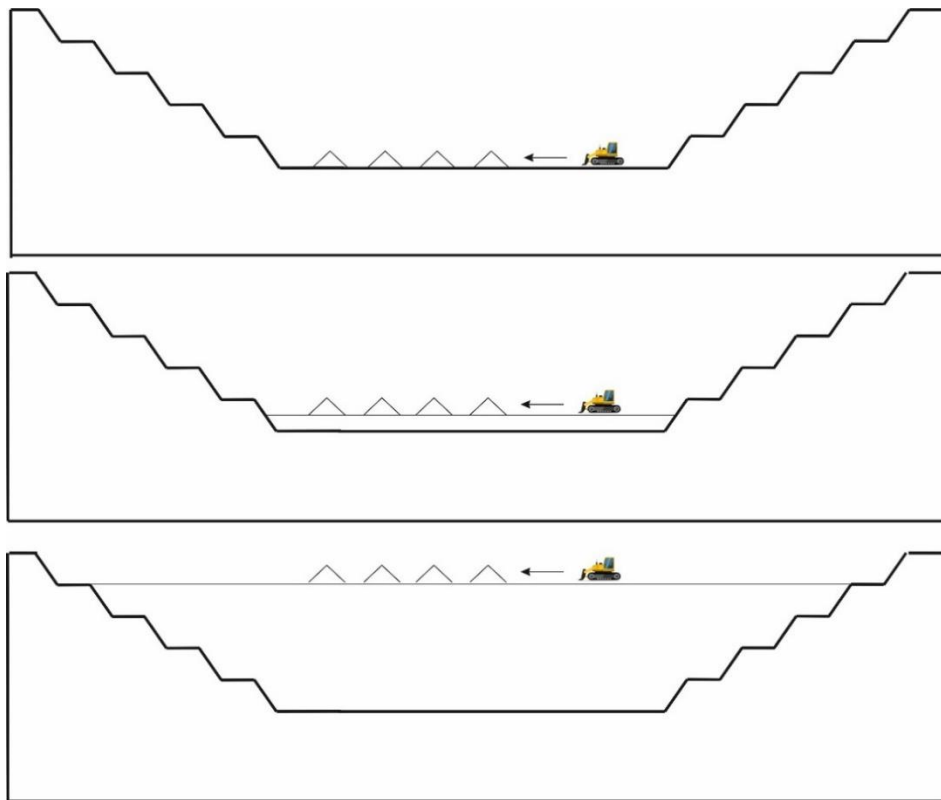


Рисунок 4.8 – Схематичне представлення процесу поступового формування закладного масиву у виробленому просторі кар'єру

Для визначення обсягів закладання виробленого простору та утилізації металургійних шлаків була побудована 3D-модель виробленого простору кар'єру. За допомогою спеціальних функцій визначено об'єм складових частин (уступів) пустот кар'єру (Рис. 4.9).



Рисунок 4.9 – 3D-модель об'ємів виробленого простору Каранського кар'єру

Аналіз Рисунка 4.9 показує, що об'єм утворених кар'єрних пустот, що підлягають закладанню до відмітки «0» за рівнем Балтійського моря, складає близько 13,0 млн м<sup>3</sup>. Оперування даними об'ємів пустот за кожним уступом дозволяє детально оцінити об'єми доменних відвальних і сталеплавильних шлаків, які можуть бути закладені й утилізовані.

Ефективне закладання виробленого простору Каранського кар'єру забезпечується комплексом встановлених раціональних параметрів його формування, які наведено у Таблиці 4.1 [1 – 3].

Таблиця 4.1 – Узагальнені раціональні параметри формування закладного масиву Каранського кар'єру

Тип закладного масиву	Вид матеріалу	Склад, %	Висота, м	Щільність, т/м <sup>3</sup>	Обсяг закладного матеріалу, млн т	Час, роки
Донний шар	Сталеплавильний шлак	100	8,0 (1 уступ)	1,8	2,25	1,14
Основна наповнювальна суміш	Доменний та сталеплавильний шлаки	70:30	47,0 (1 – 5 уступи)	1,63	19,2	9,7
Шлако-грунтова суміш	Доменні шлаки, розкривні породи	50:50	5,0 (5 уступ)	1,5	0,52	0,26

Загальне схематичне представлення сформованого закладного масиву представлено на Рисунку 4.10.

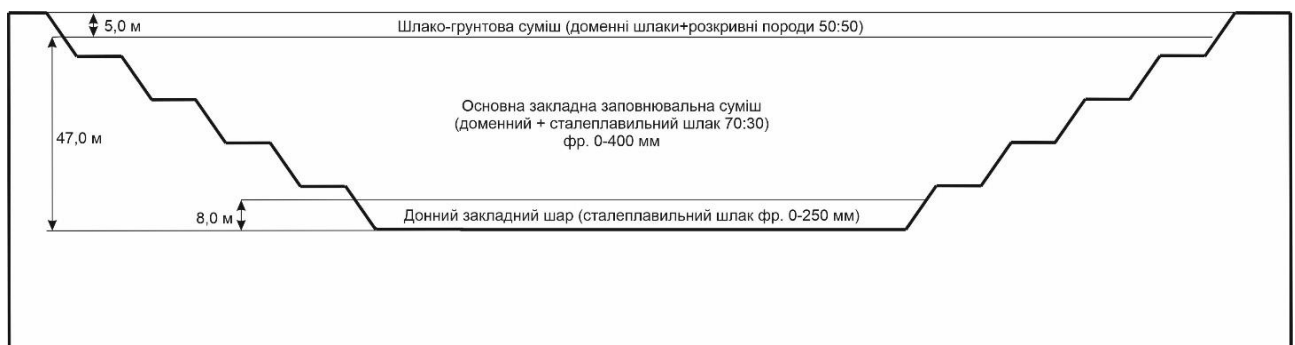


Рисунок 4.10 – Закладний масив Каранського кар'єру №2



Розроблена технологія формування закладного масиву на основі металургійних шлаків дозволяє:

- відновити 50 га цінних земель;
- утилізувати 22 млн т металургійних шлаків протягом 11 років;
- використовувати відновлену площу земель для будівництва промислових і цивільних об'єктів з дотриманням безпечних умов щодо критичних осідань денної поверхні.

#### **4.3. Визначення економічної ефективності утилізації металургійних шлаків при формуванні закладного масиву кар'єрних пустот**

Формування закладного масиву у Каранському кар'єрі №2 за рахунок доменних і сталеплавильних шлаків дозволить досягти природоохоронного ефекту, як наприклад, їх безпечної утилізації як рекультиванту техногенно порушених земель гірничими роботами та відновлення господарської цінності земельної ділянки, а також запобігання утворенню нових місць видалення відходів (МВВ) для розміщення шлакових відвалів ПрАТ «ММК ім. Ілліча» у майбутньому на нових земельних ділянках. Щорічні обсяги утворення металургійних шлаків ПрАТ «ММК ім. Ілліча», які можуть бути використані як закладні матеріали кар'єрних пустот, зведені в Таблицю 4.2. За проведеними розрахунками повний час закладання кар'єру №2 об'ємом 13 млн м<sup>3</sup> складе 11 років.

Таблиця 4.2 – Щорічні обсяги утворення металургійних шлаків ПрАТ «ММК ім. Ілліча», придатні до закладання

Вид шлакового матеріалу	Кількість, млн т
Шлак доменний відвальний (фр. 0 – 400 мм)	1,4
Шлак сталеплавильний (фр. 0 – 250 мм)	0,6

Для визначення економічного ефекту порівнюються два альтернативних варіанти поводження із утворюваними металургійними шлаками:

1. *Базовий варіант* передбачає формування нового шлакового відвалу обсягом 22 млн т на новому МВВ, розташованому на земельній ділянці 50 га біля діючого МВВ балка Грековата. Інтенсивність видалення шлаків у нове МВВ складає 2 млн т/рік, з розрахунковою експлуатацією МВВ протягом 11 років. Необхідні інвестиції для базового варіанту: роботи зі зняття родючого шару (чорнозему); укладання протифільтраційного екрану (гідроізоляції); спорудження зливових каналів та ставка-випарника; встановлення мережі освітлення; облаштування мережі спостерігаючих свердловин; будівництво під'їзної дороги та облаштування КПП. Крім того, у базовому варіанті виникають експлуатаційні витрати: транспортування шлаків з комбінату до МВВ; екологічний податок на розміщення металургійних шлаків у МВВ; екологічний податок на викиди в атмосферу від роботи спецтехніки; пересування транспорту та розвантаження шлаків; витрати палива на роботу техніки; орендна плата за користування земельною ділянкою; і, нарешті, роботи з рекультивації МВВ після вичерпання його проектної ємності.

2. *Рекомендований варіант* передбачає використання шлаків як закладних сумішей (рекультиванту) у виробленому просторі Каранського кар'єру №2 в обсязі 2 млн т/рік, тобто протягом 11 років. Обсяг закладного масиву складає 22 млн т. Необхідні інвестиції для рекомендованого варіанту включають: відкачування води з кар'єру №2 та встановлення постійного водовідведення; будівництво розвантажувальної естакади на станції «Янісоль» (на території кар'єру); придбання фронтального навантажувача, бульдозера та автосамоскидів. Експлуатаційні витрати: транспортування залізницею закладного матеріалу від ПрАТ «ММК ім. Ілліча» (станція «Сортувальна», м. Маріуполь) до Каранського кар'єру №2 (станція «Янісоль»); розвантаження вагонів та вивезення шлаків до кар'єру №2; пошарове планування шлаків бульдозером у виробленому просторі Каранського кар'єру; екологічний податок за викиди від роботи спецтехніки; пересування транспорту та розвантаження шлаків; укладання закладного матеріалу в кар'єрі; витрати палива на роботу техніки; роботи з рекультивації поверхні після закладання шлаками кар'єру №2 (технічної рекультивації).

Розраховується баланс витрат у базовому та рекомендованому варіантах розміщення шлаків протягом 11 років.

Очікуваний економічний ефект від використання шлакових матеріалів для формування закладного масиву Каранського кар'єру №2 може бути розрахований за формулою:

$$E = V_{II} - V_I, \text{ грн}, \quad (4.1)$$

де:  $V_{II}$  – основні витрати у рекомендованому варіанті із закладанням металургійних шлаків при технічній рекультивації кар'єру, грн;

$V_I$  – основні витрати у базовому варіанті з розміщенням металургійних шлаків у новому МВВ, грн;

Основні витрати у рекомендованому варіанті можуть бути укрупнено розраховані за формулою:

$$V_{II} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5, \text{ грн}, \quad (4.2)$$

де:  $V_1$  – витрати на транспортування закладного матеріалу з ПрАТ «ММК ім. Ілліча» (станція «Сортувальна») до кар'єру (станція «Янісоль»), грн;

$V_2$  – витрати на спорудження розвантажувальної естакади для шлаків на станції «Янісоль», грн (за попередніми розрахунками – 12 млн грн);

$V_3$  – витрати на придбання навантажувача, автосамоскидів і бульдозера для навантаження, транспортування та укладання закладного матеріалу в кар'єрі, грн;

$V_4$  – витрати на дизельне паливо для техніки, грн;

$V_5$  – витрати на відкачування води з кар'єру №2 (за попередніми розрахунками – 10 млн грн).

Витрати на перевезення закладного матеріалу залізницею (70 км) від ПрАТ «ММК ім. Ілліча» (станція «Сортувальна», м. Маріуполь) до Каранського кар'єру №2 (станція «Янісоль», смт. Мирне) складуть:

$$V_1 = Q \cdot A_{доб} \cdot N_{дн}, \text{ грн}, \quad (4.3)$$

де:  $Q$  – вартість послуги перевезення 1 т шлаків у напіввагоні ємністю 69 т на відстань 70 км з урахуванням витрат на формування маршрутів і розвантаження (75 грн/т);

$A_{доб}$  – обсяг перевезення закладного матеріалу за добу, т (5480 т);

$N_{дн}$  – кількість календарних днів на рік (365 днів).

Витрати на придбання 4-х одиниць автосамоскидів Scania G480, 1 одиниці бульдозеру Четра Т25 та навантажувача фронтального CASE 1121F для навантаження, транспортування й укладання закладного матеріалу в кар'єрі визначається за формулою:

$$V_2 = (Q_1 \cdot n_1) + (Q_2 \cdot n_2) + (Q_3 \cdot n_3), \text{ грн}, \quad (4.4)$$

де:  $Q_1, Q_2, Q_3$  – вартість автосамоскиду Scania G480, бульдозеру Четра Т25 й навантажувача фронтального CASE 1121F, грн (відповідно 2,5 млн грн/од; 3,6 млн грн/од; 4 млн грн/од);

$n_1, n_2, n_3$  – кількість одиниць за технологією, шт.

Витрати на дизельне паливо для автосамоскидів Scania G480 можуть бути розраховані за формулою:

$$V_{4.1} = Q \cdot C \cdot N_{дн} \cdot n, \text{ грн/рік}, \quad (4.5)$$

де:  $Q$  – витрати дизельного палива автосамоскидами Scania G480, разом – 219,2 л/добу (при питомих витратах палива 50 л/100 км). Добова довжина транспортування від пункту навантаження до кар'єру визначається з урахуванням відстані 1,8 км від розвантаження до кар'єру у вантажному стані та 1,8 км – в порожньому стані; 15 хв – навантаження – розвантаження; швидкість самоскиду – 30 км/год; 10 хв – прийом - здача зміни; обід – 30 хв; тривалість рейсу – 21 хв; кількість рейсів на добу – 137 шт; довжина перевезень – 438,4 км/добу; витрати палива – 219,2 л/добу);

$C$  – вартість дизельного палива (30 грн/л);

$N_{дн}$  – кількість календарних днів на рік (365 днів);

$n$  – кількість років (11 років).

