

Є. С. Лапшин¹, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0002-5443-5566О. І. Шевченко^{1,*}, д.т.н., с.н.с., ORCID 0000-0003-2630-0186¹ Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України* Автор для листування: igtm.aishevchenko@gmail.com

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ТОНКОГО ГРОХОЧЕННЯ МЕТАЛУРГІЙНИХ ВІДХОДІВ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЧАСУ ПЛАНОВО-ПОПЕРЕДЖУВАЛЬНОГО ОЧИЩЕННЯ ПОВЕРХНІ, ЩО ПРОСІВАЄ

Анотація. Чорна металургія належить до базових галузей промисловості та, поруч із паливно-енергетичним комплексом, визначає конкурентоспроможність економіки нашої країни. Металургійне виробництво в Україні супроводжується утворенням величезної кількості промислових відходів. Близько 80% їх складають шлаки, близько 20% посідають пил і шлами газоочисток. Грохочення шлаку зазвичай проводиться для поділу матеріалу на фракції різного розміру, що дозволяє: отримувати цінні металеві включення; готувати шлак до подальшої переробки чи утилізації; отримувати матеріал певної крупності для будівельних або промислових потреб. Шлак через свій склад, неоднорідність і здатність утримувати вологу являє собою складний матеріал для грохочення; ці фактори можуть знижувати ефективність процесу та збільшувати час простоїв устаткування для очищення поверхні, що просіває; істотно скорочується термін роботи поверхні, що просіває, грохоту. Забивання чарунок поверхні, що просіває, призводить до втрати продуктивності, зниження якості продукції, збільшує простої і трудовитрати. Динаміка забивання чарунок поверхні, що просіває, описана марківським процесом з безперервним часом і двома дискретними станами («вільно» / «забито»). Процес забивання чарунок при класифікації сировини, що важко класифікується, математично описаний як процес чистої загибелі. Час роботи грохоту до очищення розраховується шляхом множення тривалості пробного експерименту на відношення логарифму допустимої частки чистих чарунок до логарифму частки чистих чарунок, отриманої під час цього експерименту. Розрахунок дозволяє визначити оптимальний інтервал часу між очищеннями (або спрацьовуваннями очисних пристроїв). Це виключає як передчасні зупинки (зайві простої), так і роботу на «забитій» поверхні, що просіває, з низькою ефективністю. Для підприємств, що прагнуть отримати максимальну користь зі шлаку (переробка, рекуперація матеріалів або

© Є. С. Лапшин, О. І. Шевченко, 2026

Це стаття відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND 4.0
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/legalcode.uk>

виробництво заповнювачів) необхідно мати устаткування, яке стане надійним і економічно вигідним рішенням для виконання цих завдань. Завдяки здатності працювати з твердими матеріалами та забезпечувати стабільні результати, грохот перетворює процес класифікації шлаку зі складного завдання на можливість для підвищення ефективності виробництва.

Ключові слова: металургійні відходи, шлак, переробка, тонке грохочення, поверхня, що просіває, чарунки, забивання, час планово-попереджувального очищення, математичне моделювання.

Посилання для цитування: Лапшин Є. С., Шевченко О. І. Обґрунтування застосування тонкого грохочення металургійних відходів та визначення часу планово-попереджувального очищення поверхні, що просіває. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2026. Вип. 40. С. 562-576. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-033>

Вступ

Згідно з рішенням Ради національної безпеки та оборони України від 16 липня 2021 року «Про стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин, що мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави», зазначено перелік корисних копалин, що мають першорядне значення для розвитку економіки держави [1]. Їх видобуток і переробка є складним і дорогим процесом. Разом з тим є можливості комплексно переробляти сировину зі сховищ, де накопичуються відходи збагачення гірничодобувних та промислових підприємств [2].

Чорна металургія належить до базових галузей промисловості та, поруч із паливно-енергетичним комплексом, визначає конкурентоспроможність економіки нашої країни. Металургійне виробництво в Україні супроводжується утворенням величезної кількості промислових відходів, що сягає 30% обсягу випуску сталі. Близько 80% їх складають шлаки, біля 20% посідають пил і шлами газоочисток. Обсяг накопичених на металургійних підприємствах України металургійних шлаків – більше ніж 160 млн т, понад 70 млн т шламів, з яких 21 млн т придатні для повторного використання. На частку металургії припадає 38% загальних викидів промисловості України, з них на частку чорної металургії – 16% [3-10].

