

© В.Є. Колесник¹, Ю.В. Бучавий¹, К.В. Лясов¹

¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА ВІДБІР ЕКОЛОГІЧНО ЗНАЧИМИХ ХАРАКТЕРИСТИК І ПОКАЗНИКІВ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ ДО БАЗИ ЗНАНЬ СПЕЦІАЛІЗОВАНОЇ ГІС

© V. Kolesnik¹, Y. Buchavyi¹, K. Liasov¹

¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

SYSTEMATIZATION AND SELECTION OF ECOLOGICALLY SIGNIFICANT CHARACTERISTICS AND INDICATORS OF METALLURGICAL SLAGS TO THE KNOWLEDGE BASE OF SPECIALIZED GIS

Мета. Відбір екологічно значимих показників, необхідних для формування інформаційної бази знань спеціалізованої геоінформаційної системи (ГІС) контролю і управління металургійними шлаковими відходами.

Методика дослідження передбачала наукове обґрунтування відбору певних екологічно значимих характеристик і показників металургійних шлаків на основі систематизації та узагальнення відомих даних стосовно їх властивостей, та аналіз значень певних показників, необхідних для визначення ресурсного потенціалу шлаків та їх екологічної небезпеки.

Результати дослідження. Запропоновано концепцію контролю і управління шлаковими відходами на основі відповідної спеціалізованої ГІС. До її бази знань відбиралися показники і характеристики сталеплавильних, ваграночних та найбільш масових – доменних металургійних шлаків. Ресурсний потенціал шлаків передбачено оцінювати за їх накопичуваними обсягами та можливістю утилізації чи застосування в певних галузях, а екологічна небезпека – за хімічним складом.

Наукова новизна полягає у наступному:

- при визначенні ресурсного потенціалу шлаків, його масу у відвалі рекомендовано визначати за їх об'ємом, отриманим засобами ГІС, з урахування густини матеріалу шлаку, що становить в середньому – $2850 \text{ кг/м}^3 \pm 5\%$.

- процес емісії заліза та марганцю у дистильовану воду досягає відносного рівня 0,95 вже у кінці 1-ої доби і підтримується до початку 3-ої, після чого переходить в убутну сигмоїдну криву, що досягає асимптоти приблизно після 10-ої доби і потім вже мало змінюється; емісія ж ванадію і титану в має вигляд експоненти.

- гранулометричний склад шлаків, що обумовлює обсяги його складування через вплив на насипну щільність, запропоновано характеризувати для відвального шлаку мінімальним та максимальним розміром частинок чи кусків – 1,6 мм та 250 мм, а для гранульованого доменного шлаку і шлаку силікомарганцю середнім медіанним розміром гранул – $1,31 \pm 0,15 \text{ мм}$ та $1,54 \pm 0,2 \text{ мм}$, відповідно.

Практичне значення. Визначено певні значення або діапазони можливих змін показників ресурсного потенціалу шлаків, а також їх екологічної небезпеки для довкілля за чинниками, що в сукупності обумовлюють міграцію забруднюючих речовин зі шлаку в стічну воду, фільтрацію у ґрунти, та емісію в атмосферу.

Ключові слова: ресурсний потенціал металургійних шлаків; екологічна небезпека шлаків для довкілля; характеристики та показники шлаків; база знань спеціалізованої ГІС.

Вступ. Щорічно на підприємствах чорної металургії, зокрема, Дніпропетровської області утворюються порядку 10 млн. т металургійних шлаків (доменних та силікомарганцю) [1]. Їх відвали становлять екологічну небезпеку, що проявляється у забрудненні основних компонентів довкілля. Навіть старі, виведені з експлуатації відвали, негативно впливають на атмосферу, гідросферу і ґрунтовий покрив навколишньої місцевості, а через них – на стан флори, фауни і здоров'я людей [2].

Шлаки вирізняють як відходи чорної або кольорової металургійної промисловості чи сталеплавильного виробництва та є неминучим побічним продуктом основного виробництва, вихід якого складає від 10 до 40% виробленого металу [3]. Близько 85 % відходів металургії можливо переробити та вже доволі інтенсивно переробляється у будівельні матеріали [1]. Однак, обсяги шлаків і продуктів їх переробки, які накопичуються у провідних виробників металу не лише у Дніпропетровській області, а в цілому в Україні, значно перевищують потреби традиційних споживачів в області будівництва, тому металургійні підприємства змушені шукати нові напрямки використання шлаків, таких як будівництво природоохоронних об'єктів (сховищ, дамб, гребель тощо) або проведення рекультивациі порушених земель.[3].

Таким чином, окрім традиційного використання шлаків у будівельній промисловості відкривається указаний вище перспективний напрямок їх застосування, спрямований на ресурсозбереження та захист довкілля, зокрема літосфери, порушеної виробничою діяльністю підприємств гірничо-металургійного комплексу, який вже впроваджується в Україні. Проте, негативний вплив металургійних шлаків, на рівень екологічної безпеки навколишнього середовища потребує регулярного спостереження за їх накопиченням і утилізацією, починаючи з місць складування утворених шлаків і закінчуючи об'єктами, де він використаний.

Постановка задачі. Виходячи з того, що, з одного боку, металургійний шлак – це важливий ресурс, а, з іншого, – чинник негативного впливу на рівень екологічної безпеки навколишнього середовища, необхідно регулярно спостерігати за обсягами їх накопичення, а також контролювати стан поверхонь шлакових відходів. При цьому інформація про обсяги накопичення шлаків необхідна як для застосування їх у якості ґрунтового ресурсу, так і для визначення інтенсивності емісії забруднювачів зі шлаків в атмосферу або міграцію у стічну воду чи фільтрацію у ґрунт. Крім того, інформація про стан поверхонь та гранулометричний склад шлаків, потрібна для прогнозування обсягів утворення та виносу пилу в атмосферу в результаті вітрової ерозії або газоподібних забруднювачів.

Таким чином, постає проблемна задача оперативного отримання поточної інформації про обсяги накопичення і утилізації шлаків як вторинного ресурсу та ступеня їх негативного впливу на компоненти довкілля з урахуванням характеру та стану поверхні шлаків. Ефективне розв'язання цієї задачі можливе в рамках створення спеціалізованої географічної інформаційної системи (ГІС), призначеної для контролю і управління металургійними шлаковими відходами. Оскільки

в такій системі інформація представляється наочно на картах, це дозволяє оперативного визначити обсяги певних ресурсів, критичні з екологічної точки зору ділянки території чи довкілля, розглядати різні варіанти управлінських рішень, що сприяє прийняттю найбільш ефективних з них.