Витрати на дизельне паливо за 11 років:

$$V_{4.1} = 219,2 \cdot 30 \cdot 365 \cdot 11 = 26402640 \text{ грн/рік}.$$

Норма витрати палива для бульдозера Четра Т25 визначається за формулою:

$$Q = N_1 / (1000 \cdot R_1 \cdot k_1), \text{ л/год} \quad (4.6)$$

де:  $Q$  – питома витрата палива бульдозера Четра Т25 (231 г/кВт·год);

$N_1$  – потужність двигуна (300 кВт);

$R_1$  – щільність дизельного палива (0,85 кг/дм<sup>3</sup>);

$k_1$  – коефіцієнт, що характеризує процентне співвідношення часу роботи при максимальній частоті обертання коленвалу двигуна.

Наприклад, якщо час роботи з максимальним навантаженням становить 30% зміни, коефіцієнт буде 2,3 (70% : 30% = 2,3). В нашому випадку приймаємо 20%, коефіцієнт буде рівний 4,0.

$$Q = 300 \cdot 231 / (1000 \cdot 0,85 \cdot 4) = 20,38 \text{ л/год.}$$

Тоді витрати на дизельне паливо для бульдозерів Четра Т25 за 11 років можуть бути розраховані за формулою:

$$V_{4.2} = Q \cdot C \cdot n_{год} \cdot N_{дн} \cdot N_p \cdot n, \quad (4.7)$$

де:  $Q$  – витрати дизельного палива бульдозеру, л/год ( $Q = 20,38$  л/год).

Добовий час укладання закладного матеріалу в кар'єрі розраховується з урахуванням 10 хв – прийом – здача зміни; кількість змін – 3 тривалістю 8 год; обід – 30 хв; коефіцієнт готовності – 0,9. Загальний час укладання закладного матеріалу – 13,8 год;

$C$  – вартість дизельного палива (30 грн/л);

$n_{год}$  – кількість робочих годин на добу (13,8 год);

$N_{дн}$  – кількість календарних днів на рік (365 днів);

$N_p$  – кількість років (11 років);

$n$  – кількість одночасно працюючих бульдозерів (1 шт).

$$V_{4.2} = 20,38 \cdot 30 \cdot 13,8 \cdot 365 \cdot 11 \cdot 1 = 33875840 \text{ грн.}$$

Норма витрат палива для навантажувача Case 1121F визначається за формулою:

$$Q = N_2 / (1000 \cdot R_2 \cdot k_2), \text{ л/год} \quad (4.7)$$

де:  $Q$  – питома витрата палива навантажувача Case 1121F (210 г/кВт·год);

$N_2$  – потужність двигуна (236 кВт);

$R_2$  – щільність дизельного палива (0,85 кг/дм<sup>3</sup>);

$k_2$  – коефіцієнт, що характеризує процентне співвідношення часу роботи при максимальній частоті обертання коленвала двигуна.

Наприклад, якщо час роботи з максимальним навантаженням складає 30% зміни, то коефіцієнт буде дорівнювати 2,3 (70% : 30% = 2,3). В нашому випадку приймаємо 20%, коефіцієнт буде 4,0.

$$Q = 236 \cdot 210 / (1000 \cdot 0,85 \cdot 4) = 14,6 \text{ л/год.}$$

Витрати на дизельне паливо для навантажувача Case 1121F можуть бути розраховані за формулою:

$$V_{4.3} = Q \cdot C \cdot n_{год} \cdot N_{дн} \cdot n, \text{ грн/рік,} \quad (4.8)$$

де:  $Q$  – витрати дизельного палива навантажувача, л/год ( $Q = 14,6$  л/год). Добовий час навантаження закладного матеріалу у кар'єрі розраховується з урахуванням 10 хв – прийом – здача зміни; кількість змін – 3 тривалістю 8 год; обід – 30 хв; коефіцієнт готовності – 0,9. Час роботи навантажувача з максимальною інтенсивністю на добу – 20%. Загальний час навантаження закладного матеріалу – 20,7 год.

$C$  – вартість дизельного палива (30 грн/л);

$n_{год}$  – кількість робочих годин на добу (20,7 год);

$N_{дн}$  – кількість календарних днів на рік (365 днів);

$n$  – кількість одночасно працюючих навантажувачів (1 шт).

$$V_{4.3} = 14,6 \cdot 30 \cdot 20,7 \cdot 365 \cdot 11 \cdot 1 = 36402399 \text{ грн.}$$

Основні витрати у базовому варіанті розміщення металургійних шлаків у МВВ можуть бути укрупнено розраховані:

$$V_{II} = V'_1 + V'_2 + V'_3 + V'_4 + V'_5, \text{ грн,} \quad (4.9)$$

де:  $V'_1$  – витрати на підготовку та облаштування ділянки МВВ для розміщення металургійних шлаків площею 50 га (зняття родючого шару ґрунту, протифільтраційний екран, злилові канами та ставок-випарник, освітлення, під'їзна дорога та КПП; за попередніми підрахунками – 180 млн грн);

$V_2$  – витрати на транспортування шлаків з комбінату до МВВ; грн/т (оцінюються в 60 грн/т);

$V_3$  – витрати на сплату екологічного податку на розміщення металургійних шлаків ПрАТ «ММК ім. Ілліча» у спеціально відведених місцях (відвалах), грн/рік;

$V_4$  – витрати на оренду земельної ділянки нового МВВ для складування шлаків розміром 50 га, грн/рік (оцінюються у 0,6 млн грн/рік);

$V_5$  – витрати на дизельне паливо для бульдозеру на МВВ.

Екологічний податок за викиди в атмосферу від транспортування та розвантаження шлаків (продукти згоряння палива від вантажівок і спецтранспорту) складає  $\approx 70$  тис. грн/рік і буде приблизно рівноцінним для обох варіантів.

Розрахунки витрат за рекомендованим та базовим варіантами протягом терміну в 11 років зведено у Таблиці 4.3 та 4.4.

Таблиця 4.3 – Розрахункові витрати у рекомендованому та базовому варіантах поводження з металургійними шлаками протягом 11 років

Витрати	Значення, грн
<i>Рекомендований варіант</i>	
Транспортування 22 млн т шлаків залізницею	1 650 000 000
Осушення кар'єру №2	10 000 000
Спорудження розвантажувальної естакади	12 000 000
Придбання навантажувача, автосамоскидів та бульдозера	17 600 000
Дизельне паливо для техніки	96 680 879
Біологічна рекультивация ділянки кар'єру №2	25 000 000
<b>Разом (рекомендований варіант)</b>	<b>1 810 380 879</b>
<i>Базовий варіант</i>	
Витрати на підготовку нового МВВ	180 000 000
Транспортування шлаків з комбінату до нового МВВ	1 320 000 000
Дизельне паливо для бульдозеру на МВВ	33 875 840
Біологічна рекультивация МВВ	100 000 000
Екологічний податок за розміщення шлаків у МВВ	330 000 000
Витрати на за оренду земельної ділянки МВВ	6 600 000
<b>Разом (базовий варіант)</b>	<b>1 970 475 840</b>

Таблиця 4.4 – Питомі витрати на поводження із металургійними шлаками при двох варіантах

Параметр	Питомі витрати, грн	
	Закладна суміш для рекультивації кар'єру	Розміщення у новому МВВ
<b>Питомі за 1 рік (2 млн т шлаків):</b>		
Загальні	1 810 380 879	1 970 475 840
на 1 тону	82,29	89,56

Аналіз Таблиці 4.3 показує, що при порівнянні двох способів поводження з металургійними шлаками варіант із закладними сумішами у виробленому просторі Каранського кар'єру №2 вигідніше на 7,27 грн/т, ніж варіант із розміщенням шлаків у новому місці видалення відходів.

Після завершення технічної рекультивації кар'єру (закладання виробленого простору кар'єру металургійними шлаками) та біологічної рекультивації (нанесення родючого шару зі складу розкривних порід) буде відновлено 50 га земель, які можуть бути використанні у різних напрямках – сільськогосподарському, промисловому, лісогосподарському, рекреаційному тощо. Перспективним напрямком може бути використання рекультивованої земельної ділянки під відновлювальну енергетику (сонячні панелі).

Далі в роботі розраховується нормативна грошова оцінка відновленої земельної ділянки площею 50 га на прикладі її промислового використання. Відновлена земельна ділянка Каранського кар'єру №2 межує з смт. Мирне Донецької області, що входить до Мирненської громади. Чисельність населення селища складає близько 1700 осіб.

Нормативна грошова оцінка земельної ділянки ( $C_n$ ) визначається згідно з документом «Методика нормативної грошової оцінки земельних ділянок» (Методика Кабінету Міністрів України) [4] за формулою:

$$C_n = P_0 \cdot H_{p0} \cdot K_{m1} \cdot K_{m2} \cdot K_{m3} \cdot K_{m4} \cdot K_{cn} \cdot K_{mc} \cdot K_{ni}, \text{ грн}, \quad (4.10)$$

де:  $P_0$  – площа земельної ділянки, м<sup>2</sup>; площа відновленої поверхні виробленого простору Каранського кар'єру №2 складатиме 50 га або 500000 м<sup>2</sup>;



$H_{pd}$  – норматив капіталізованого рентного доходу за одиницю площі, грн/м<sup>2</sup>; приймається 76 грн/м<sup>2</sup> згідно Додатку 1 Методики [4], адже чисельність населення у смт. Мирне складає 1700 осіб;

$K_{m1}$  – коефіцієнт, який враховує розташування громади в межах зони впливу великих міст; приймається  $K_{m1} = 1,0$  згідно п. 6 Методики [4], адже смт. Мирне розташовано поза зоною впливу великих міст;

$K_{m2}$  – коефіцієнт, який враховує курортно-рекреаційне значення населених пунктів; приймається  $K_{m2} = 1,0$  згідно п. 7 Методики [4], адже смт. Мирне не має курортно-рекреаційного значення;

$K_{m3}$  – коефіцієнт, який враховує розташування громади в межах зон радіаційного забруднення; приймається  $K_{m3} = 1,0$  згідно п. 8 Методики [4], адже смт. Мирне не входять до зон радіаційного забруднення;

$K_{m4}$  – коефіцієнт, який характеризує зональні фактори місцеположення земельної ділянки; приймається  $K_{m4} = 1,0$  згідно п. 10 Методики [4], адже в зоні розташування смт. Мирне відсутня магістральна транспортна, нафтогазова та електрична інфраструктури;

$K_{cp}$  – коефіцієнт, який враховує цільове призначення земельної ділянки відповідно до відомостей Державного земельного кадастру; приймається  $K_{cp} = 1,2$  згідно Додатку 8 Методики [4], адже відновлена земельна ділянка планується під промислове використання – для розміщення та експлуатації основних, підсобних і допоміжних будівель та споруд підприємств переробної, машинобудівної або іншої галузі промисловості;

$K_{mc}$  – коефіцієнт, який враховує особливості використання земельної ділянки в межах категорії земель за основним цільовим призначенням; приймається  $K_{mc} = 0,8$  згідно Додатку 10 Методики [4] при чисельності населення в населеному пункті Донецької області від 1,0 до 5,0 тис. чол.;

$K_{ni}$  – добуток коефіцієнтів індексації нормативної грошової оцінки земель за період від затвердження нормативу капіталізованого рентного доходу до дати проведення оцінки. В розрахунках  $K_{ni}$  не враховується, оскільки норматив капіталізованого рентного доходу буде визначатись після відновлення денної

поверхні під Каранським кар'єром №2 та факту початку її використання за конкретним цільовим використанням.

$$C_n = 500000 \cdot 76 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1,2 \cdot 0,8 = 36480000 = 36,48 \text{ млн грн.}$$

Таким чином, додатковим ефектом може бути вартість земельної ділянки в 36,48 млн грн після завершення закладання пустот і повної рекультивації поверхні.

#### **4.4. Висновки до розділу 4**

В результаті проведення досліджень формування закладного масиву у виробленому просторі Каранського кар'єру №2 на основі комплексу експериментальних і лабораторних досліджень та чисельного моделювання встановлено наступні практичні результати.

Визначено детальний ланцюг необхідних технологічних операцій та процесів від металургійного комбінату ПрАТ «ММК ім. Ілліча» до виробленого простору Каранського кар'єру №2, що передують здійсненню безпосередніх закладних робіт у виробленому просторі кар'єру та обумовлюють їх ефективність і надійність: формування маршрутів із закладним матеріалом на станції «Сортувальна» (м. Маріуполь) – транспортування закладного матеріалу до станції кар'єру «Янісоль» (сmt. Мирне) через проміжну станцію «Карань» (с. Андріївка) – розвантаження закладного матеріалу у спеціальний склад – навантаження закладного матеріалу у автомобільний транспорт – транспортування закладного матеріалу у вироблений простір кар'єру – розвантаження закладного матеріалу у днище кар'єру – формування закладних шарів.

Рекомендовано раціональні параметри формування закладного масиву у виробленому просторі кар'єру: черговість та етапи розміщення закладних матеріалів, вид шлакового матеріалу для формування елементів закладного масиву, компонентний склад основної наповнювальної суміші, висота закладних шарів з їх властивостями, щільність закладного матеріалу, об'єми та терміни закладання.

Визначено, що формування закладного масиву у виробленому просторі кар'єру дозволить наступне: відновити 50 га цінних земель, утилізувати 22 млн т

металургійних шлаків протягом 11 років та використовувати відновлену площу земель для будівництва промислових і цивільних об'єктів з дотриманням безпечних умов щодо критичних осідань денної поверхні.

Виконано техніко-економічне порівняння двох способів поводження із металургійними шлаками, таких як складування шлакових матеріалів на денній поверхні в спеціально відведеному новому місці зберігання відходів та їх використання як закладну суміш у виробленому просторі Каранського кар'єру №2. Встановлено, що економічна ефективність досягається при варіанті формування закладного масиву, який вигідніше на 7,27 грн/т (або 8,2%), ніж варіант із розміщенням у новому місці видалення відходів.

За результатами досліджень опубліковані роботи [1 – 3].

#### **4.5. Список використаних джерел до розділу 4**

1. Filonenko, O. (2020). Substantiation of the parameters for the formation of a filling mass from metallurgical slags in open pit voids. In *Materials of the International Scientific & Practical Conference «Physical & Chemical Geotechnologies»* (p. 61-62). Dnipro, Ukraine.