Враховуючи, що при виплавці 1 т сталі, зі шлаком втрачається до 40 кг заліза у вигляді оксидів, скрапів та корольків, а також його мінеральна складова, переробка дозволить знизити витрату природних сировинних ресурсів та покращити екологічну обстановку на прилеглих до відвалів територіях. В даний час проблему утилізації шлаків вирішують двома шляхами:

– шлак у рідкому або твердому стані повертають у технологічний

процес для отримання *залізовуглецевих сплавів*;

– шлак виводять із металургійного циклу та використовують у господарській діяльності [3-10].

Найбільш поширеною є технологія з використовувати поетапного дроблення та подрібнення з подальшою класифікацією і мокрою магнітною сепарацією для видалення металевого скрапу. Цей метод переробки шлаку дозволяє ефективно видалити металеву фазу з крупних класів. У той же час у дрібних класах шлаку присутня значна кількість заліза, як у формі *металевого скрапу (зашлаковані відходи чорних або кольорових металів, металобрухт)*, так і у формі оксидів заліза, які не вилучаються [7, 10].

Наявність у шлаху від 37 до 52% заліза та понад 6,5% вуглецю дозволяє розглядати їх як *цінну металургійну сировину*. Дослідженнями встановлено, що найвищий вміст заліза та вуглецю знаходиться у класах -0,6+0,02 мм. Якщо виділити ці класи, можна отримати товарні продукти. Близько 70% шлаку представлено частинками розміром понад 0,02 мм. Ці результати вказують на необхідність використання тонкого грохочення за вказаними класами крупності [3-10]. Як відомо ефективність грохочення залежить від властивостей сировини, яка переробляється. Особливо це стосується тонкого грохочення, бо при переробці абразивних, важких і складних матеріалів для розсіву істотно скорочується термін роботи робочої поверхні грохоту (поверхні, що просіває, сітки). Тому необхідно періодично здійснювати контроль стану поверхні, яка просіває, та мати можливість визначення часу планово-попереджувального її очищення.

Методи

У цьому дослідженні було використано такі методи: аналітичний огляд літературних джерел, метод моделювання загибелі та розмноження. Під час аналізу стану питання використані інформаційні ресурси Інтернет-мережі.

Мета роботи – обґрунтування необхідності використання тонкого грохочення при переробці металургійних відходів (сировини, що важко класифікується) та визначення часу планово-попереджувального очищення поверхні, що просіває.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні задачі:

- аналіз властивостей сировини;
- аналіз факторів які впливають на ефективність грохочення при переробці сировини, яка важко збагачується;
- математичне моделювання процесу забивання чарунок поверхні, що просіває.

Результати досліджень

Аналіз властивостей сировини

Більшість металургійних шлаків, хоч і мають ресурсну цінність, у буквальному сенсі зберігаються просто неба. 54,5% їх обсягу розміщується у відвалах або на тимчасових складах після видобутку з них скрапу та флюсів для застосування у технологічному процесі [3-10].

Грохочення шлаку зазвичай проводиться для поділу матеріалу на фракції різного розміру, що дозволяє [11]:

- отримувати цінні металеві включення;
- готувати шлак до подальшої переробки чи утилізації;
- отримувати матеріал певної крупності для будівельних або промислових потреб (наприклад, для виробництва цементу, поліпшення властивостей ґрунту або використання як заповнювача при дорожньому будівництві).

Однак цей процес пов'язаний із низкою труднощів.

Особливості переробки шлаку

Шлак – це побічний продукт, що утворюється в процесі плавки та рафінування металів (сталі, чавуну, міді та кольорових металів). До його складу входять переважно домішки, оксиди металів та флюси – добавки, що використовуються для видалення домішок. Через свій склад, неоднорідність і здатність утримувати вологу шлак являє собою складний матеріал для грохочення; ці фактори знижують ефективність процесу та збільшують час простоїв устаткування для очищення поверхні, що просіває [11].

Різномірний склад та широкий діапазон розмірів частинок

Складний хімічний склад шлаку ускладнює відокремлення цінних компонентів від відходів. Крім того, частки шлаку сильно розрізняються за розміром (від глини і дрібного пилу до великих шматків), що ускладнює грохочення [11].