Метою роботи є відбір екологічно значимих показників, необхідних для формування інформаційної бази знань спеціалізованої ГІС контролю і управління металургійними шлаковими відходами, спрямовану на збереження та використання шлаків як вторинного ресурсу та захисту довкілля.

Основні результати. Для досягнення поставленої мети ставився ряд завдань, вирішення яких спрямоване на створення бази знань, необхідної для забезпечення контролю і управління металургійними шлаковими відходами, тобто для функціонування відповідної спеціалізованої ГІС.

Побудова концепції контролю і управління шлаковими відходами з використанням ГІС. Контроль і управління шлаковими відходами запропоновано здійснювати за типовою схемою автоматизованого управління технологічними процесами (АСУ ТП), що широко застосовується у промисловості, функції якої переорієнтовано на управління процесами накопичення і утилізації шлаку та контролю за якістю навколишнього середовища (НС) на територіях, прилеглих до полігонів складування або масового застосування шлакових відходів (рис.1).

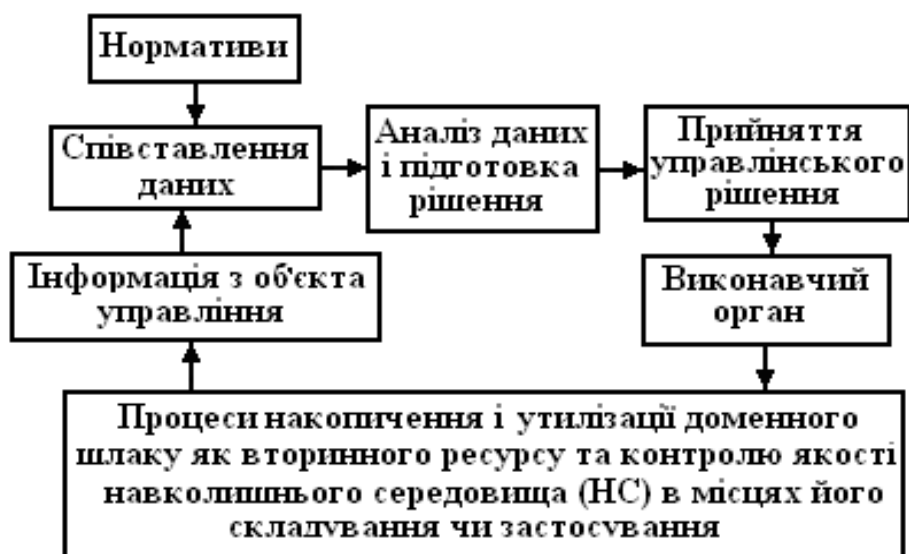


Рис. 1. Схема управління процесами накопичення і утилізації шлаку та контролю якості навколишнього середовища

Реалізація ж управлінських функцій пропонується з використанням спеціалізованої ГІС контролю і управління металургійними шлаковими відходами (рис. 2). побудованої на основі типової ГІС еколого-економічного типу [4]. Відмінність її від типової забезпечується підсистемою оцінки ресурсного потенціалу шлаків та їх екологічної небезпеки, яка відповідно визначає зміст необхідної бази знань та аналітичних інструментів.

Схема управління, що наведена на рис. 1, відповідно до мети, передбачає збір і накопичення апріорної інформації, включаючи нормативні дані, та динамічну поточну інформацію з об'єкта. Указані процедури пропонується виконувати в автоматизованому режимі з використанням сформованих для спеціалізованої ГІС баз знань, що містять необхідні бази даних (БД) про складений об'єкт управління, яким, відповідно до схеми, виступають процеси накопичення і утилізації шлаку та контролю якості довкілля.

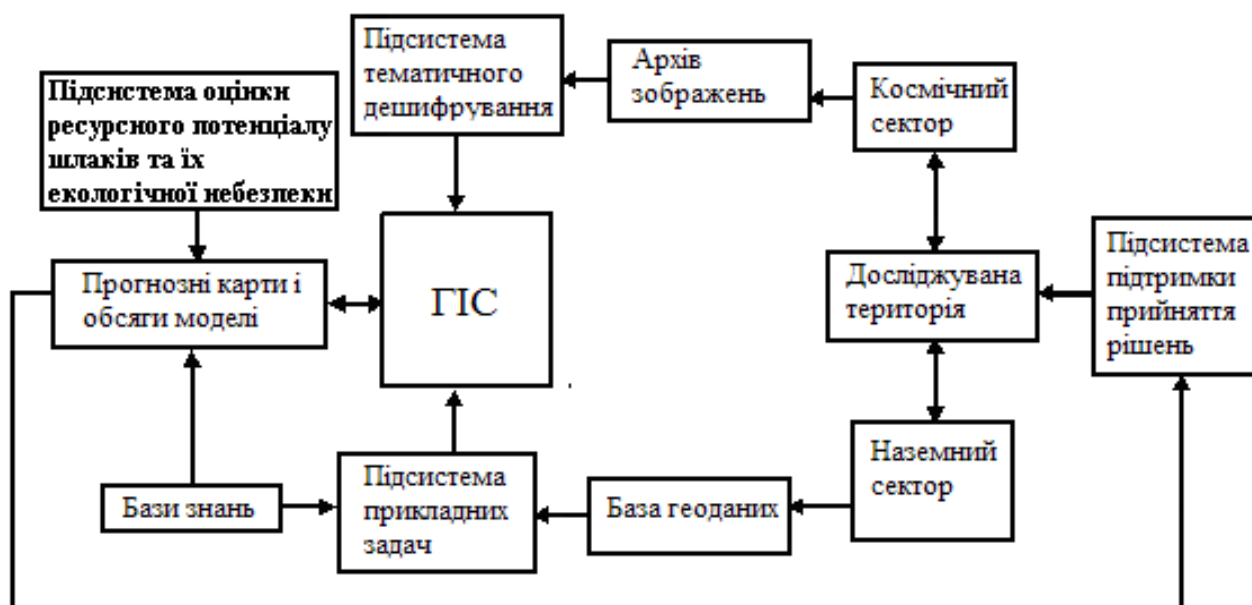


Рис. 2. Схема функціонування спеціалізованої ГІС

Далі, за результатами співставлення поточних і нормативних даних, схема передбачає аналіз динаміки накопичення шлаків як вторинного ресурсу та оцінки негативного впливу металургійних шлаків на рівень екологічної безпеки довкілля із підготовкою варіантів доцільних управлінських рішень.