2. Бондаренко, В.І., Філоненко, О.В., Петльований, М.В., & Руських, В.В. (2021). Обґрунтування використання металургійних шлаків як закладного матеріалу кар'єрних пустот. *Вісті Донецького гірничого інституту*, (2), 15-25. <https://doi.org/10.31474/1999-981X-2021-2-15-25>

3. Філоненко, О.В., & Петльований, М.В. (2021). Технологічні та екологічні особливості заповнення кар'єрних пустот металургійними шлаками. В *Матеріалах XII Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасний рух науки»*, Том 2 (с. 420-422). Дніпро, Україна.

4. *Методика нормативної грошової оцінки земельних ділянок*. (2021). Постанова Кабінету Міністрів України про затвердження Методики від 3.11.2021 року. Київ: Кабінет Міністрів України. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1147-2021-%D0%BF#n107>

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідною роботою, в якій подано вирішення нового наукового завдання з обґрунтування раціональних параметрів формування закладного масиву у виробленому просторі кар'єру на основі встановлених закономірностей зміни продуктів взаємодії закладних матеріалів із металургійних шлаків з кар'єрною водою і характеру зміни їх фізико-механічних характеристик під впливом механічного ущільнення. Досягається безпечність використання металургійних шлаків як закладних матеріалів, мінімізація деформацій при формуванні закладного масиву та ефективне відновлення територій під різноспрямоване використання у промисловості й господарстві.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведений аналіз показав, що близько 10% всіх щорічних накопичень промислових відходів складають відходи переробної промисловості, з яких домінуюче значення з показником 70% займають відходи металургійного виробництва. Визначено, що низький рівень утилізації металургійних шлаків в Україні обумовлений недосконалістю законодавчої бази, де шлаки фігурують як відходи, а не побічний продукт, що юридично обмежує їх використання з екологічної точки зору, а також відсутністю дієвих механізмів стимулювань металургійних підприємств до цільового використання шлаків у різних галузях економіки. Рекомендовано в умовах логістичної ізоляції та відсутності суттєвого ринку збуту шлакової продукції дослідити такий напрям утилізації як закладання виробленого простору кар'єрів шляхом доведення безпечності її впливу на довкілля та визначення раціональних параметрів закладних сумішей.

2. Розроблено комплексний науково-методичний підхід до вирішення наукових завдань, що включає фундаментальні основи механіки сипучого середовища; аналіз якості води методом атомно-емісійної спектроскопії з індуктивно зв'язаною плазмою; фізичне моделювання закладного масиву з дотриманням критеріїв подібності; лабораторні дослідження фізико-механічних та деформаційних характеристик; чисельне моделювання методом скінченних елементів; оцінку економічної ефективності запропонованих рішень.

3. Встановлено, що при контакті 33 – 50% сталеплавильного шлаку з кар'єрною водою зміни концентрацій забруднюючих речовин описуються поліноміальними законами 2-го та 3-го ступенів. При вмісті шлаку 67% динаміка зміни концентрацій речовин від 1 до 30 доби взаємодії з кар'єрною водою таких речовин як TDS,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  відбувається також за поліноміальним законом, а для інших речовин спостерігається здебільшого лінійний характер зниження концентрацій нижче фонових значень. На 30 добу збільшується лише концентрація зависей TSS, але при вторинній витримці їх концентрація на 30 добу знижується. Аналіз всіх забруднюючих речовин при вторинній витримці показує зменшення їх концентрацій у порівнянні з первинною витримкою і доводить встановлення факту відсутності зростання концентрацій небезпечних речовин на 30-ту добу, що усуває небезпеку для водоносного горизонту.

4. Встановлено, що найбільш ефективно та безпечно формування донного закладного масиву у кар'єрних пустотах досягається розміщенням у днище закладного масиву саме сталеплавильних шлаків, що обумовлене наступним: більшою міцністю часток сталеплавильного шлаку та меншою пористістю, що створює жорстку основу закладному масиву; меншим коефіцієнтом фільтрації; відсутністю критичного забруднення підземних вод, що прибуватимуть у днище кар'єру.

5. Встановлено, що глибина проникнення води в закладний масив зі сталеплавильних шлаків зменшується зі ступенем його ущільнення прикладеним навантаженням за поліноміальною залежністю 2-го порядку. Глибина проникнення води в закладний масив у певний проміжок часу пов'язана з коефіцієнтом фільтрації ( $k_f$ ), який від ущільнення закладного масиву навантаженням 0,054 – 0,079 МПа зменшиться у 1,4 – 2,0 рази.

6. Отримана залежність зміни величини усадки суміші доменного відвального та сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30 характеризується більш позитивною динамікою зміни усадки, в контексті її зменшення, ніж використання однокомпонентного складу лише з доменних відвальних шлаків. Величина усадки дослідженої суміші доменного відвального та

сталеплавильного шлаків у співвідношенні 70:30 поліноміально залежить від прикладеного навантаження.

7. Виявлено на основі чисельного моделювання, що закладання з ущільненням ефективніше за «звичайне відсіпання», про що свідчить зниження величини деформацій денної поверхні на 28%. Величина осідань поверхні закладного масиву лінійно залежить від прикладеного навантаження. Збіжність результатів лабораторних досліджень осідань закладного масиву з результатами чисельного моделювання склала 86 – 93%.

8. Рекомендовано раціональні параметри формування закладного масиву у виробленому просторі кар'єру: черговість та етапи розміщення закладних матеріалів, вид шлакового матеріалу для формування елементів закладного масиву, компонентний склад основної наповнювальної суміші, висота закладних шарів з різними властивостями, щільність закладного матеріалу, об'єми та терміни закладання.

9. Вперше розроблено нормативний документ, що пройшов державну експертизу ТУ У 08.1-00191158-002:2020 «Суміші закладні із металургійних шлаків ПрАТ «МК «Азовсталь» та ПрАТ «ММК ім. Ілліча» для технічної рекультивації техногенно порушених земель», що регламентує використання металургійних шлаків як закладних матеріалів при рекультивації виробленого простору кар'єрів.

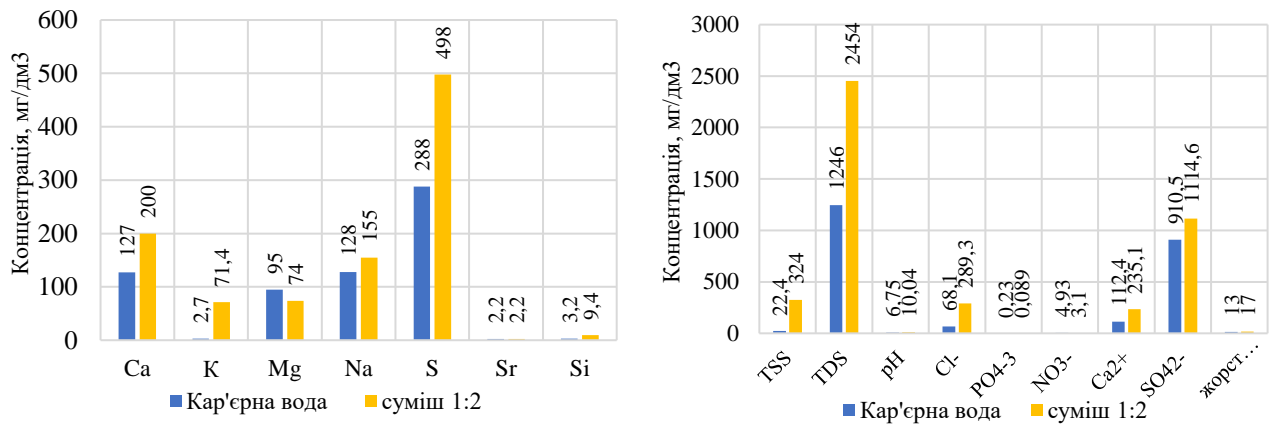
10. Встановлено, що економічна ефективність досягається при варіанті формування закладного масиву, який вигідніше на 7,27 грн/т (або 8,2%), ніж варіант із розміщенням у новому місці видалення відходів. Визначено, що формування закладного масиву у виробленому просторі кар'єру дозволить наступне: відновити 50 га цінних земель, утилізувати 22 млн т металургійних шлаків протягом 11 років та використовувати відновлену площу земель для будівництва промислових і цивільних об'єктів з дотриманням безпечних умов щодо критичних осідань денної поверхні.

## **ДОДАТОК А**

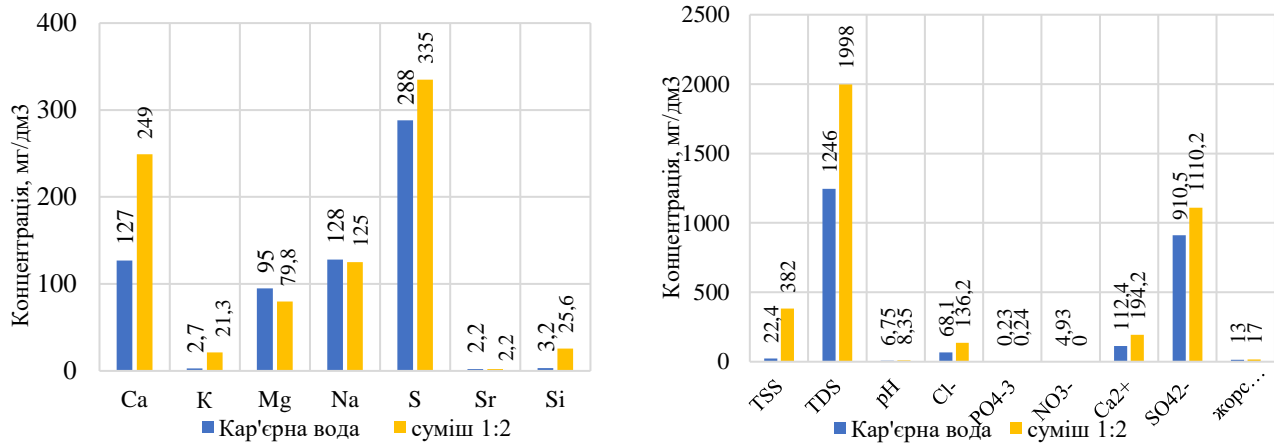
**Результати хімічного аналізу взаємодії  
металургійних шлаків з кар'єрною водою**

(a)

## первинна витримка

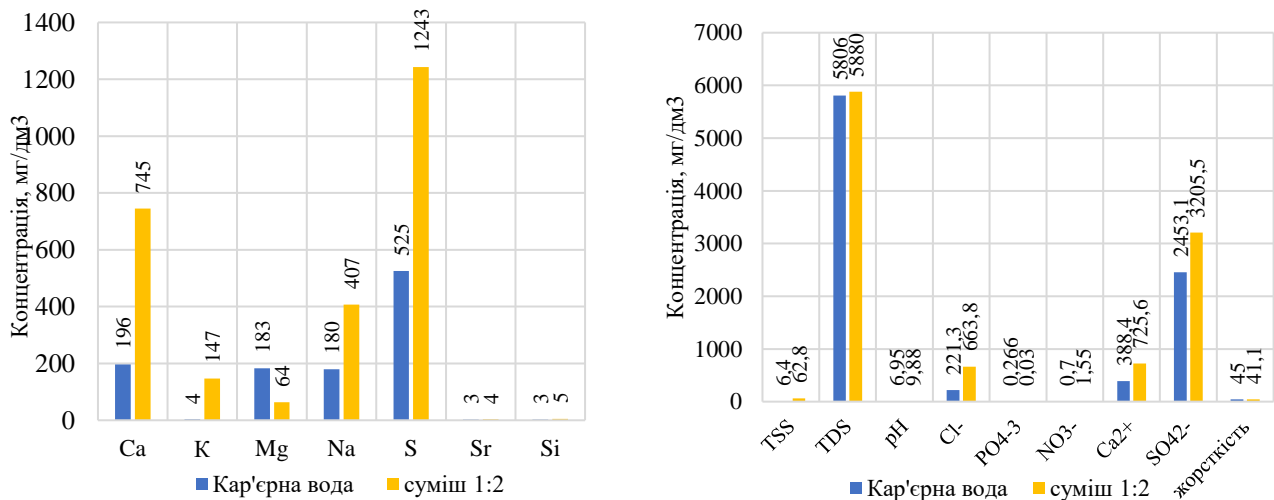


## вторинна витримка



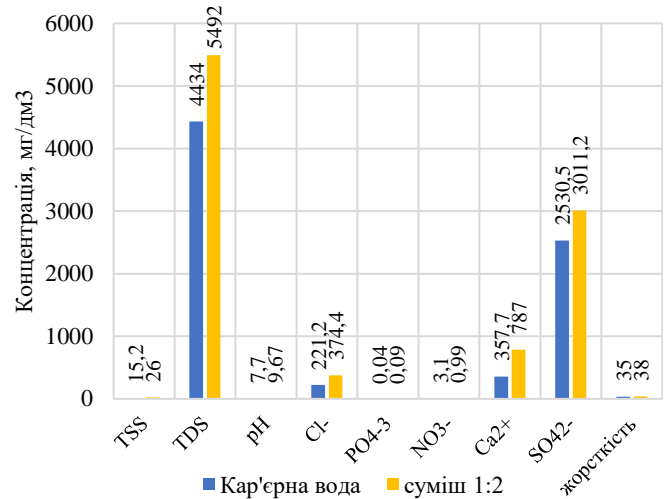
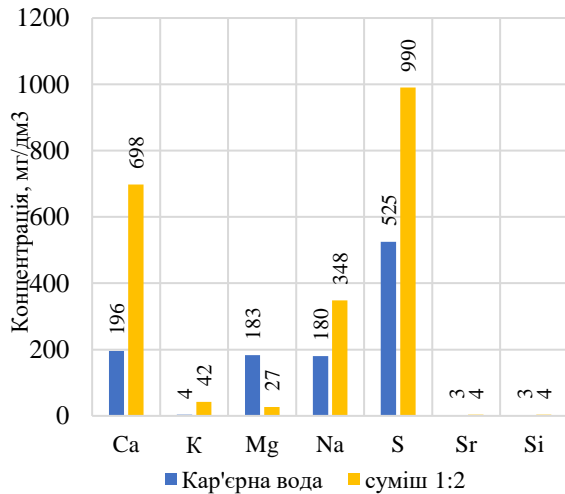
(б)