Форма зерен

Шлак (доменний кусковий або сталеплавильний) розколюється на частинки з гострими краями та складною формою. Такі частки працюють як клини, застряючи в чарунках поверхні, що просіває [11].

Висока твердість та абразивність

Шлак часто містить тверді та абразивні включення, здатні викликати значне зношування обладнання для грохочення. Згодом це призводить до зростання витрат на технічне обслуговування та скорочення терміну служби техніки [11].

Волога та коксування

Деякі види шлаку, особливо після охолодження або при контакті з

водою, здатні утримувати вологу, що призводить до комкування або злипання частинок. Це знижує ефективність грохочення, оскільки грудки можуть забивати чарунки поверхні, що просіває, порушуючи процес поділу та зменшуючи продуктивність. Зберігання металургійного шлаку на відкритому повітрі у поєднанні з природною вологістю (опаді, ґрунтова волога) та домішкою глини створює важкі умови для розсіву. У цій ситуації переробники стикаються з комбо-ефектом (це посилений результат, який виникає при правильному поєднанні кількох різних дій або елементів): пориста структура шлаку вбирає дощову воду, активізуються його в'язучі властивості (цементация), а природна глина пов'язує все це щільну, пластичну масу. В деяких випадках за таких умов поверхня, що просіває, забивається за 15–30 хвилин роботи [11].

Утворення пилу

У процесі переробки може виділятися велика кількість пилу, особливо під час роботи з дрібними фракціями. За відсутності належного контролю цей пил може становити загрозу як здоров'ю персоналу, так і для навколишнього середовища [11].

Енергоспоживання

Процес грохочення шлаку може бути енергоємним, особливо під час роботи з великими обсягами або твердими абразивними матеріалами [11].

Аналіз факторів які впливають на ефективність грохочення при переробці сировини, яка важко класифікується

Грохочення – один з найбільш поширених та енергоємних процесів у гірничо-переробній, металургійній, будівельній та інших галузях. Ефективність поділу мінеральної сировини та техногенних матеріалів по значимості безпосередньо визначає техніко-економічні показники наступних технологічних операцій – від подрібнення та збагачення до кінцевої якості товарної продукції [12-14]. В умовах тенденції залучення до переробки сировини, що важко збагачується зі складною текстурно-структурною характеристикою та високою вологістю вимоги до точності класифікації та надійності технологічного обладнання суттєво зростають.

Однак однією з головних проблем при розсіві вологих, глинистих або дрібнофракційних матеріалів залишається забивання (залипання і заклинювання) поверхонь, що просівають [12-14].

Фізичні причини залипання та заклинювання

1. Вологість та капілярні сили [11, 15]

– за рахунок поверхневого натягу створюються капілярно-стикові містки. Рідина пов'язує дрібні фракції між собою та з

металом/поліуретаном поверхні, що просіває;

– агломерація, тонкі фракції під впливом вологи скочуються в грудки (агломерати), які перекривають робочу площу чарунок.

2. Адгезія та пластичність глини (причина заростання) [11, 15]

– висока липкість, бо глинисті мінерали мають високу адгезивну здатність (прилипання) як між собою, так і на частинки інших матеріалів.

3. Наявність «важких» часток (причина заклинювання) [11, 15]

– критичні («близькі») фракції: найнебезпечнішими є частинки, розмір яких становить від 0,75 до 1,1 від розміру чарунки поверхні, що просіває;

– форма часток: лещадні, голчасті або мають гострі відколи частки легко заходять в чарунку під кутом; під дією вібрації та тиску вищележачого шару матеріалу вони заклинюють чарунки, перекриваючи живий переріз поверхні, що просіває [15, 16].

Актуальність усунення проблеми забивання (залипання і заклинювання) поверхонь, що просівають, зумовлена кількома факторами [12-14]:

- Втрати продуктивності. Забивання чарунок поверхні, що просіває, знижує живий переріз, що веде до падіння пропускної здатності грохоту і порушення всього технологічного циклу.

- Зниження якості кінцевої продукції. При забитій поверхні, що просіває, погіршується чіткість поділу по фракціях, а дрібний клас потрапляє в надрешітний продукт, що знижує товарний вигляд і вартість сировини.

- Зростання експлуатаційних витрат. Часті зупинки обладнання для ручного очищення поверхні, що просіває, збільшують прості і трудовитрати.

Математичне моделювання процесу забивання чарунок поверхні, що просіває

Процес забивання чарунок поверхні, що просіває, являє собою безперервний у часі марківський процес з дискретною безліччю станів (вільний або забитий стан чарунки) [17, 18].