Обробка даних виконуватиметься за допомогою просторово-аналітичних інструментів ГІС, до яких відносять розрахунки: площ, довжин, периметрів, площ схилів, об'єми шлакових відходів на різних територіях, а також спеціалізованих функцій, призначених для оцінювання екологічно небезпечного впливу забруднювачів, що містяться у шлаках, на прилеглі території. В результаті оперативно будуватимуться відповідні електронні карти, що дозволить забезпечити швидко прийняття актуальних управлінських рішень.

Після цього виконуватиметься порівняльний аналіз підготовлених рішень з визначенням очікуваного збереження ресурсів і економічного ефекту від їх використання з одночасним експертним оцінюванням ступеня екологічної небезпеки кожного рішення, наприклад, для основних компонентів довкілля та біоти за методик, викладених в роботах [5–7] й подальшим вибором найбільш раціонального управлінського рішення, яке втілюватиметься через виконавчий орган організаційно-технічного характеру за двома напрямками:

- шляхом застосування певних технологій утилізації складованих шлаків

як вторинного ресурсу у міському будівництві та при рекультивації земель або спорудженні накопичувачів промислових відходів різного роду а також для вилучення цінних для промисловості компонентів;

- впровадженням заходів чи засобів, спрямованих на зниження ступеня екологічної небезпеки, тобто на підвищення якості навколишнього середовища на територіях, прилеглих до шлакових відвалів або до місць масового застосування шлаків як ґрунтового матеріалу.

Принципи формування бази знань спеціалізованої ГІС. База знань спеціалізованої ГІС контролю і управління металургійними шлаковими відходами забезпечує роботу її підсистем прикладних задач, що необхідно для прийняття певних ресурсозберігаючих та екологічних рішень, передбачених в ГІС подібного типу [4]. Отже, база знань необхідна для прийняття рішень стосовно об'єкта управління, яким виступають процеси накопичення і утилізації шлаку, а також контролю якості доквілля на прилеглих територіях.

Карта в спеціалізованій ГІС організовується як набір шарів графічної й атрибутивної інформації із включенням до них різноманітних результатів аналізу. Так, територія шлакового полігону може бути представлена шарами:

1) полігонів шлаків або територій їх масової відсіпки як ґрунтового матеріалу в тіло дамби чи греблі або при технічній рекультивації земель, порушених шлаковими відвалами чи гірничими роботами;

2) лінійних та точкових об'єктів: водойм, інженерних комунікацій, включаючи шляхопроводи, підприємства, джерела викидів пилу і газів, скидів забрудненої води, або житлові будівлі, що знаходяться в зоні впливу полігону;

3) цифрових моделей растрових полів, що відображають різні властивості географічного району, а саме: цифрові моделі рельєфу, або рівні забруднення атмосфери, щільність населення та біофізичні характеристики рослинності;

Спеціалізована частина бази знань повинна складатися з загальної інформації про металургійні шлаки, а також потребує визначення найбільш суттєвих екологічно значимих характеристик металургійних шлаків. Тому для обґрунтування вибору певних показників металургійних шлаків нами систематизувалися, узагальнювалися та відбиралися відомі (опубліковані) дані стосовно характеристик чи властивостей металургійних шлаків.

Загальна інформація про металургійні шлаки Зазвичай шлаки різних металургійних виробництв розділяють на сталеплавильні, ваграночні та найбільш масові – доменні. На кількість їх утворення переважно впливає сірка, вапно і рівень технологічної оснащеності печі. Найбільший вихід мають доменні шлаки, в яких на 1 т чавуну вихід шлаку складає 0,6...0,7 т, при виплавці сталі мартенівським способом – 0,2...0,3 т, а в електропечах – 0,1...0,04 т [8]. Наведені показники дозволяють оперативно оцінити обсяги утвореного шлаку за обсягами виплавленого чавуну і сталі. Слід також зазначити, що в одному і тому ж відвалі часто складаються шлаки різних указаних вище металургійних виробництв, отже склад таких шлаків не є однотипним, оскільки змінюються, руди, флюси та технологія виробництва. До того ж, оскільки відвальний шлак легко всмоктує і легко

віддає воду, у відвалі відбувається механічний і хімічний розпад шлаку. В результаті, утворюються частинки різного фракційного складу, а шлаковий відвал стає шаруватим.

Склад і властивостей шлаку у відвалі виявляються різними і по висоті, і по простяганню цієї майже геологічної структури. Природно, що його переробка навіть в щебінь і пісок утруднена: адже одна частина відвалу може бути цілком придатна для отримання таких будівельних матеріалів, а інша – ні. Розпочата вже утилізація може стати економічно недоцільною, підприємство зазнає збитків, проте як альтернатива залишається використати указану частину відвалу як ґрунтовий ресурс при рекультивації порушених земель.

Основними ресурсними та екологічними характеристиками доменного шлаку слід вважати його основність, опір подрібненню, реакційну здатність, хімічний склад і стабільність. [9, 10]. На характеристики шлаку, що визначають можливість його утилізації впливають оксиди – SiO_2 , CaO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO та ін., що входять до складу шлаку, та два кількісних співвідношення:

1) Модуль основності (M_0), який обчислюється як:

$$M_0 = \frac{(CaO+MgO)}{(SiO_2+Al_2O_3)} \quad (1)$$

За величиною цього модуля шлаки розрізняють на кислі ($M_0 < 1$), нейтральні (M_0 близьке до 1) і основні ($M_0 > 1$).

2) Модуль активності (M_a), який виражає співвідношення глинозему та кремнезему (%), що впливає на в'язкість шлакових розплавів, тобто:

$$M_a = \frac{Al_2O_3}{SiO_2} \quad (2)$$

З підвищенням модуля основності та модуля активності у більшості випадків зростає гідралічна активність. Причому, носіями цієї активності у шлаках є силікати та алюмосилікати кальцію. Їх гідратація зумовлює твердіння шлакових в'язучих. У ролі збудників у більшості випадків виступає сульфід кальцію, кількість якого залежить від загального вмісту сірки.

Гідралічні властивості доменного шлаку визначаються за величиною коефіцієнта якості (K), залежно від якого, а також хімічного складу, гранульовані доменні шлаки поділяються на три сорти табл. 1.

Таблиця 1

Сортність доменного шлаку

Сортність	Показники якості гранульованих шлаків				
	Al_2O_3 , % (не менше)	MgO , % (не більше)	TiO_2 , % (не більше)	MnO , % (не більше)	K
I сорт	8,0	15,0	4,0	2,0	1,65
II сорт	7,5	15,0	4,0	3,0	1,45
III сорт	до 7,2	15,0	4,0	4,0	1,20

Щодо характеристик шлаків як вторинного ресурсу важливо зазначити, що крім оксидів, в шлаках завжди містяться домішки у вигляді сполук титану, ванадію, хрому та інших потрібних промисловості хімічних елементів, причому в кількості часто не меншій, ніж в природних рудах.