## первинна витримка



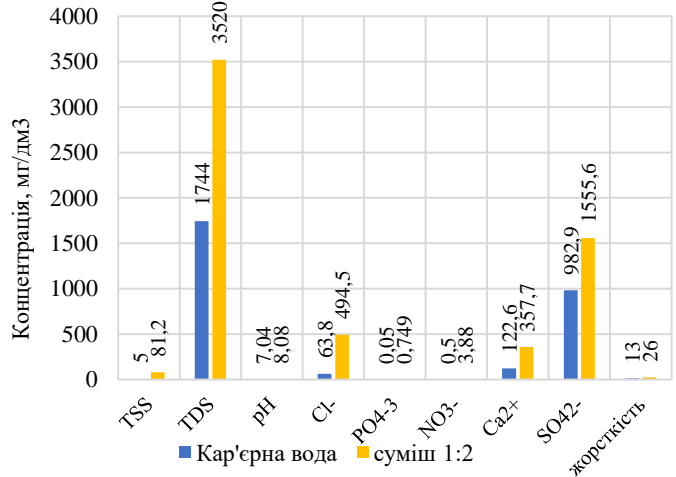
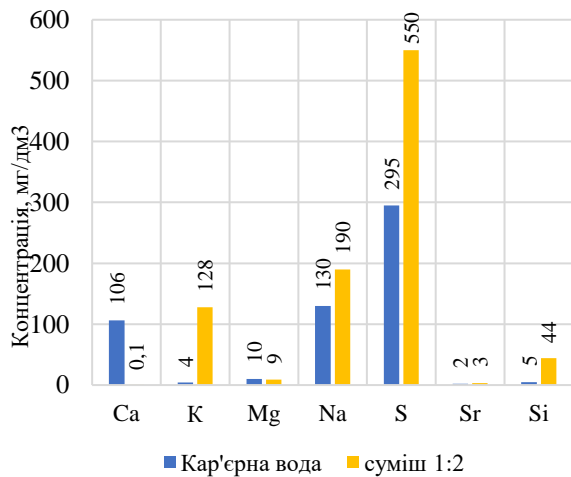


## вторинна витримка

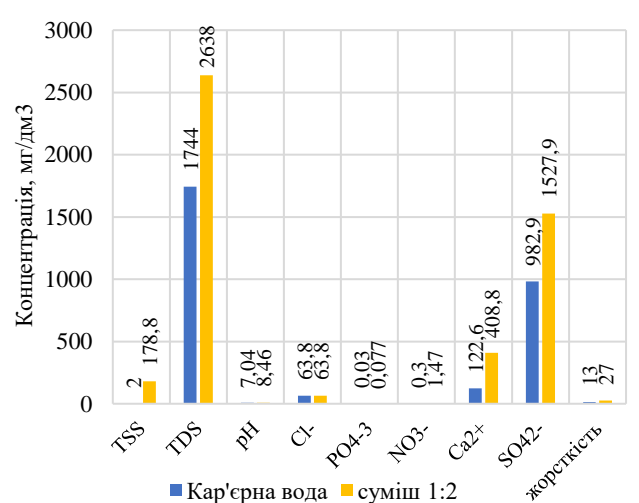
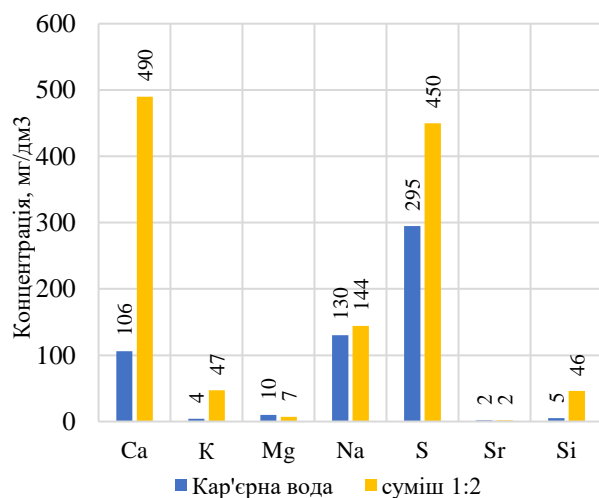


(б)

## первинна витримка



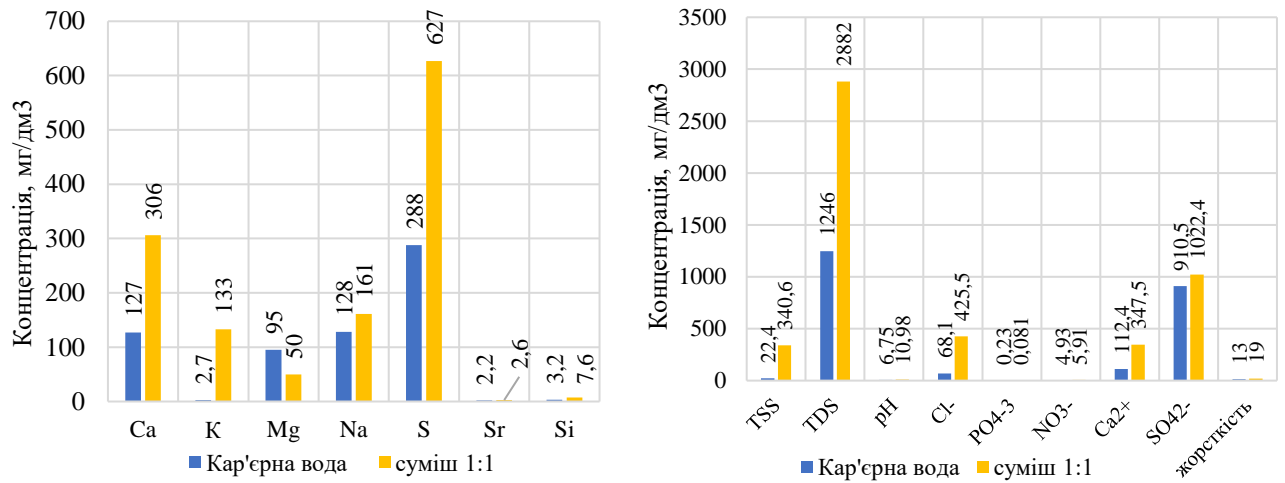
## вторинна витримка



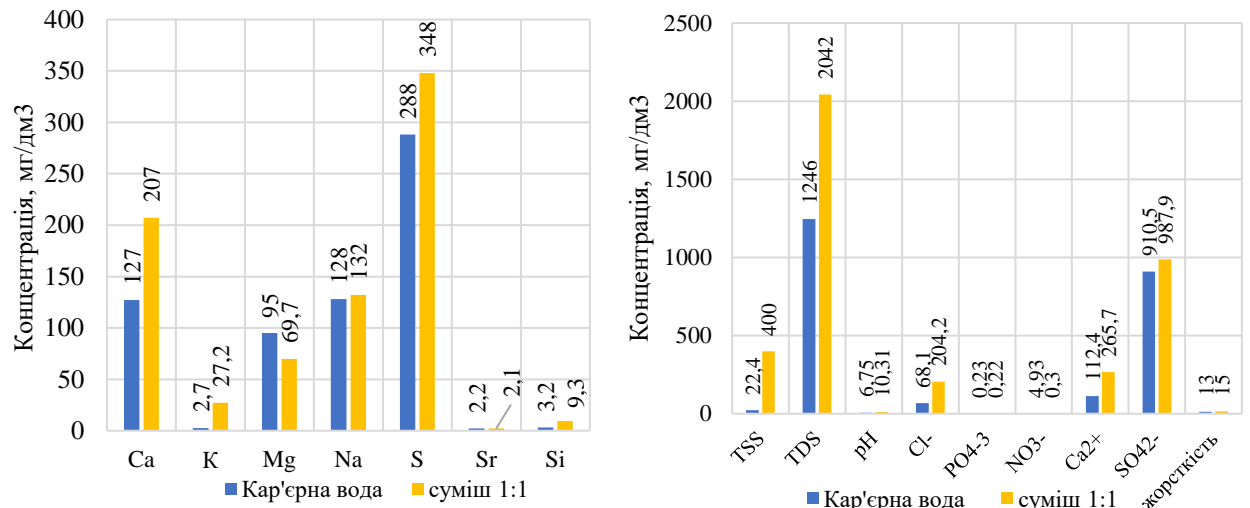
Розподіл хімічних елементів та забруднюючих речовин у кар'єрній воді та її суміші з доменним відвальним шлаком у пропорції 1:2 при термінах 1 доба (а); 15 діб (б); 30 діб (в)

(a)

## первинна витримка

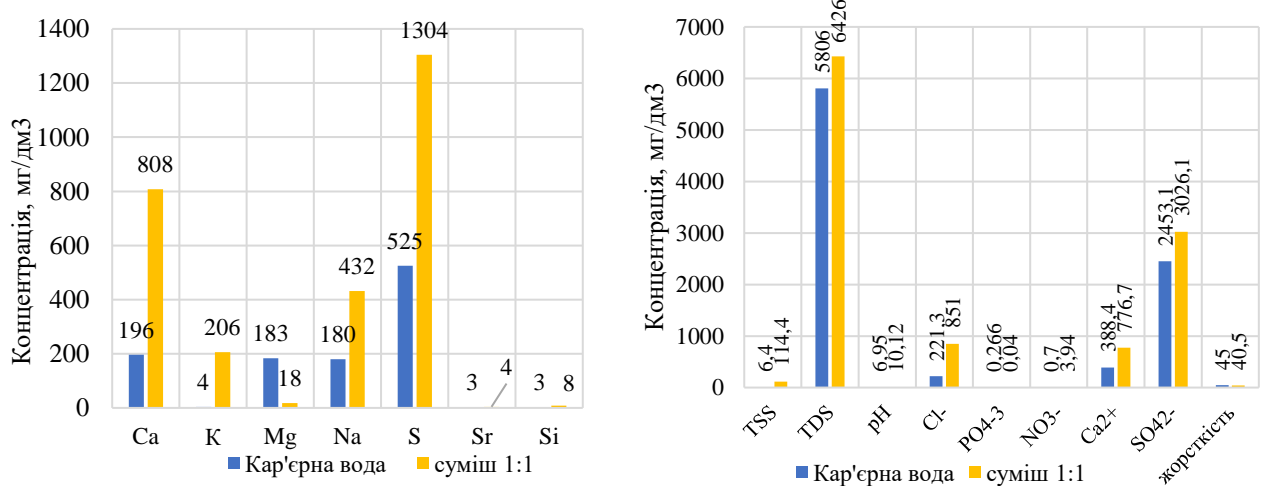


## вторинна витримка

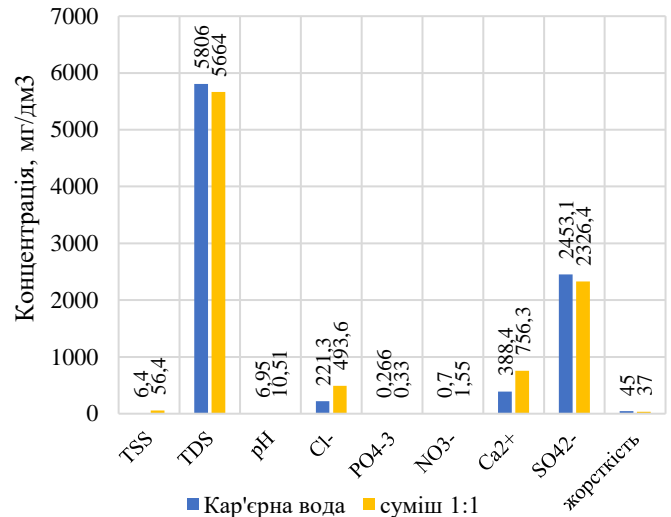
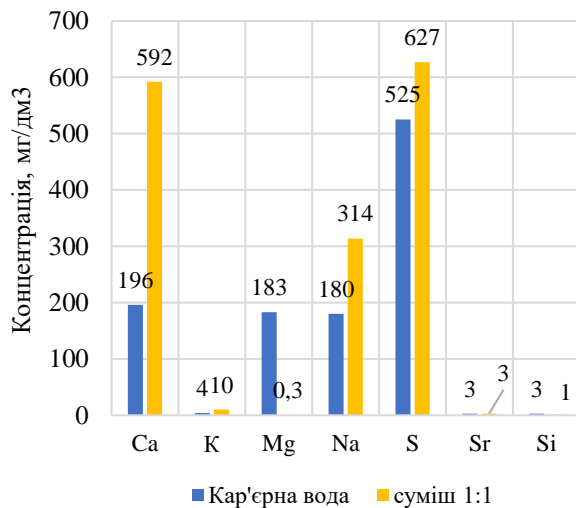


(б)

## первинна витримка

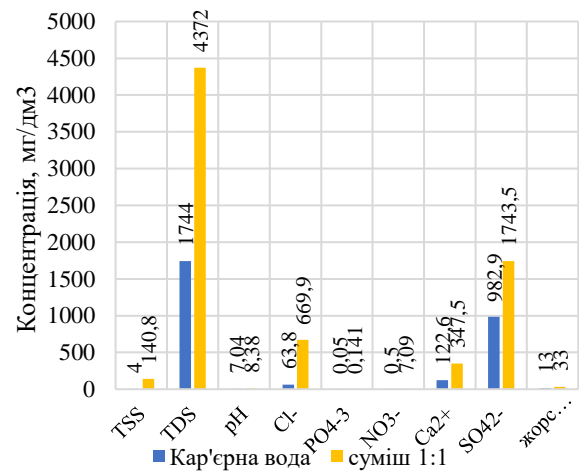
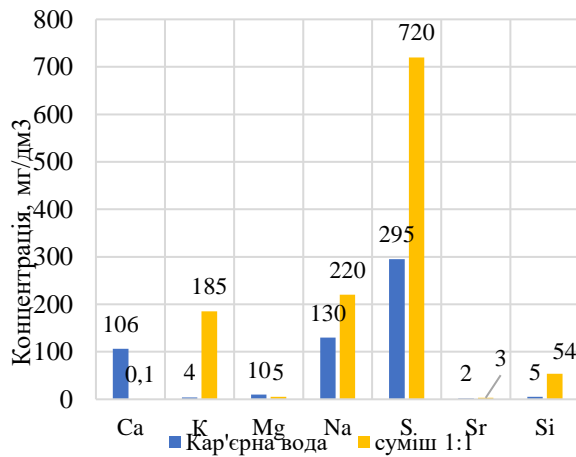