Моделі такого роду називаються процесами загибелі та розмноження. Їхній математичний фундамент заклав Вільгельм Феллер, застосовувавши даний метод до біологічних популяцій, в яких зміни станів відображають реальне народження та загибель особин [19].

В даний час моделі загибелі та розмноження широко застосовуються у фізиці, техніці, медицині і т. д.

Система рівнянь Колмогорова для процесу загибелі та

розмноження [20]:

$$\begin{cases} dP_x(t)/dt = \lambda(t)(x-1)P_{x-1}(t) - (\lambda(t) + \mu(t))xP_x(t) + \\ \quad + \mu(t)(x+1)P_{x+1}(t), \quad x=1, 2, \dots, \\ dP_0(t)/dt = \mu(t)P_1(t). \end{cases}$$

де $P_x(t)$ – ймовірність того, що в момент часу t популяція перебуває у стані x ; $x(t)$ – кількість організмів у популяції на момент часу t .

Початкові умови $P_x(0) = 1$ для $x = 1$ і $P_x(0) = 0$ для $x \neq 1$.

Для процесу чистої загибелі, у якому можливі переходи ($\lambda(t) = 0$), виключно у суміжний менший стан, отримано вираз для математичного очікування чисельності популяції [20]:

$$M = x_0 \exp(-\mu t). \quad (1)$$

Процес чистої загибелі дозволяє аналізувати забивання чарунок при просіванні сировини з високим вмістом глини і «важких» частинок, коли самоочищення поверхні, що просіває, практично відсутнє.

У контексті теорії грохочення інтерпретація параметрів популяційної динаміки має такий вигляд: чисельність популяції ототожнюється з кількістю чарунок N_0 поверхні, що просіває, а інтенсивності загибелі та народження особин – з інтенсивністю забивання та очищення чарунок відповідно.

Позначимо

$$S(t) = \frac{M(t)}{N_0}.$$

Це відношення назвемо часткою чистих чарунок у момент часу t . Тоді (1) набуває вигляду:

$$S(t) = \exp(-\mu t). \quad (2)$$

На підставі експериментальних даних про частку чистих чарунок $S(t_e)$ за час роботи грохота t_e з виразу (2) розраховується інтенсивність забивання чарунок

$$\mu = -\frac{1}{t_e} \ln[S(t_e)]. \quad (3)$$

Дані $S(t_e)$ і t_e назвемо результатами попереднього експерименту.

Підставимо (3) в (2) визначимо частку чистих чарунок у довільний момент часу t

$$S(t) = \exp \left\{ \frac{t}{t_e} \ln [S(t_e)] \right\}. \quad (4)$$

Формула (4) дозволяє на основі експериментальних даних про частку чистих чарунок в момент часу спрогнозувати їх частку в момент часу t

Сімейство кривих залежності $S(t)$ від $S(t_e)$ при варіюванні відношення t/t_e , розраховане за формулою (4), наведено на рис. 1.

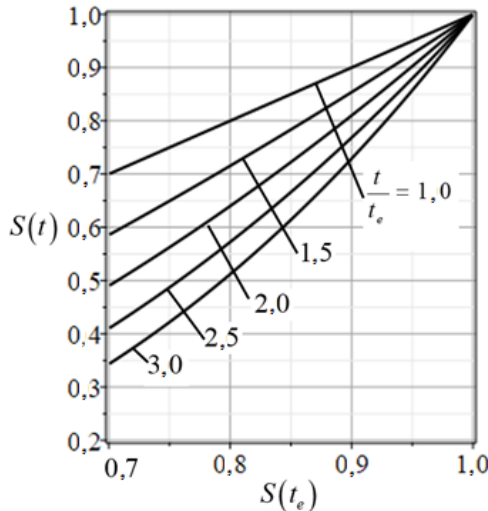


Рисунок 1 – Сімейство кривих залежності $S(t)$ від $S(t_e)$ при різних значеннях відношення t/t_e

З рис. 1 слідує, що ставлення t/t_e істотно впливає на геометрію досліджуваної функції. Зі зростанням t/t_e спостерігається монотонне збільшення кривизни функції, що свідчить про зростання нелінійності модельованого процесу та підвищення її чутливості до зміни $S(t_e)$.