Фазовий складу шлаку залежить переважно від модуля основності. У кислих, – з найбільшою ймовірністю утворюється склоподібна фаза в нейтральних і основних – кристалічна. Її найчастіше складають силікати і алюмосилікати кальцію і магнію в формі мінералів. В шлаках з різним модулем основності переважають цілком певні мінерали [11].

Модуль основності шлаків, що самі розкладаються, близький до 2-х, тому склоподібна фаза в них не утворюється навіть при різкому охолодженні. З мінералів же переважає ортосилікат кальцію ($2CaO, SiO_2$), що містить іони $Ca^{2+} [SiO_4]$. Такий шлак не здатний тверднути при змішуванні з водою.

Фактично шлаки є штучними силікатами. Вважають, що шлакові сплави мають подібні риси з гірською породою та набувають різних кольорів й мають різноманітні відтінки, що є важливим для спектрального аналізу шлакових відвалів за допомогою методів ДЗЗ та передачі знімків до спеціалізованої ГІС.

Ресурсний потенціал шлаків визначався можливістю їх утилізації чи застосування у певній галузі. Так, наприклад, для виробництва шлаколитих виробів або шлакової пемзи використовують шлаки із високим ступенем структурної стійкості, а вже для виробництва гранульованих шлаків та в'язучих матеріалів – шлаки з високою гідравлічною активністю [13, 14].

Структура шлаків – визначальна характеристика якості будь-яких будівельних матеріалів. Однак структура штучного каменю, який утворюється зі шлакових розплавів, визначається комплексом чинників [10]. Механічна міцність та хімічна стійкість матеріалів залежать в основному від повноти кристалізації маси, густини структури, які визначаються розмірами, формою та взаємним зчепленням кристалів зі склофазою.

Густина матеріалу шлаку має схожість з природними кам'яними матеріалами, що зазвичай коливається в доволі широких межах – від 800 кг/м^3 , як у вулканічної пемзи, до 4850 кг/м^3 . Отже середня густина матеріалу (речовини) вказаних порід складає 2825 кг/м^3 . Вважаючи розподіл густини гаусовським та застосувавши до граничних значень вказаного діапазону густини правило 3-х «сигма (σ)», отримуємо стандартну величину відхилення значень густини від її середнього значення: $\sigma = 675 \text{ кг/м}^3$. Отже, густину матеріалу порід можна визначити як $2825 \pm 675 \text{ кг/м}^3$. Між тим, згідно з [10] густина матеріалу доменного шлаку в охолодженому стані становить $2700 - 3000 \text{ кг/м}^3$, тобто середня – $2850 \text{ кг/м}^3 \pm 5\%$, що мало відрізняється від значення отриманого нами вище для гірських порід. Насипна ж щільність шлаку складає $1300 - 1500 \text{ кг/м}^3$ при середній – $1400 \text{ кг/м}^3 \pm 7\%$, що є важливими показником для оперативного визначення засобами спеціалізованої ГІС. Отже масові обсяги складованого шлаку рекомендовано визначати за їх об'ємом, отриманим у ГІС з урахування густини матеріалу, що оцінена з вірогідністю близько 0,7 та становить в середньому – $2850 \text{ кг/м}^3 \pm 5\%$, а насипна щільність – $1400 \text{ кг/м}^3 \pm 7\%$.

Типовий напрямок використання шлаку, як вторинного ресурсу це баластний заповнювач в дорожньому будівництві замість природного щебеню. Основні фізико-механічні показники шлакового щебеню, порівняно зі щебенем природного походження, наведені в табл. 2, що модифікована з використанням даних, наведених в [15].

Як бачимо, середня насипна щільність шлаку оцінена як 1333 кг/м^3 , тобто приблизно на 5% нижче величини 1400 кг/м^3 , вказаної вище. Це можна пояснити певним сортування шлакової щебілки як товарного продукту. Показник пористості дорівнює відносному об'єму порожнин у відсипаному шлаку в процентах, який за нашими розрахунками склав $46\% \pm 10\%$.

Чинники екологічної небезпеки металургійних шлаків. Як основний показник, пов'язаний як з ресурсним потенціалом металургійних шлаків, так і екологічною небезпекою металургійних відходів, є хімічний склад відвальних і гранульованих шлаків, що має відносно невелику варіацію. Типовий хімічний склад гранульованих шлаків представлено в табл. 3 [8,16].

Таблиця 2

Основні фізико-механічні показники шлакового щебеню та для порівняння щебеню природного походження (в дужках – середні значення)

Показники щебеню	шлаковий	гранітний	гравійний	вапняковий
Марка міцності (М)	600-1200 (800)	1200-1400 (1300)	800-1200 (1000)	400-1000 (700)
Морозостійкість (F)	50-200 (125)	300-400 (350)	200-300 (259)	50-150 (100)
Лещадність (група)	2 и 3	2 и 3	2 и 3	2 и 3
Радіоактивність	1 класс	1 класс	1 класс	1 класс
Насипна щільність т/м^3	1,23-1,46 (1,33)	1,32-1,39 (1,36)	1,35 - 1,45 (1,4)	1,26 - 1,32 (1,29)
Середня густина матеріалу т/м^3	2,7-3,0 (2,85)	2,6-2,8 (2,7)	2,6-2,8 (2,7)	2,4-2,9 (2,65)
Пористість в насипці, %	45,6	50,3	51,8	48,6

Таблиця 3

Хімічний склад гранульованих шлаків

Найменування	Вміст оксидів, %							домішки
	SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	S	MgO	MnO	
Шлак Si/Mn	48,6	18	7	0,6	1,1	4,9	18,3	1,5
Доменний шлак	38,8	41,9	9,5	0,9	1,8	4,9	0,7	1,5

До домішок зазвичай відносять сполуки ванадію (V), титану (Ti), хрому (Cr), вміст яких, як відмічалось, часто не менший, ніж в природних рудах. Порівняння

хімічного складу шлаків чорної металургії різного виду та окремих фракцій доменного шлаку виконано нами за матеріалами [15, 16], а результати наведені в табл. 4 та 5.