## вторинна витримка

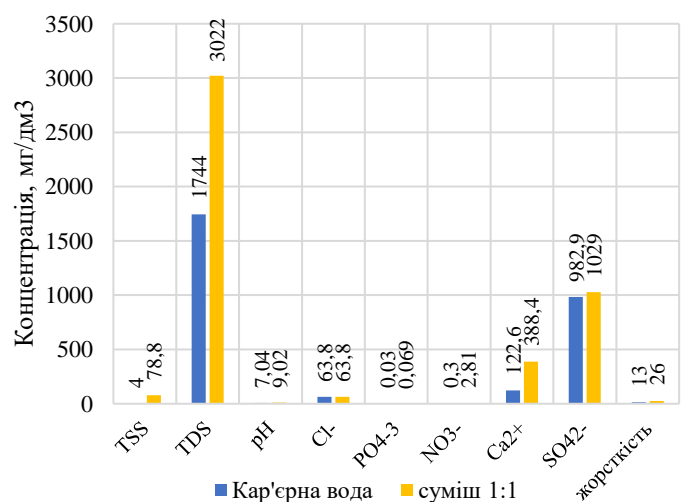
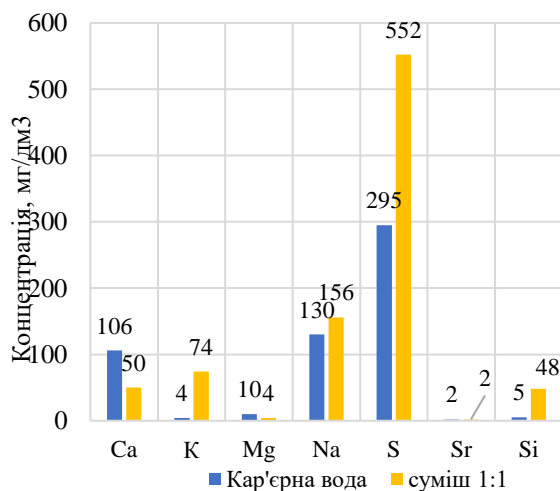


(В)

## первинна витримка

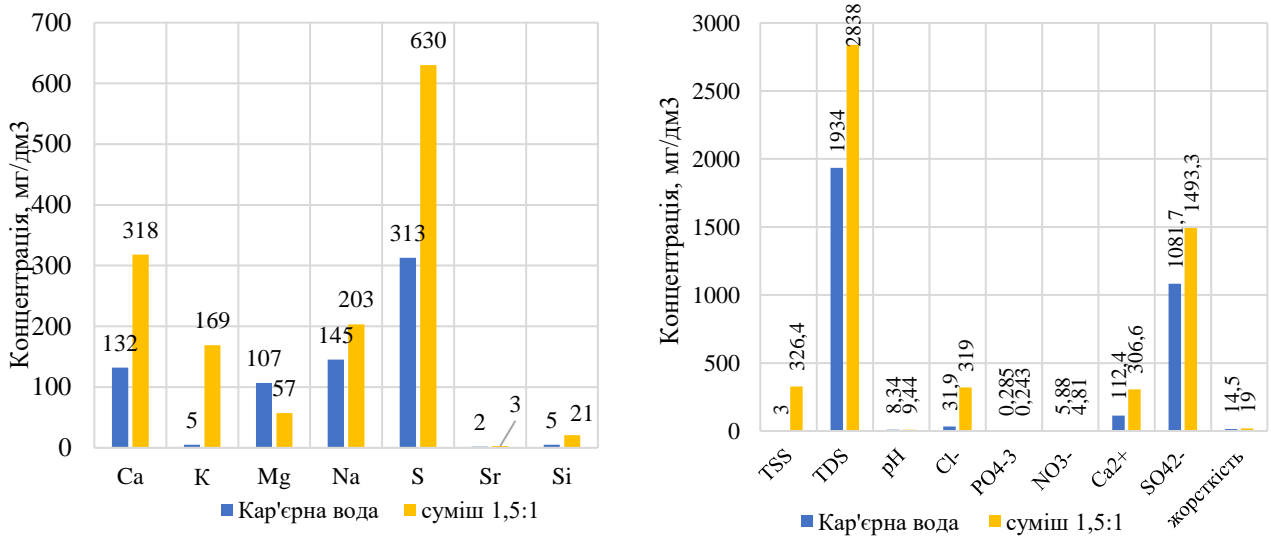


## вторинна витримка

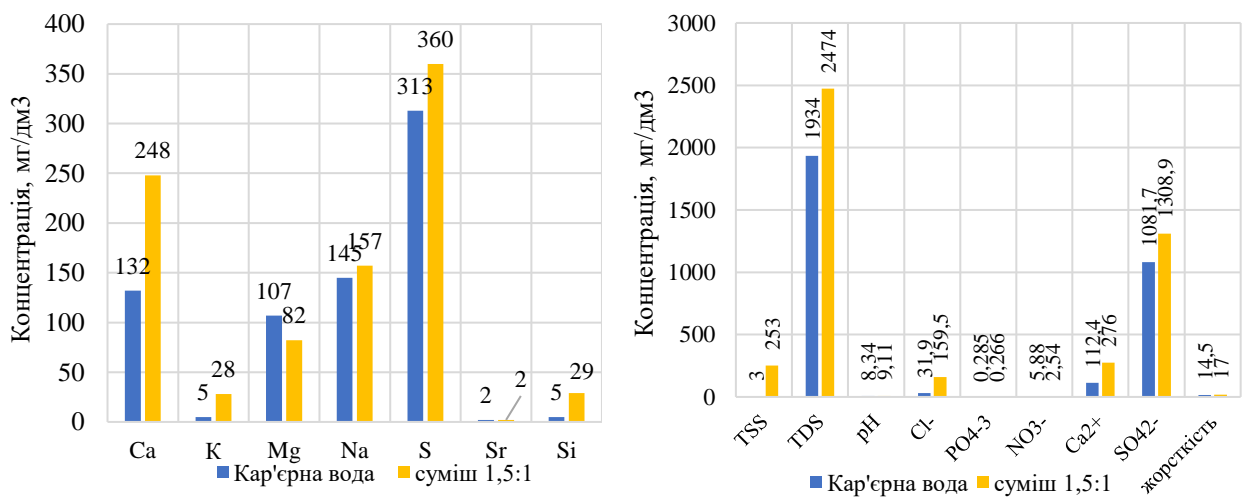


Розподіл хімічних елементів та забруднюючих речовин у кар'єрній воді та її суміші з доменним відвальним шлаком у пропорції 1:1 при термінах 1 доба (а); 15 діб (б); 30 діб (в)

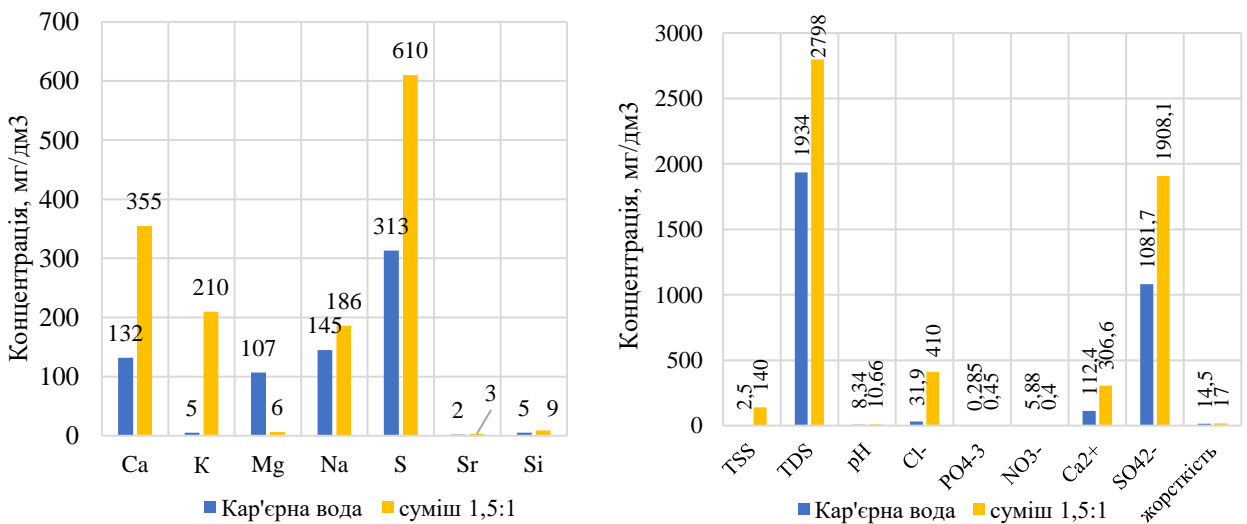
(a)  
первинна витримка



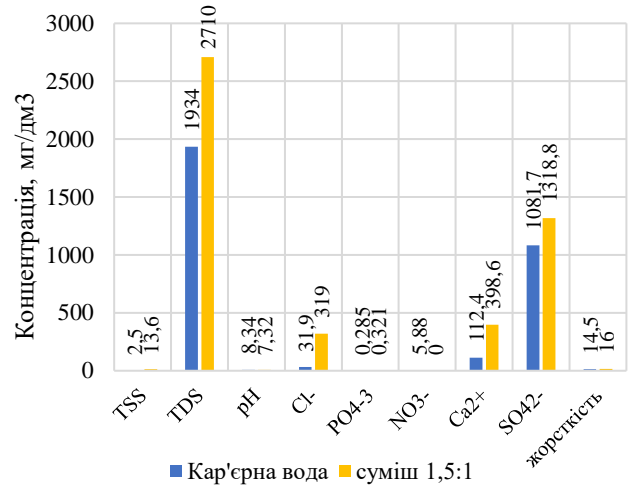
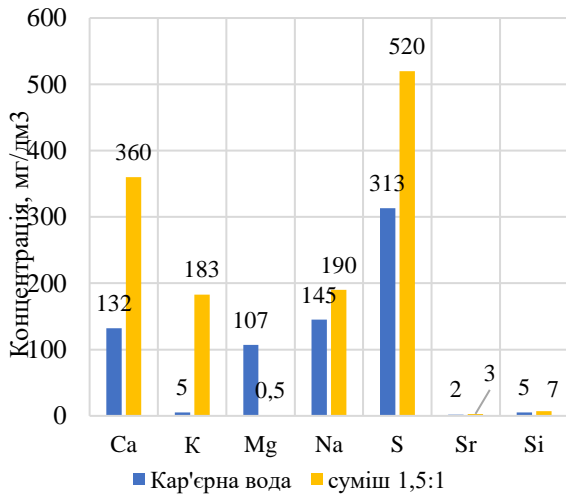
вторинна витримка



(б)  
первинна витримка

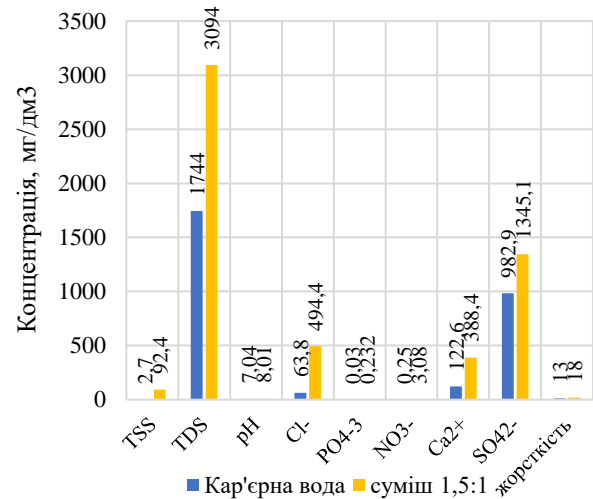
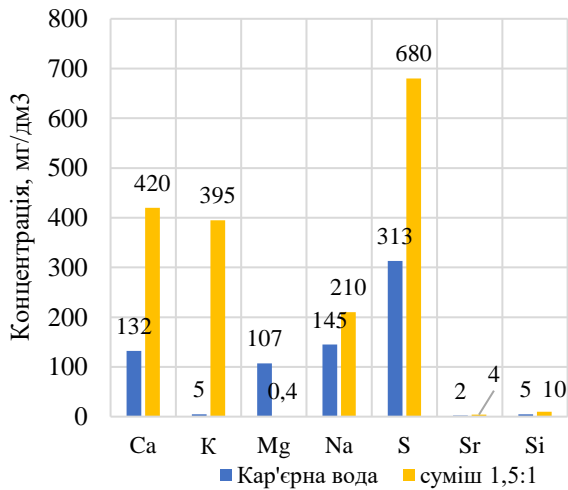