Нехай прийнятні результати грохочення забезпечуються при допустимій частці чистих чарунок S^* . Замінивши в (4) $S(t)$ на S^* і

вирішивши отримане показове рівняння щодо t , визначимо час, коли потрібно очищення поверхні, що просіває, який позначимо t_c

$$t_c = t_e \frac{\ln S^*}{\ln [S(t_e)]}. \quad (5)$$

Розрахований час t_c слід використовувати як базовий параметр при визначенні інтервалів очищення грохоту (імпульсного, ультразвукового або механічного) в технічному регламенті.

Тривалість очищення слід вибирати таким чином, щоб повністю відновити живий переріз з мінімальними енерговитратами і без пошкодження поверхні, що просіває.

Допускається забивання від 0,15 до 0,25 чарунок [12, 13] – тобто чистими повинні залишатися від 0,75 до 0,85.

Приклад визначення часу очищення поверхні, що просіває

У ході попереднього експерименту було встановлено, що через $t_e = 1$ за годину безперервної роботи грохоту частка чистих чарунок становить $S(t_e) = 0,94$.

Визначити момент часу, при якому необхідно виконувати очищення поверхні, що просіває, виходячи з умови, що допустима частка чистих чарунок становить 0,8.

Розрахунок за формулою (5) дає наступний результат:

$$t_c = 1,0 \frac{\ln 0,80}{\ln 0,94} \approx 3,6 \text{ год.}$$

Це значення часу стане основою для налаштування періодичності роботи очисників поверхні, що просіває, в загальному регламенті обслуговування грохоту.

Наведений приклад наочно демонструє простоту розрахунку часу очищення поверхні, що просіває.

Висновки

Чорна металургія належить до базових галузей промисловості та, поруч із паливно-енергетичним комплексом, визначає конкурентоспроможність економіки нашої країни. Металургійне виробництво в Україні супроводжується утворенням величезної кількості промислових відходів, що сягає 30% обсягу випуску сталі. Близько 80% їх складають шлаки, близько 20% посідають пил і шлами газоочисток. Попередні результати вказують на необхідність при переробці відходів використання тонкого грохочення за вказаними

класами крупності. Як відомо ефективність грохочення залежить від властивостей сировини, яка переробляється.

Більшість металургійних шлаків, хоч і мають ресурсну цінність, у буквальному сенсі зберігаються просто неба. 54,5% їх обсягу розміщується у відвалах або на тимчасових складах після видобутку з них скрапу та флюсів для застосування у технологічному процесі.

Грохочення шлаку зазвичай проводиться для поділу матеріалу на фракції різного розміру, що дозволяє: отримувати цінні металеві включення; готувати шлак до подальшої переробки чи утилізації; отримувати матеріал певної крупності для будівельних або промислових потреб (наприклад, для виробництва цементу, поліпшення властивостей ґрунту або використання як заповнювача при дорожньому будівництві). Однак цей процес пов'язаний із низкою труднощів.

При переробці абразивних, важких і складних матеріалів для розсіву, таких як металургійний шлак, істотно скорочується термін роботи робочої поверхні грохоту (поверхні, що просіває, сітки).

Шлак через свій склад, неоднорідність і здатність утримувати вологу шлак являє собою складний матеріал для грохочення; ці фактори можуть знижувати ефективність процесу та збільшувати час простоїв устаткування для очищення поверхні, що просіває; істотно скорочується термін роботи робочої поверхні грохоту (поверхні, що просіває, сітки).

Забивання чарунок поверхні, що просіває, призводить до втрати продуктивності, зниження якості продукції, збільшує простої і трудовитрати.

Динаміка забивання чарунок поверхні, що просіває, описана марківським процесом з безперервним часом і двома дискретними станами («вільно» / «забито»).

Процес забивання чарунок при класифікації сировини, що важко класифікується, математично описаний як процес чистої загибелі.

Час роботи грохоту до очищення розраховується шляхом множення тривалості пробного експерименту на відношення логарифму допустимої частки чистих чарунок до логарифму частки чистих чарунок, отриманої під час цього експерименту.

Розрахунок дозволяє визначити оптимальний інтервал часу між очищеннями (або спрацьовуваннями очисних пристроїв). Це виключає як передчасні зупинки (зайві простої), так і роботу на «забитій» поверхні, що просіває, з низькою ефективністю.