Таблиця 4

Хімічний склад оксидів та домішок у шлаку, %

Шлак	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	V_2O_5	TiO_2	Cr
Доменний шлак	-	0,9	38,8	41,9	4,9	9,5	0,7	1,8	1,5 (домішки)		
Гранульований шлак Si/Mn	-	0,6	48,6	18	4,9	7	18,3	1,1	1,5 (домішки)		
Гранульований шлак	0,25	-	35,5	36,8	10,8	11,7	0,3	-	-	1,13	-

Аналіз даних табл. 3 та 4 за вмістом хімічних речовин в окремих фракціях доменного шлаку показав незначну відмінність їх від середніх значень. Доменний шлак та шлак силікомарганцю відносяться до кислих шлаків, що мають стійку структуру, їх низький гідравлічний модуль вказує на недостатню міцність, а глиноземний та силікатний модулі – на сповільнені строки тужавлення, тобто твердіння [16]. Тому зазначені шлаки є достатньо активними забруднювачами довкілля. Сумарна ж питома активність природних радіонуклідів у шлаках, наприклад, ПАТ «Нікопольський завод феросплавів» складає 187...295 Бк/кг, а ПАТ «ЄВРАЗ – ДМЗ ім. Петровського» – 93...104 Бк/кг, що згідно з ДБН В.1.4-1.01-97 відповідає 1-му класу матеріалів, котрі можуть бути використані для всіх видів будівництва без обмежень

Таблиця 5

Хімічний склад у доменному шлаку різних фракцій, %

Фракція, мм	Fe_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	MnO	S	V_2O_5	TiO_2	Cr
10	1,54	36,58	38,14	6,86	11,78	0,16	0,506	0,2	1,14	0,015
20	1,40	36,29	38,50	6,76	12,17	0,18	0,494	0,21	1,17	0,015
40	0,76	36,67	39,27	6,86	11,56	0,14	0,418	0,25	0,98	0,020
70	0,59	37,61	39,63	7,07	11,26	0,13	0,463	0,23	0,75	0,016
120	1,95	35,60	36,80	7,58	12,90	0,13	0,460	0,24	1,20	0,016
Середні	1,25	36,6	38,5	7,03	11,9	0,15	0,468	0,23	1,05	0,016
Ст. відх – σ	0,56	0,73	1,11	0,33	0,63	0,02	0,19	0,02	0,03	0,00

Важкі метали (ВМ) у шлаках як вторинний ресурс та чинник екологічної небезпеки. Хімічний склад шлаків залежить від того, який чавун або сталь отримують при плавлі. До того ж шлаки можуть містити екологічно небезпечні важкі метали (ВМ) – мідь, ванадій, свинець, цинк і їх оксиди. За вмістом основних компонентів SiO_2 , Al_2O_3 , MgO і фізико-механічними властивостями шлаковий щебінь подібний гравійному, який широко використовують для отримання бетонів різної міцності.

В окремих випадках спостерігається велика схожість в хімізмі шлаків і основних магматичних порід. При наявній хімічній схожості природного і шлакового щебеню, останній містить більше водорозчинних та рухомих форм оксидів важких металів. Отже, важкі метали (ВМ), що містяться у шлаках, є біологічно активними металами, що негативно впливають на фізіологічні функції людини, біоти і стан довкілля. Їх відповідний вплив на указані компоненти передбачається оперативно оцінювати засобами спеціалізованої ГІС, зокрема, за методикою [5–7].

Аналіз емісії важких металів зі шлаку. З точки зору оцінки екологічної небезпеки шлакового щебеню достатньо показовими можна вважати результати досліджень емісії важких металів: заліза, марганцю, ванадію і титану зі шлаку в рідкі модельні середовища на протязі 30 діб [15]. Виявлено, що залежність емісії ВМ заліза та марганцю з шлакового щебеню в дистильовану (дощову) воду мала явно виражений екстремальний характер. Пояснено це тим, що разом з іонами указаних ВМ відбувається виділення зі шлаку іонів Ca_2^+ і Mg_2^+ та сульфідів, що приводить до підвищення pH середовища і утворення важкорозчинних гідроксидів і сульфідів ВМ. Максимум концентрації заліза і марганцю сягав відповідно 24 та 10 мг/дм³. Концентрація ж ВМ – титану і ванадію зростала на протязі 10 діб від 0 до практично сталого рівня приблизно у 20 та 1,5 мг/дм³. Для подальшого використання указаних залежностей, зокрема у базі знань спеціалізованої ГІС, нами представлено їх у вигляді двох кінетичних кривих, характерних для емісії ВМ, що містяться у шлаку, які дозволили узагальнити часові закономірності їх вилигування (рис. 3).



Рис. 3. Кінетика емісії ВМ, що містяться у шлаку, в модельному середовищі: 1 – для заліза і марганцю у дистильованій воді; 2 – для титану і ванадію в амонійно-ацетатному буферному розчині ($pH = 4,8$)

Крива 1 на рис. 3 являє собою модель кінетики другого порядку, що є результатом дії двох протилежних процесів. Аналіз цієї моделі, показує, що інтенсивний процес емісії заліза та марганцю досягає рівня 0,95 від прийнятого за 1 максимального значення вже у кінці 1-ої доби і підтримується до початку 3-ої, після чого починає переважати, указаний вище процес запобігання емісії. Далі маємо убутну сигмоїдну криву, що досягає асимптоти, позначеної пунктирною лінією на рівні 0,2 від максимального значення вже приблизно після 10-ої доби, коли емісія металів падає практично у 5 разів і далі вже мало змінюється. Якісно схожий характер мають процеси вилуговування ВМ – міді, свинцю і кадмію і з гранульованих шлаків сілікомарганцю [17].

Крива 2 емісії ванадію і титану, у вигляді наведеної на рис. 2 експоненти, є класичним рівнянням кінетики першого порядку. Її часова постійна – τ , що визначається дотичною до експоненти 2 в нульовій точці, дорівнює приблизно 1,2 доби. Оскільки ж експонентний процес такого виду завершиться через 3–5 τ , можна вважати, що емісія ванадію і титану в агресивному розчині практично припиняється на протязі від 3,5 до 6 діб.

Важливими для бази знань спеціалізованої ГІС результатами роботи [15] також можна вважати дані стосовно частки екстрагованих у модельні середовища металів зі шлакового щебеню після завершення динамічних процесів вилуговування. Так, вона після округлення склала: для заліза – 10%, марганцю – 5%, титану – 2,5% та ванадію – 0,3%., причому процес екстрагування, тобто міграції зі шлаку, будуть проходити активніше в кислих ґрунтах.