## вторинна витримка

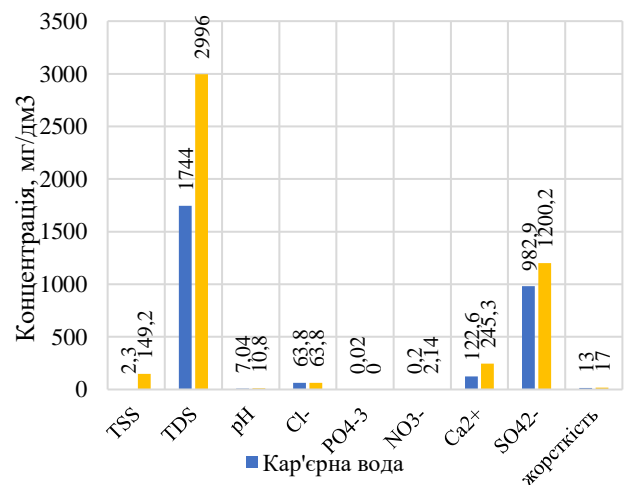
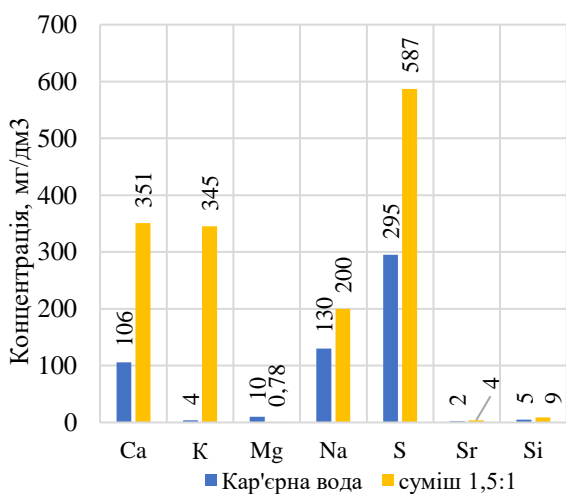


(в)

## первинна витримка



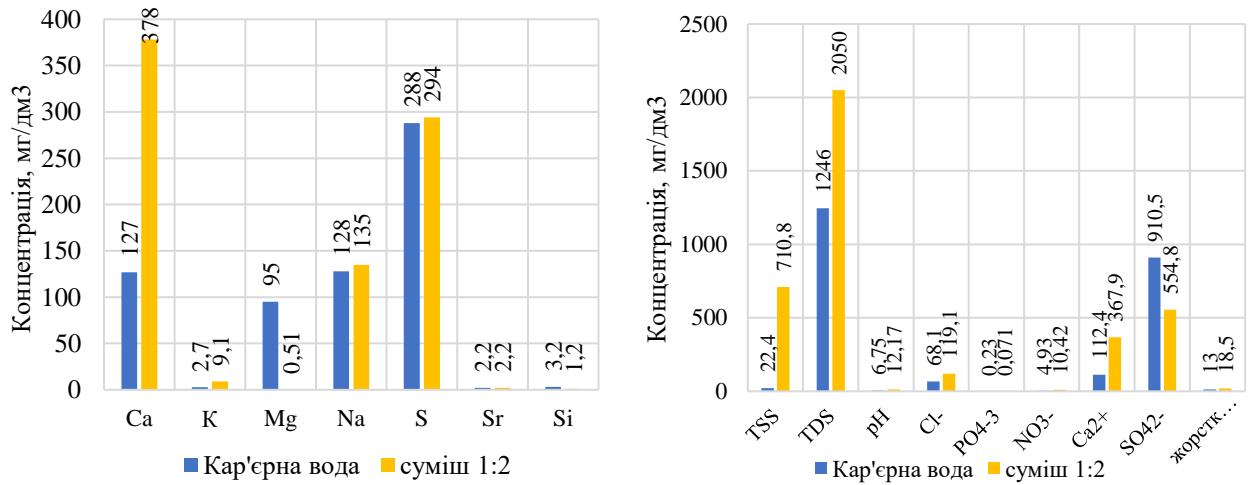
## вторинна витримка



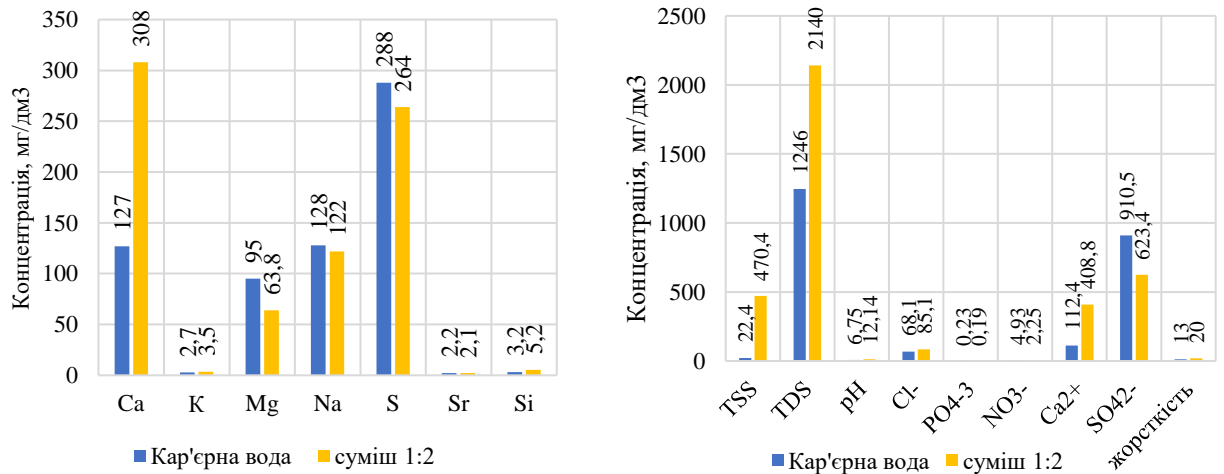
Розподіл хімічних елементів та забруднюючих речовин у кар'єрній воді та її суміші з доменним відвальним шлаком у пропорції 1,5:1 при термінах 1 доба (а); 15 діб (б); 30 діб (в)

(a)

## первинна витримка

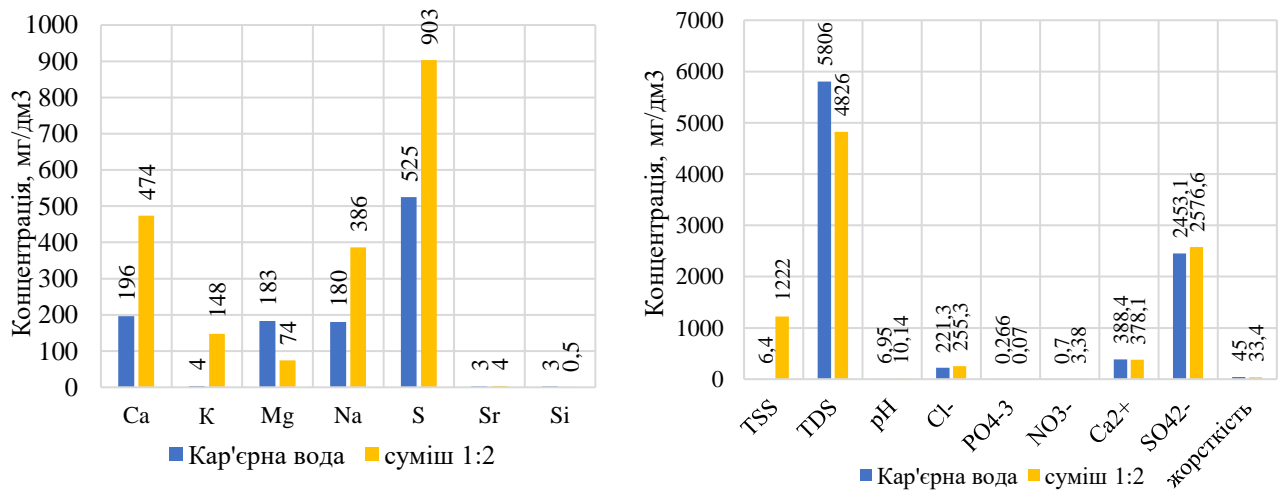


## вторинна витримка

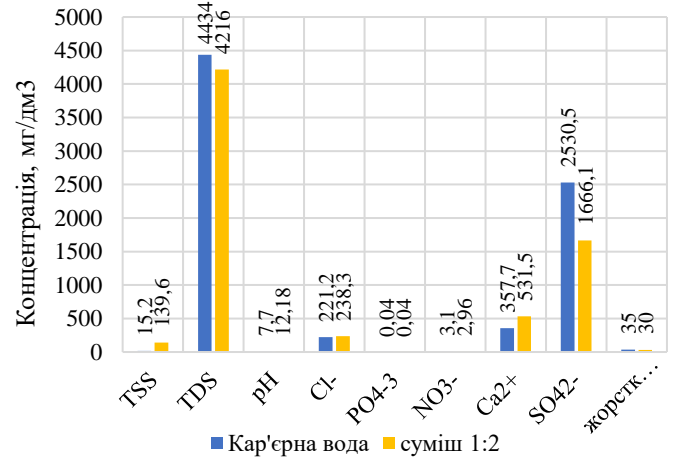
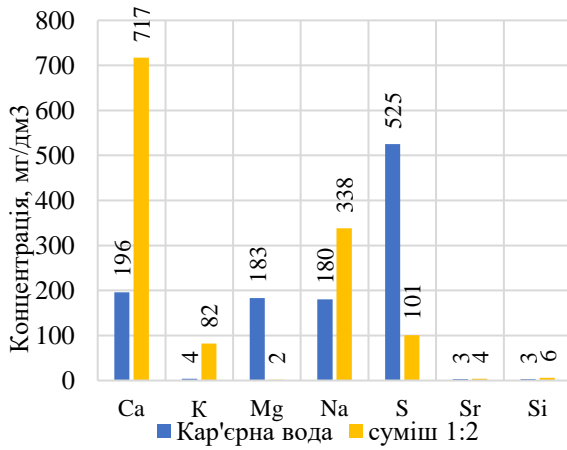


(б)

## первинна витримка

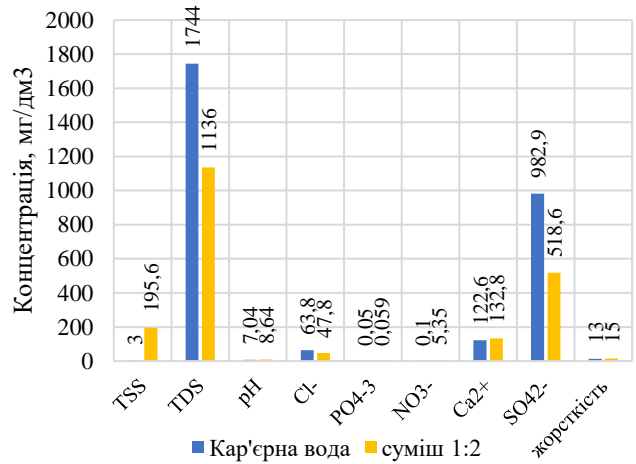
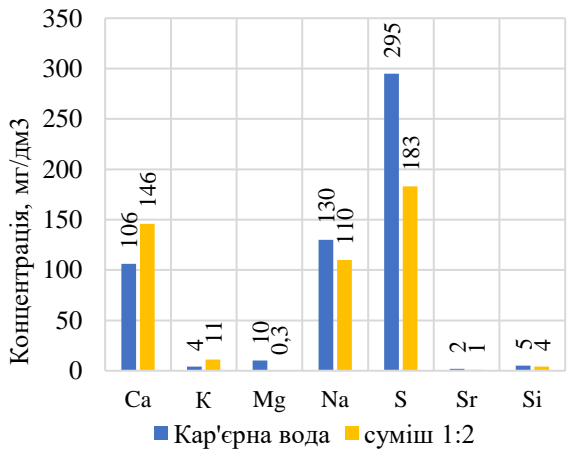


## вторинна витримка

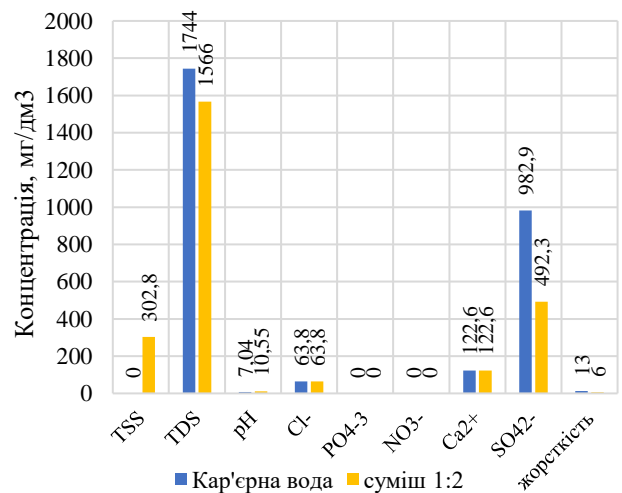
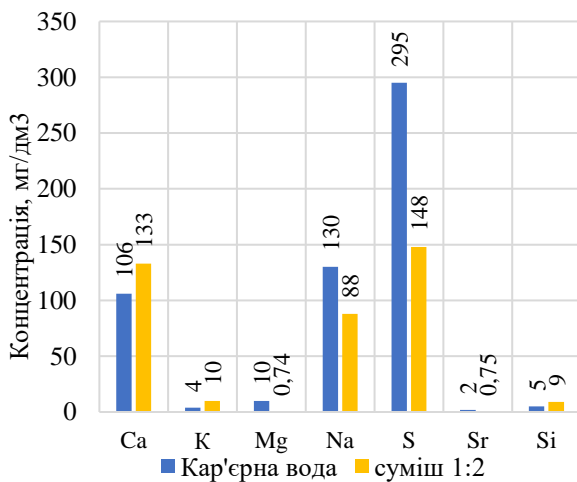


(б)

## первинна витримка



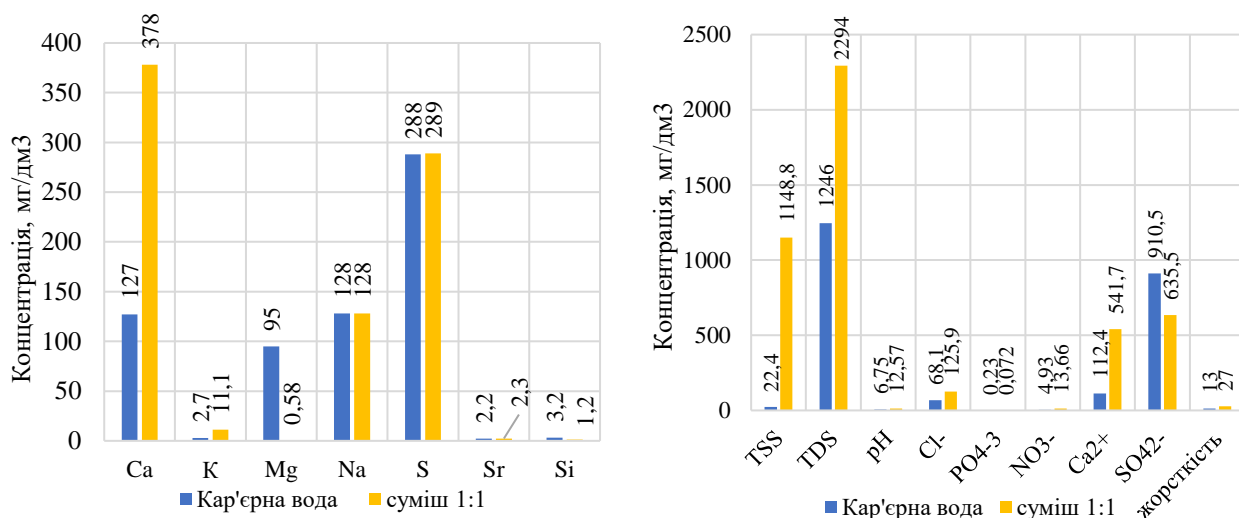
## вторинна витримка



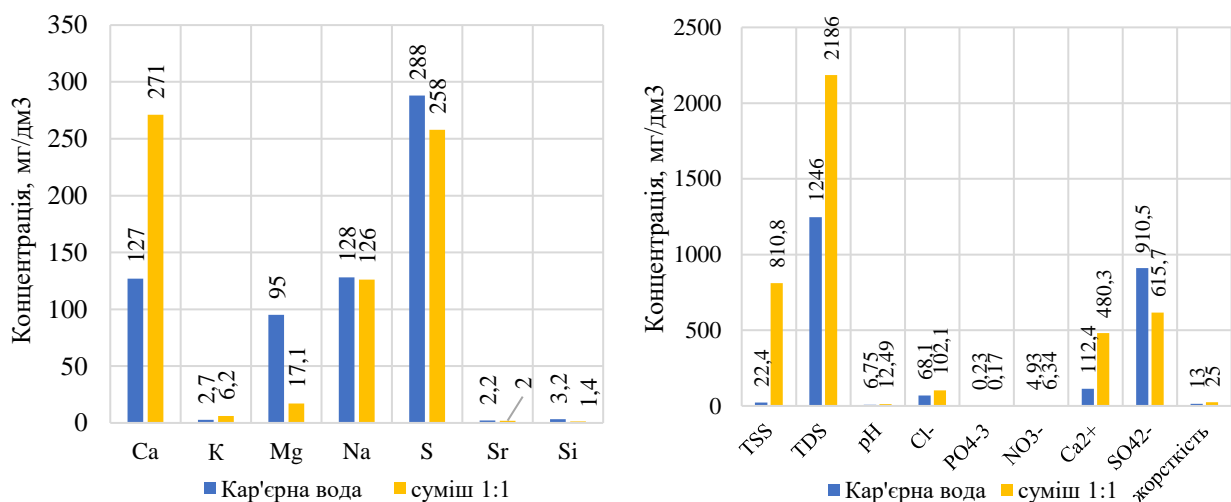
Розподіл хімічних елементів та забруднюючих речовин у кар'єрній воді та її суміші зі сталеплавильним шлаком у пропорції 1:2 при термінах 1 доба (а); 15 діб (б); 30 діб (в)

(a)

## первинна витримка

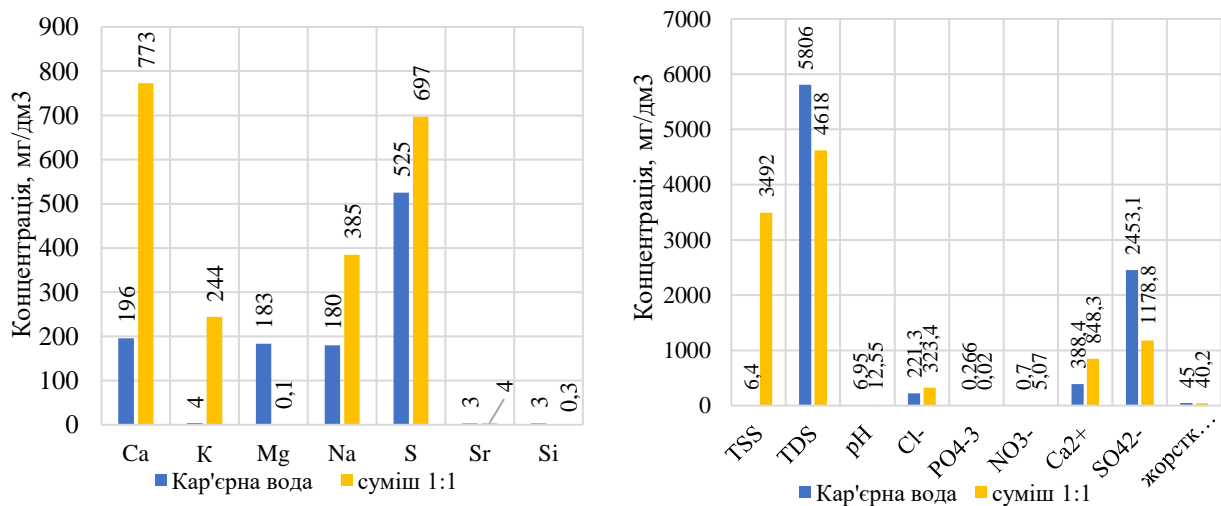


## вторинна витримка



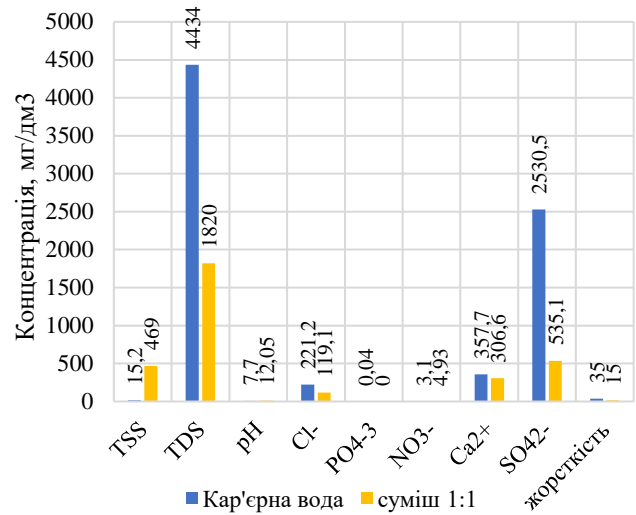
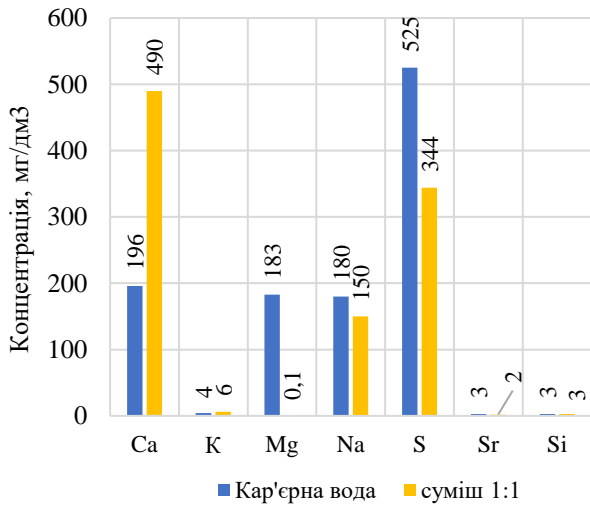
(б)

## первинна витримка



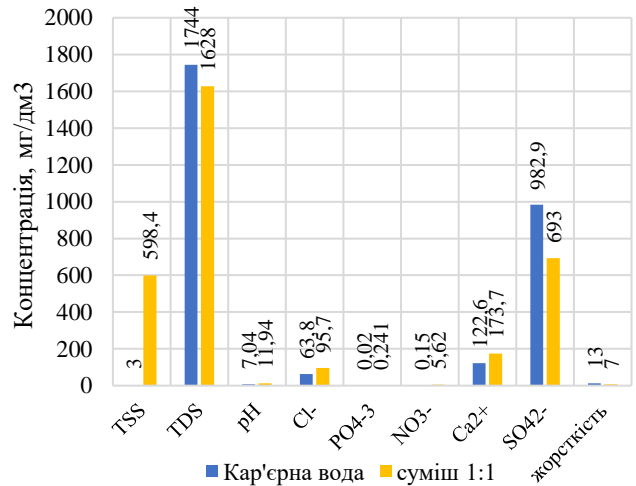
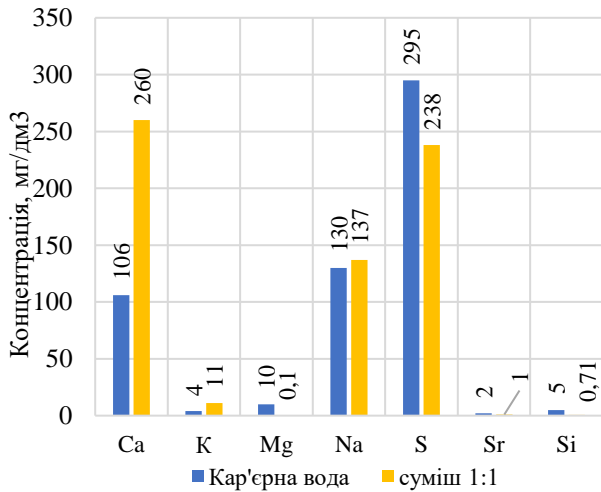


## вторинна витримка

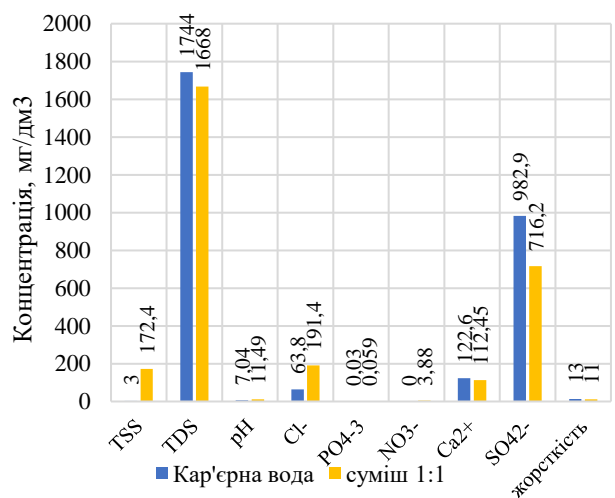
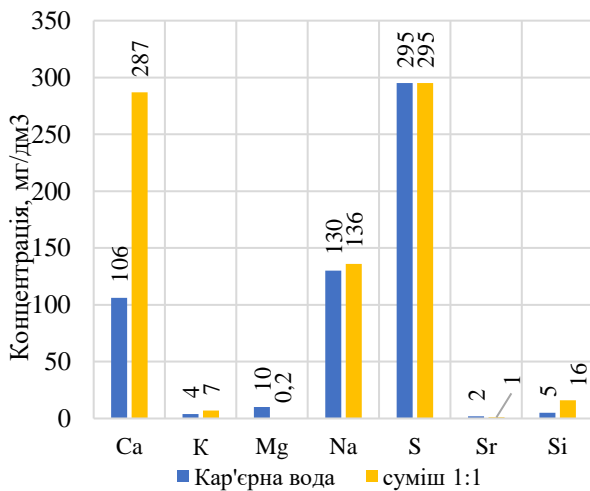


(В)

## первинна витримка



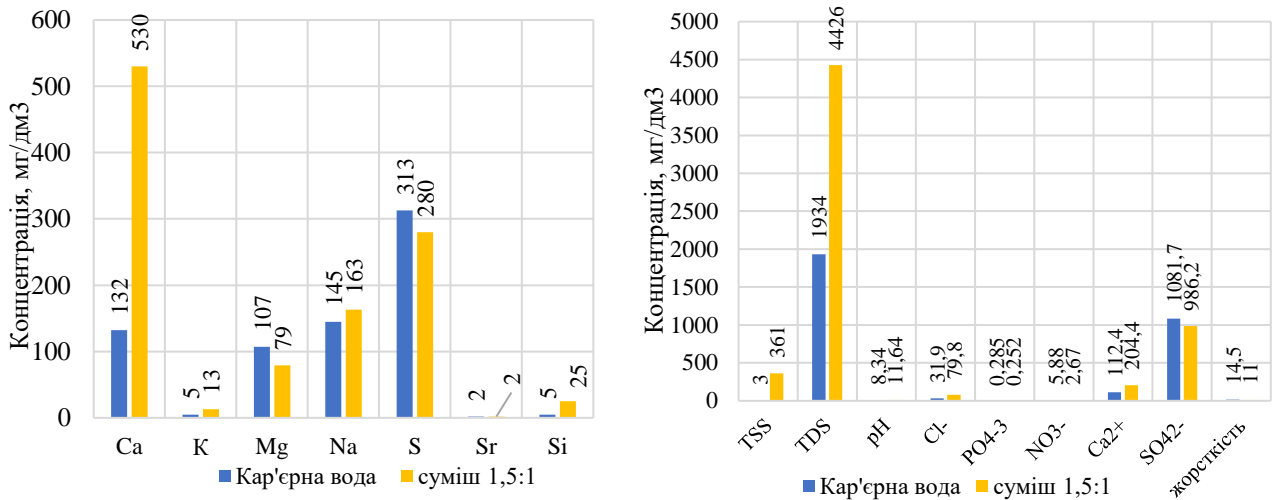
## вторинна витримка



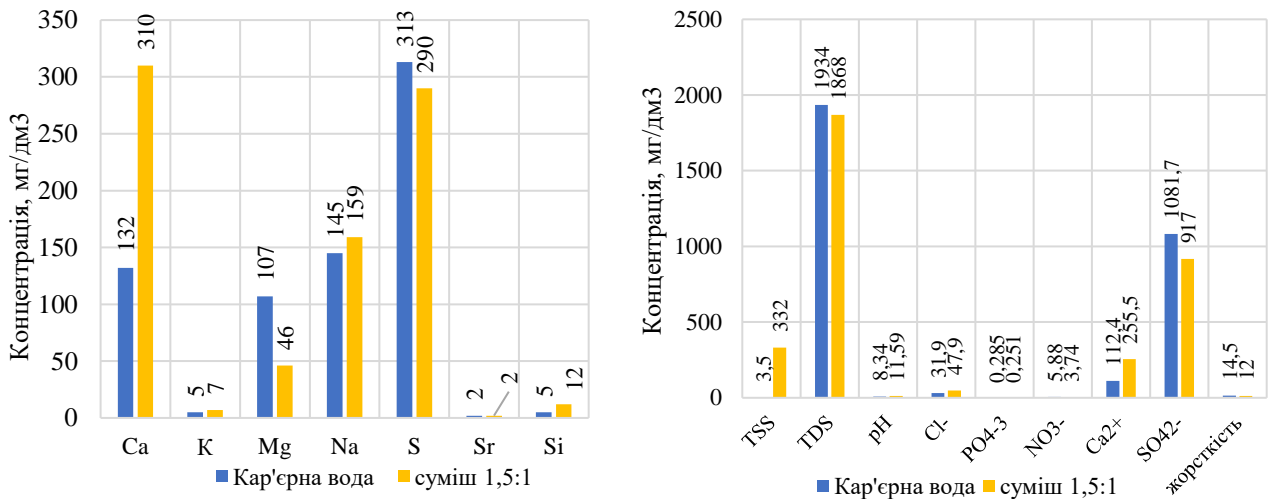
Розподіл хімічних елементів та забруднюючих речовин у кар'єрній воді та її суміші зі сталеплавильним шлаком у пропорції 1:1 при термінах 1 доба (а); 15 діб (б); 30 діб (в)