Рухомість важких металів в чорноземних ґрунтах Північного Степу України зазвичай незначна і рідко сягає 1,0 % від валових кількостей. Вміст рухомих форм важких металів в техноземі знаходився у зазначених межах [17] що свідчить: про надійне закріплення катіонів важких металів за рахунок буферної здатності ґрунту, а отже подальшій міграції токсикантів за трофічними ланцюгам. Валове ж розподілення важких металів з глибиною ґрунтового профілю має певні екстремуми їх концентрацій переважно на глибинах до 50 см від поверхні, а глибше спостерігається зниження до нульового або до певного сталого рівня. Так, для міді екстремум у 80 мг/кг припадає на глибину 15...20 см; для свинцю – відповідно 80 мг/кг; для марганцю ж максимальні значення концентрації у 3400 мг/кг спостерігаються на глибині від 0 до 25 см і зменшуються в e раз на глибині 140...150 см.

Визначення гранулометричного складу шлаків. Гранулометричний складу шлаків є також важливого екологічним показником, який, з одного боку, впливає на насипну густину (щільність) шлаку, яка дозволяє визначити обсяги його складування як вторинного ресурсу засобами спеціалізованої ГІС, а, з іншого, – визначає об'єми порожнин між його частками, куди потрапляє вода атмосферних опадів, а також площу контактної поверхні складованих шлаків з атмосферою.

Металургійний шлак охолоджений водою зберігає природний розмір часток, що варіюється в межах від зерен розміром 1...1.6 мм до кусків розміром порядку 250 мм, визначеного візуально. Загальний вигляд шлаку, що дає певне уявлення про розміри його часток, гранул чи кусків тобто про різноманітний гранулометричний склад, наведений на рис 4.

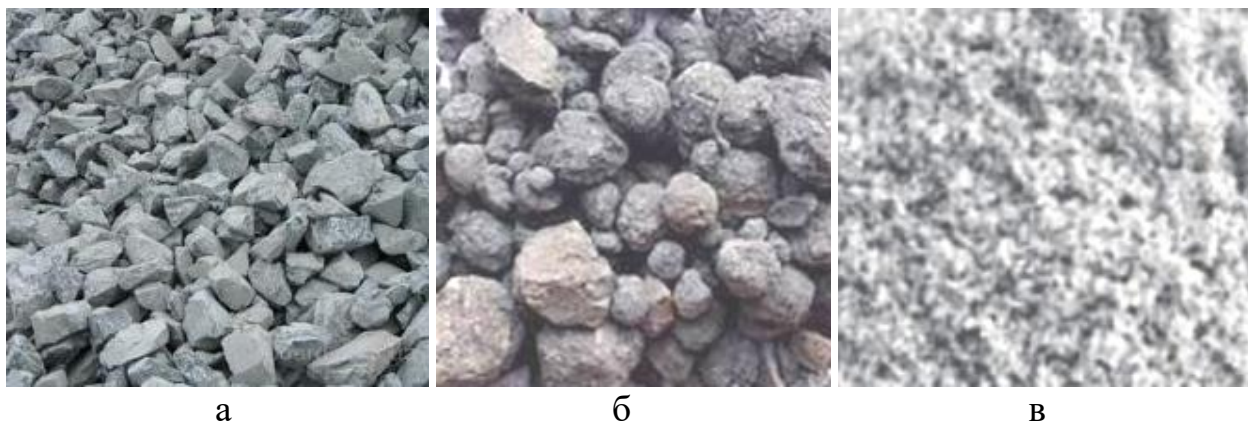


Рис. 4. Загальний вигляд: а – кускового доменного шлаку (1,125 м); б – шлакового щебеню (0,45 м); в – гранульованого шлаку (0,225 м), де в дужках наведений розмір нижнього обрізу зображення

Зазначимо, що новоутворений шлак практично не містить пилових фракцій (1...100 мкм), які утворюються лише при його перевантаженнях за рахунок тертя між гранулами, в результаті чого й утворюються мікроскопічні уламки у вигляді пилу. Пилові фракції шлаку також утворюється при розкладі шлаків під час тривалого складування (зберігання) на відкритих площадках.

Узагальнений нами гранулометричний склад гранульованих шлаків за даними [17], отриманими на основі ситового аналізу, наведений на рис. 5.

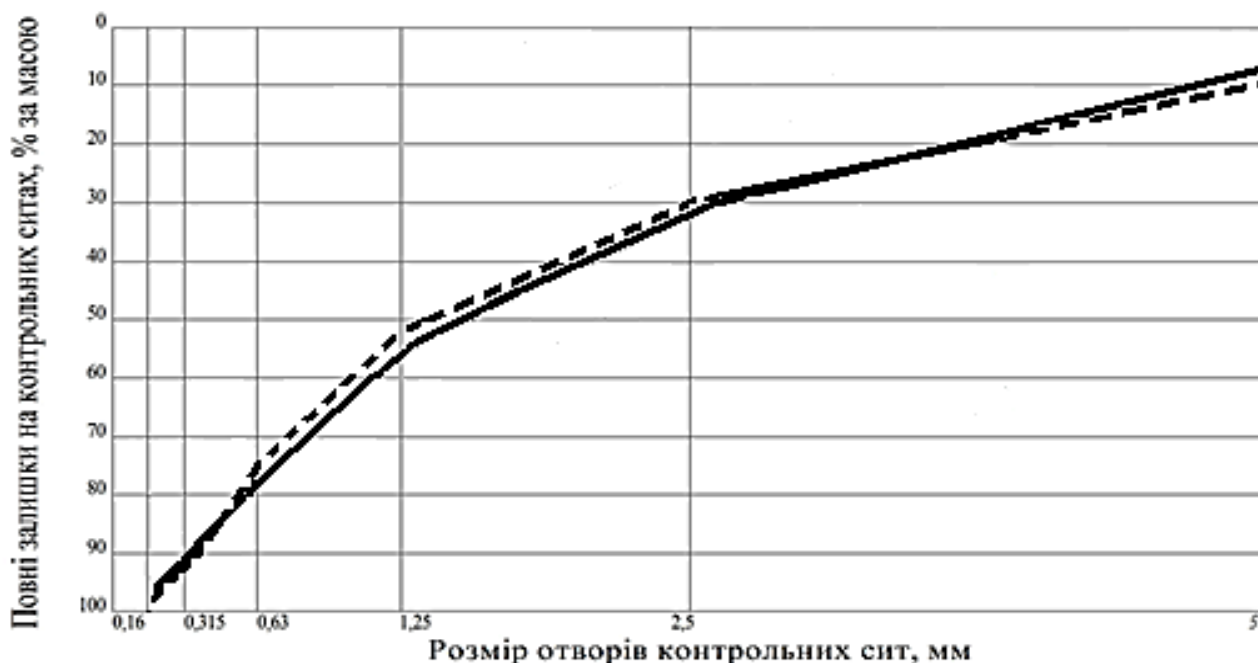


Рис. 5. Співвідношення зернового складу доменного гранульованого шлаку ПАТ «СВРАЗ – ДМЗ ім. Петровського» (пунктирна лінія) та гранульованих шлаків силікомарганцю ПАТ «НЗФ» (суцільна лінія)

Як видно з наведених графіків, масовий вміст найдрібніших фракцій шлаків, тобто менших за розмірами ніж мінімальний отвір контрольних сит – 1,6 мм, не перевищує 2%. Отже за мінімальний достовірний розмір частинок шлаку приймемо розмір 1,6 мм, а за максимальний – 250 мм. Середній же медіанний розмір гранул доменного шлаку складає $1,31 \pm 0,15$ мм, а силікомарганцю – $1,54 \pm 0,2$ мм, тобто варіація склала не більше ± 13 %.