(a)

первинна витримка

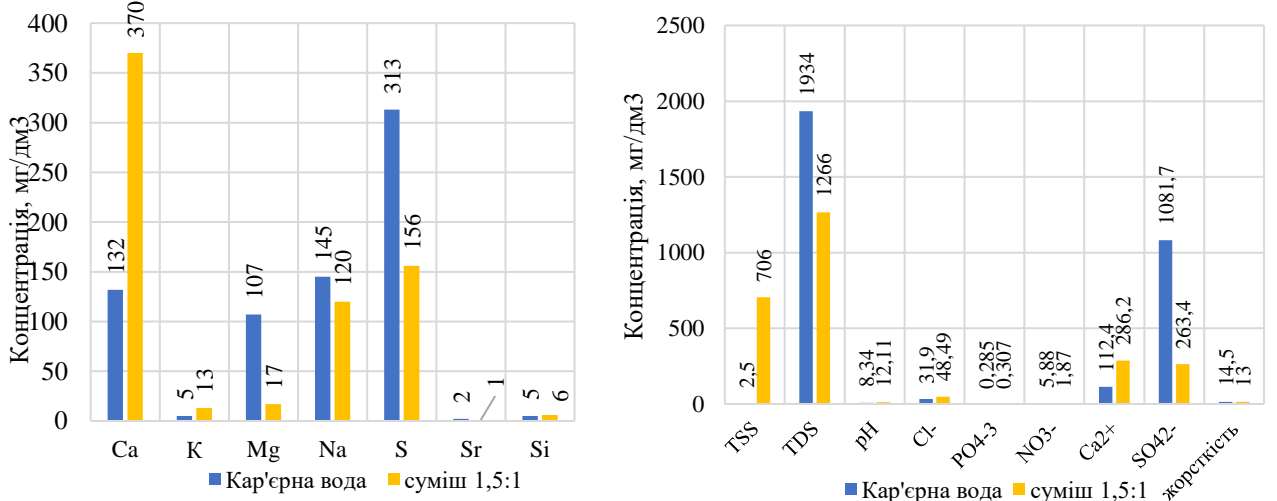


вторинна витримка

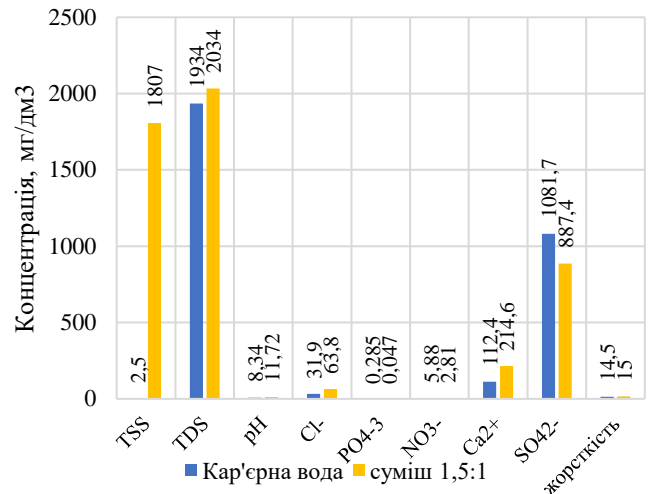
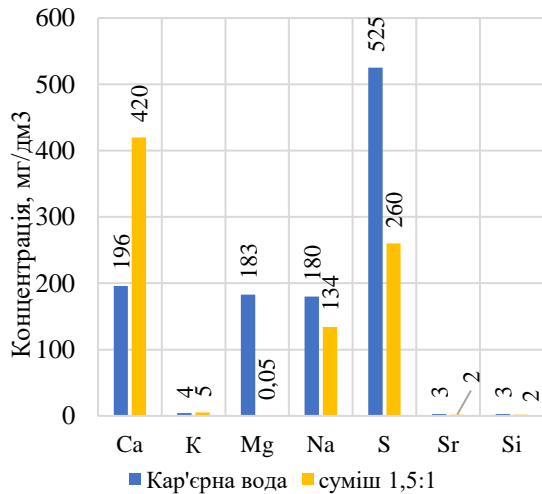


(б)

первинна витримка

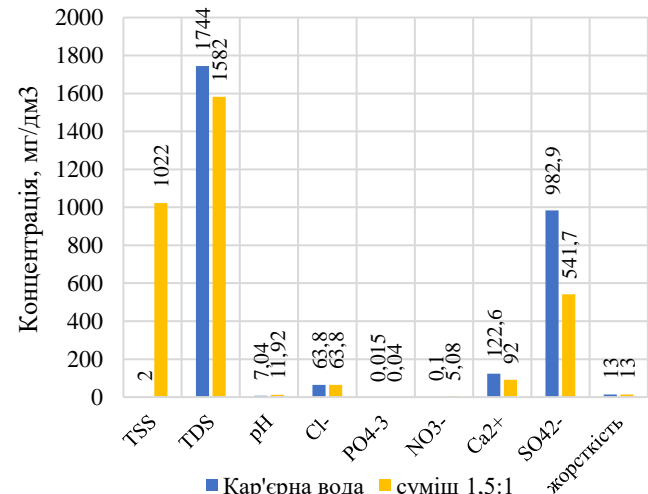
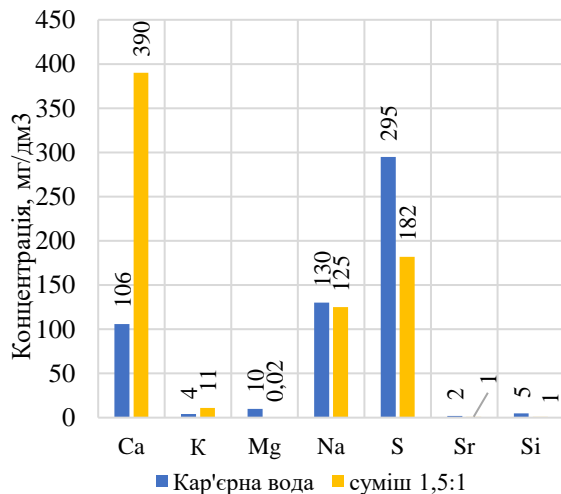


## вторинна витримка

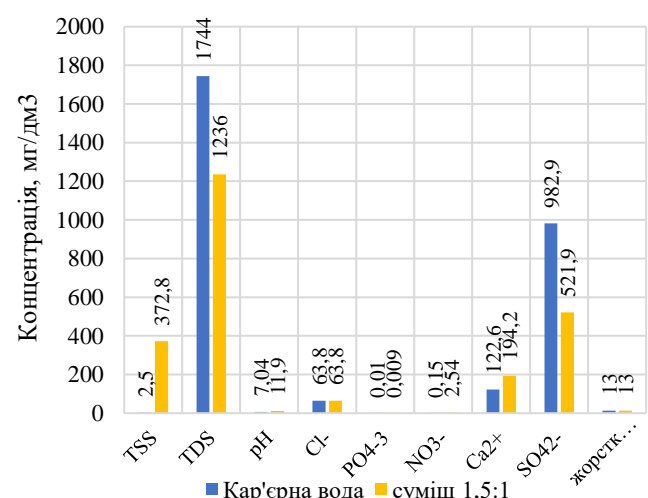
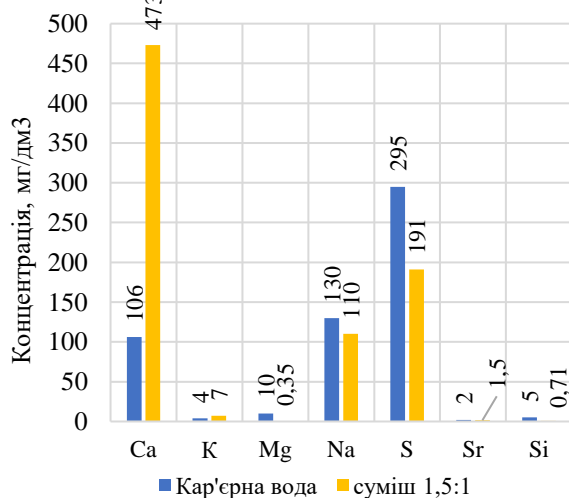


(В)

## первинна витримка



## вторинна витримка



Розподіл хімічних елементів та забруднюючих речовин у кар'єрній воді та її суміші зі сталеплавильним шлаком у пропорції 1,5:1 при термінах 1 доба (а); 15 діб (б); 30 діб (в)

## ДОДАТОК Б

## Розроблення нормативного документу щодо закладних сумішей на основі металургійних шлаків

ДКПН 08.12.12

УКНД 73.080

ВНЕСЕНО ДО БАЗИ ДАНИХ  
 099  
 «ТЕХНІЧНІ УМОВИ УКРАЇНИ»

**ПЕРЕВІРЕНО**  
 Директор з технології та якості  
 ПРАТ «ММК ім. Ілліча»  
 Суласв Є.В.  
 «11» 11 2020 р.

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
 Директор з технології та якості  
 ПРАТ «ММК «АЗОВСТАЛЬ»  
 Зотов Д.С.  
 «11» 11 2020 р.

**СУМІШІ ЗАКЛАДНІ ІЗ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ ПРАТ  
 «ММК «АЗОВСТАЛЬ» ТА ПРАТ «ММК ІМ. ІЛЛІЧА» ДЛЯ ТЕХНІЧНОЇ  
 РЕКУЛЬТИВАЦІЇ ТЕХНОГЕННО ПОРУШЕНИХ ЗЕМЕЛЬ**

**МІНЕКОНОМІКИ**  
 Державне підприємство  
 «Тернопільський науково-виробничий центр  
 стандартизації, метрології та сертифікації»  
 ДП «Тернопільський стандартметрологія»  
 ідентифікаційний код 02908319

**ПЕРЕВІРЕНО**  
 на відповідність законодавству України  
 «01» грудня 2020 р.  
 Внесено до книги обліку за № 02568319/09323

**Технічні умови**  
 ТУ У 08.1-00191158-002:2020  
 (Вводяться вперше)  
 Дата надання чинності: з 01.12.2020  
 Без обмеження терміну дії

**ПОГОДЖЕНО**

**РОЗРОБЛЕНО**  
 Зав. кафедрою «Якість,  
 стандартизація та сертифікація»,  
 НМетАУ, д.т.н., проф.  
 А.М. Должанський  
 «11» 11 2020 р.  
 Доцент кафедри «Якість,  
 стандартизація та сертифікація»,  
 НМетАУ, к.т.н., доц.  
 О.С. Максакова  
 «16» 11 2020 р.  
 Старший менеджер ТОВ «МЕТІНВЕСТ  
 ХОЛДІНГ»  
 О.В. Філоненко  
 «16» 11 2020 р.

ДУ «Інститут медицини праці  
 імені Ю.І. Кундієва НАМНУ»  
 протокол державної санітарно  
 епідеміологічної експертизи  
 № 15344  
 «19» листопада 2020 р.

2020

**ДОДАТОК В****Розроблення рекомендацій щодо технології закладання  
виробленого простору кар'єру**

ПОГОДЖЕНО:

Директор з виробництва

ПРАТ «ММК ім. Ілліча»

Солонарь Р.А.

*Листопада* 2021 г.

РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ТЕХНОЛОГІЇ ЗАКЛАДАННЯ (ТЕХНІЧНОЇ  
РЕКУЛЬТИВАЦІЇ) ВИРОБЛЕНОГО ПРОСТОРУ КАР'ЄРУ №2  
ДПП «КАРАНСЬКИЙ КАР'ЄР» МЕТАЛУРГІЙНИМИ ШЛАКАМИ  
ПРАТ «ММК ІМ. ІЛЛІЧА»

м. Маріуполь  
2021

## ДОДАТОК Г

## Розрахунок очікуваного економічного ефекту запропонованих рішень

ПОГОДЖЕНО:

Директор з виробництва

ПрАТ «ММК ім. Ілліча»

Солонарь Р.А.

«10» // 2021 г.



РОЗРАХУНОК ОЧІКУВАНОВОГО ЕКОНОМІЧНОГО ЕФЕКТУ  
РЕКОМЕНДОВАНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ РЕКУЛЬТИВАЦІЇ  
ВИРОБЛЕНОГО ПРОСТОРУ КАР'ЄРУ №2 ДПП «КАРАНЬСЬКИЙ  
КАР'ЄР» МЕТАЛУРГІЙНИМИ ШЛАКАМИ ПРАТ «ММК ІМ.  
ІЛІЧА»

м. Маріуполь  
2021