Наведені вище дані дозволять визначити об'ємні та масові показники накопичуваних на полігонах шлаків картографічними та аналітичними засобами ГІС, а також інтенсивність емісії у навколишнє середовище різних забруднювачів, включаючи важкі метали, що входять до хімічного складу шлаків.

Висновки. Систематизовано екологічно значимі характеристики і показники металургійних шлаків та виконано їх відбір до бази знань спеціалізованої ГІС контролю і управління металургійними шлаковими відходами. Визначено певні діапазони можливих змін показників, необхідних для визначення ресурсного потенціалу складованих шлаків. Запропоновано концепцію управління шлаковими відходами на основі використання типової схеми автоматизованого управління технологічними процесами, а реалізація її функцій пропонується із застосуванням спеціалізованої ГІС, побудованої на основі типової ГІС еколого-економічного типу.

Головним принципом формування бази знань спеціалізованої ГІС стало забезпечення роботи її підсистем прикладних задач з побудовою прогнозних електронних карт та моделей, необхідних для прийняття певних ресурсозберігаючих та екологічних рішень стосовно накопичення і утилізації шлаку на територіях складування чи масового застосування шлакових відходів.

Загальна інформація у базу знань відбиралася стосовно сталеплавильних, ваграночних та найбільш масових – доменних металургійних шлаків. На кількість їх утворення переважно впливає сірка, вапно та рівень технологічної оснащеності печей. Вихід доменних шлаків, на 1 т чавуну складає 0,6...0,7 т, при виплавці сталі мартенівським способом – 0,2...0,3 т, а в електропечах – 0,1...0,04 т. Склад і властивості шлаків у відвалі виявляються різними і по висоті, і по простяганню відвалу. Фазовий склад залежить переважно від модуля основності: у кислих, з найбільшою ймовірністю утворюється склоподібна фаза, а в нейтральних і основних – кристалічна.

Ресурсний потенціал шлаків оцінювався можливістю їх утилізації чи застосування у певній галузі, причому масові обсяги складованого шлаку рекомендовано визначати за їх об'ємом, отриманим у ГІС з урахування густини матеріалу шлаку, що оцінена з вірогідністю близько 0,7 та становить в середньому – $2850 \text{ кг/м}^3 \pm 5\%$, а насипна щільність продукту – $1400 \text{ кг/м}^3 \pm 7\%$.

Екологічна небезпека металургійних шлаків оцінювалася за хімічним складом речовин, в тому числі і важкими металами, що містяться у вигляді різних оксидів та домішок.

Аналіз емісії важких металів зі шлаку проводився з позицій оцінки екологічної небезпеки міграції з нього заліза, марганцю, ванадію і титану. Встановлено, що інтенсивний процес емісії заліза та марганцю у воду опадів досягає рівня 0,95

(від максимального, прийнятого за 1) вже у кінці 1-ої доби і підтримується до початку 3-ої, після чого, через специфічний зустрічний процес запобігання емісії, переходить в убутну сигмоїдну криву, що досягає асимптоти на рівні 0,2 приблизно після 10-ої доби. Якісно схожий характер мають процеси вилуговування міді, свинцю і кадмію і з гранульованих шлаків сілікомарганцю. Емісія ж ванадію і титану в агресивному розчині має вигляд експоненти, що зростає від 0 до асимптоти відносного рівня 1 з часовою постійною приблизно 1,2 доби, а далі на протязі від 3,5 до 6 діб емісія практично залишається на сталому рівні.

Гранулометричний склад шлаків, а також об'єми порожнин між його частками, запропоновано характеризувати для відвального шлаку мінімальним та максимальним розміром частинок – 1,6 мм та 250 мм, відповідно, а для гранульованого доменного шлаку і шлаку сілікомарганцю середнім медіанним розміром гранул відповідно – $1,31 \pm 0,15$ мм та $1,54 \pm 0,2$ мм, отже варіація склала не більше ± 13 %.

Перелік посилань

1. Большаков, В. И., Калиниченко, Н. В., & Щербак, С. А. (2009). Возможности использования отходов промышленности при изготовлении строительных. *Строительство, материаловедение, машиностроение. Сер. Стародубовские чтения сб. науч. тр. ПГАСА*, 48(3), 255-260.
2. Устойчивость и активность шлаков. *Вторичные строительные материалы. Технологии строительных материалов из отходов разборки зданий и металлургии* (2009). <http://s-center.ru/2009/06/ustojchivost-i-aktivnost-shlakov>
3. Украинский опыт использования металлургических шлаков. *Материал по практическому применению шлака*. (2012). https://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=7535
4. Саричева, Л.В. (2003). *Комп'ютерний еколого-соціально-економічний моніторинг регіонів. Математичне забезпечення: Монографія*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет.
5. Колесник, В.Є., & Павличенко А.В. (2016). Методологія експертного оцінювання рівня екологічної небезпеки функціонування та ліквідації вугільних шахт. *Міжвідомчий зб. наук. праць. Геотехнічна механіка*, 127, 141-150.
6. Колесник, В.Є., & Павличенко, А.В. (2017) Методологічний підхід до комплексної оцінки рівня екологічної небезпеки, обумовленого багаторічною експлуатацією та ліквідацією вугільних шахт. *Зб. наук праць VI Всеукраїнського з'їзду екологів з міжнародною участю (Екологія-2017)*, Вінниця: ВНТУ.
7. Колесник, В.Є., & Павличенко, А.В. (2017) *Методи оцінки екологічної небезпеки експлуатації і ліквідації вугільних шахт та напрями і засоби її зниження. Монографія*. Дніпро: Літограф.
8. Щербак, С. А., Калиниченко, Н. В., & Єлісєєва, М. О. (2010). Загальна характеристика металургійних шлаків. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури*, 2(3), 23–28.
9. Дворкин, Л. И., & Дворкин, О. Л. (2007). *Строительные материалы из отходов промышленности: учебно-справочное пособие*. Ростов н/Д.: Феникс.
10. Щербак, С. А. (2000). *Научные основы управления структурой строительных материалов на основе металлургических шлаков. (Дисс. д-ра техн. наук: 05.23.05)*. Днепропетровск.
11. Баталин, Б.С. (2003) *Вред и польза шлаковых отвалов* http://vivovoco.astronet.ru/VV/JOURNAL/NATURE/10_03/DRECK.HTM

12. Баталин, Б.С., Беляева, И.В., & Макарова Л.Е. (1996). О взаимосвязи между фазовым составом феррованадиевого самораспадающегося шлака и его вяжущими свойствами. *Журн. прикл. химии*, 69(1), 162-164.
13. Большаков, В. И., Борисовский, В. З., & Глуховский В. Д. (1999). *Металлургические шлаки в строительстве: для научных работников, инженеров и студентов высших технических учебных заведений*. Днепропетровск.
14. Большаков, В. И., Бондаренко, Г. М., & Головкин, А. И. (2006) *Напряжки і перспективи використання відходів металургійної, гірничорудної та хімічної промисловості в будівництві*. Дніпропетровськ: Gaudeamus.
15. Пугин, К.Г., Вайсман, Я.И., Волков, Г.Н., & Мальцев, А.В. (18.01.2021). Оценка негативного воздействия на окружающую среду строительных материалов содержащих отходы черной металлургии. *Современные проблемы науки и образования*, 2. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=5990>
16. Щербак, С. А., Елисеева, М. А., & Калиниченко, Н. В. (2009). Характеристика шлаков и их активация. *Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури ПДАБА*, 11, 4–8.
17. Спильник, Н. В. (2013). Доменные граншлаки как источник загрязнения почвы. *Ежемесячный научно-практический журнал «Апробация»*, 4 (7), 20-22.

АННОТАЦИЯ

Цель. Выбор экологически значимых показателей, необходимых для формирования информационной базы знаний специализированной ГИС контроля и управления металлургическими шлаковыми отходами.

Методика исследования предусматривала научное обоснование отбора определенных экологически значимых характеристик и показателей металлургических шлаков на основе систематизации и обобщения известных данных их свойств, а также анализ значений определенных показателей необходимых для определения ресурсного потенциала шлаков и их экологической опасности.

Результаты исследования. Предложена концепция контроля и управления шлаковыми отходами на основе соответствующей специализированной ГИС. В ее базы знаний отбирались показатели и характеристики сталеплавильных, ваграночных и наиболее массовых – доменных металлургических шлаков. Ресурсный потенциал шлаков предусмотрено оценивать по объемам их накопления и возможностью утилизации или применения в определенных отраслях, а экологическая опасность – по химическому составу.

Научная новизна заключается в следующем:

- при определении ресурсного потенциала шлаков, его массу в отвале рекомендуется определять по их объему, полученным средствами ГИС, с учетом плотности материала шлака, составляет в среднем – $2850 \text{ кг} / \text{м}^3 \pm 5\%$.
- процесс эмиссии железа и марганца в дистиллированную воду достигает относительного уровня 0,95 уже в конце первого дня и поддерживается в начале третьего, после чего переходит в убывающую сигмовидную кривую, достигает асимптоты примерно после десятых суток, и затем уже мало изменяется; эмиссия же ванадия и титана в агрессивной растворе имеет вид экспоненты.
- гранулометрический состав шлаков, обуславливает объемы его складирования через влияние на насыпную плотность, предложено характеризовать для отвального шлака минимальным и максимальным размером частиц или кусков – 1,6 мм и 250 мм, а для гранулированного доменного шлака и шлака силикомарганца средним медианным размером гранул – $1,31 \pm 0,15 \text{ мм}$ и $1,54 \pm 0,2 \text{ мм}$ соответственно.

Практическое значение. Определены конкретные значения или диапазоны изменений показателей ресурсного потенциала шлаков, а также их экологической опасности для окружающей среды по факторам, которые в совокупности обуславливают миграцию загрязняющих веществ из шлака в сточную воду, фильтрацию в почвы, и эмиссию в атмосферу.

Ключевые слова: ресурсный потенциал металлургических шлаков; экологическая опасность шлаков для окружающей среды; характеристики и показатели шлаков; база знаний специализированной ГИС.

ABSTRACT

Purpose. The justification of environmentally significant indicators for information knowledge base of specialized GIS the formation to control and management of metallurgical slag waste.

The research methodology provided for the scientific substantiation of the selection of certain ecologically significant characteristics and indicators of metallurgical slags on the basis of systematization and generalization of known data on their properties, as well as analysis of the values of certain indicators or ranges of their possible changes necessary to determine the resource potential of the slags and their environmental hazard.

Research results. The concept of control and management of slag waste based on the corresponding specialized GIS is proposed. In its knowledge base, indicators and characteristics of steelmaking, cupola and the most massive – blast furnace metallurgical slag were selected. The resource potential of slags is envisaged to be assessed by the volume of their accumulation and the possibility of utilization or use in certain industries, and the environmental hazard – by chemical composition.

Scientific novelty is as follows:

- when determining the resource potential of slags, its mass in the dump is recommended to be determined by their volume obtained by GIS tools, taking into account the density of the slag material, on average – $2850 \text{ kg/m}^3 \pm 5\%$.
- the process of emission of iron and manganese into distilled water reaches a relative level of 0.95 already at the end of the first day and is maintained at the beginning of the third, after which it turns into a decreasing sigmoid curve, reaches an asymptote maximum value, after about a tenth day, and then changes little; the emission of vanadium and titanium in an aggressive solution has the form of an exponential.
- the granulometric composition of slags, determines the volumes of its storage through the effect on the bulk density, it is proposed to characterize the minimum and maximum size of particles or lumps for waste slag – 1.6 mm and 250 mm, and for granulated blast-furnace slag and silicomanganese slag with an average median size of granules – $1.31 \pm 0.15 \text{ mm}$ and $1.54 \pm 0.2 \text{ mm}$, respectively.

Practical value. Specific values or ranges of possible changes in indicators of slags resource potential, as well as their environmental hazard to the environment by factors that, in aggregate, determine the migration of pollutants from the slag into waste water, have been determined, soil filtration, and emissions into the atmosphere.

Keywords: resource potential of metallurgical slags; ecological danger of slags for the environment; characteristics and indicators of slags; knowledge base of specialized GIS.