Для підприємств, що прагнуть отримати максимальну користь зі шлаку (переробка, рекуперація матеріалів або виробництво заповнювачів) необхідно мати устаткування, яке стане надійним і

економічно вигідним рішенням для виконання цих завдань. Завдяки здатності працювати з твердими матеріалами та забезпечувати стабільні результати, грохот перетворює процес класифікації шлаку зі складного завдання на можливість для підвищення ефективності виробництва.

Перелік посилань

1. Верховна Рада України. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 16 липня 2021 року «Про стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин, які мають стратегічне значення для сталого розвитку економіки та обороноздатності держави». [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/306/2021#Text>
2. Пропозиції щодо удосконалення механізмів реалізації рішення РНБО про стимулювання пошуку, видобутку та збагачення корисних копалин. Український інститут майбутнього. 09 Вересня 2021. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uifuture.org/publications/propozycziyi-shhodo-udoskonalennya-mehanizmv-realizacziyi-rishennya-rnbo-shhodo-stymuluvannya-poshuku-vydobutku-ta-zbagachennya-korysnyh-kopalyn/>
3. Современные проблемы и решения в системе управления опасными отходами. Учебное пособие / А. М. Касимов, В. Т. Семенов, Н. Г. Щербань, В. В. Мясоєдов // Харьков: ХНАГХ, 2008. 510 с.
4. Носков В. А. Развитие научных разработок в области рециклирования промышленных отходов в черной металлургии / В. А. Носков // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2008. №16. С. 345-351.
5. Назюта Л.Ю. Анализ сырьевой базы металлургического производства. Железорудные материалы / Л. Ю. Назюта, Н. В. Косолап, А. В. Губанова // Металл и литье Украины. 2005. № 9-10. С. 3-7.
6. Ніколаєнко П. К. Технологія довилучення заліза з переробленого доменного шлаку / П. К. Ніколаєнко, К. В. Ніколаєнко, Ф. Г. Татаринов, Н. А. Яковенко // Збагачення корисних копалин. 2019. № 74(115). С. 13-18.
7. Бердинських О. Дохід з відходів: Україна може подвоїти переробку та експорт шлаків / О. Бердинських // GMK Center. – 2019. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://gmk.center.ua/posts/dohid-z-vidhodiv-ukraina-mozhe-pererobku-ta-eksport-shlakiv/> – Назва з екрану.
8. Лапшин Є. С., Шевченко О. І. Техногенні відходи України: оцінка їх негативного впливу на екологію, необхідність і можливості їх переробки шляхом тонкої класифікації та зневоднення. У книзі «Система управління відходами в циркулярній економіці: фінансові, соціальні, екологічні та енергетичні детермінанти»: монографія / за загал. ред. А. С. Росохатої, М. Г. Мінченко. Суми: Сумський державний університет, 2023. 313 с. С. 18-27. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/94661>
9. Lapshyn Ye. Feasibility of Fine Classification in Processing Watered Coal Sludge from Storage: A Case Study of the Dnipro Coke Chemical Plant / Ye. Lapshyn, O. Shevchenko, S. Dybrin, R. Dychkovskiy // Acta Montanistica Slovaca. 2025. Volume 30 (2025), 1. P. 100-113. <https://doi.org/10.46544/AMS.v30i1.07/>
10. Лапшин Є. С., Шевченко О. І. (2025), Обґрунтування можливості

отримання з техногенних відходів вторинної сировини, що містить цінні компоненти. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. Вип. 39. С. 160-174. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-09>

11. Aggregates Equipment, Inc. Overcoming Slag Screening Challenges. 04.14.25. URL: <https://aeiscreens.com/news/slag-screening-challenges/>

12. King, R. P. Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems / R. P. King. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2001. 403 p.

13. Wills, B. A. Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery / B. A. Wills, T. Napier-Munn. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 444 p.

14. Білецький, В. С. Основи техніки та технології збагачення корисних копалин: навч. посібн. / В. С. Білецький, Т. А. Олійник, В. О. Смирнов, Л. В. Скіяр. К. : Видавництво Ліра-К, 2020. 634 с.

15. Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Анализ состояния развития вибрационного грохочения при обезвоживании минерального сырья. Сб. научн. трудов ИГТМ НАН Украины «Геотехническая механика». Днепропетровск, 2012. Вип. 101. С. 84–104. <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/54004/11-Lapshin.PDF?sequence=1>

16. Білецький В. С., Смирнов В. О. Технологія збагачення корисних копалин (видання друге). Донецьк: Східний видавничий дім, 2009. 272 с. https://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/34510/1/Book_2009_Biletskyi_Tekh_nolohiia_zbahachennia.pdf

17. Надутый, В. П. Вероятностные процессы вибрационной классификации минерального сырья / В. П. Надутый, Е. С. Лапшин. К. : Наукова думка, 2005. 180 с.

18. Надутый, В. П. Определение времени планово-предупредительной очистки сита грохота / В. П. Надутый, Е. С. Лапшин // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2001. № 3. С. 55–57.

19. Birth-death process. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Birth%E2%80%93death_process

20. Bharucha-Reid, A. T. Elements of the Theory of Markov Processes and Their Applications / A. T. Bharucha-Reid; consulting editor D. Blackwell. New York; London: McGraw-Hill, 1960. 468 p.

References

1. Verkhovna Rada of Ukraine. On the Decision of the National Security and Defense Council of Ukraine dated July 16, 2021, "On Stimulating the Exploration, Extraction, and Beneficiation of Mineral Resources of Strategic Importance for the Sustainable Development of the Economy and the State's Defense Capability." URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/306/2021#Text>

2. Proposals for improving the mechanisms for implementing the NSDC decision on incentivizing the exploration, extraction, and processing of mineral resources. Ukrainian Institute for the Future. September 9, 2021. URL: <https://uifuture.org/publications/propozycziyi-shhodo-udoskonalennya-mehanizmv-realizacziyi-rishennya-rnbo-shhodo-stymulyuvannya-poshuku-vydobutku-ta-zbagachennya-korysnyh-kopalyln/>

3. Kasimov, A. M., Semenov, V. T., Shcherban, N. G., & Myasoedov, V. V.

(2008). *Modern problems and solutions in the hazardous waste management system*. Kharkiv National Academy of Agricultural Sciences

4. Noskov, V. A. (2008). Development of scientific research in the field of recycling of industrial waste in ferrous metallurgy. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 16, 345-351

5. Nazyuta, L. Yu., Kosolap, N. V., & Gubanova, A. V. (2005). Analysis of the raw material base of metallurgical production. Iron ore materials. *Metal and casting of Ukraine*, 9-10, 3-7

6. Nikolayenko P. K., Nikolayenko K. V., Tatarinov F. G., & Yakovenko N. A. (2019). Technology of additional iron extraction from processed blast furnace slag. *Mineral enrichment*, 74(115), 13-18

7. Berdyskyh, O. (2019). Income from waste: Ukraine can double the processing and export of slag. GMK Center. URL: <https://gmk.center.ua/posts/dohid-z-vidhodiv-ukraina-mozhe-podvoiti-pererobku-taeksport-shlakiv/>

8. Lapshin, Ye., & Shevchenko, O. (2023). *Technogenic waste in Ukraine: assessment of its negative environmental impact, and the necessity and possibilities for processing it through fine classification and dewatering*. In the monograph *Waste Management System in the Circular Economy: Financial, Social, Environmental, and Energy Determinants*, edited by A.S. Rosokhatata and M.H. Minchenko. Sumy: Sumy State University. P. 18–27. <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/94661>

9. Lapshyn, Ye., Shevchenko, O., Dybrin, S., Dychkovskiy, R. (2025). Feasibility of Fine Classification in Processing Watered Coal Sludge from Storage: A Case Study of the Dnipro Coke Chemical Plant. *Acta Montanistica Slovaca*. 30 (2025), 1,100-113. <https://doi.org/10.46544/AMS.v30i1.07/>

10. Lapshyn, Ye. S., & Shevchenko, O. I. (2025). Justification of the possibility of obtaining secondary raw materials containing valuable components from technological waste. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 39, 160-174. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2025-39-09>

11. Aggregates Equipment, Inc. Overcoming Slag Screening Challenges. 04.14.25. URL: <https://aeiscreens.com/news/slag-screening-challenges/>

12. King, R. P. (2001). *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 403 p

13. Wills, B. A., Napier-Munn, T. (2006). *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 7th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann. 444 p

14. Biletskyi, V. S., Oliynyk, T. A., Smyrnov, V. O., Skliar, L. V. (2020). *Fundamentals of Mineral Processing Machinery and Technology: A Study Guide*. Kyiv: Lira-K Publishing House. 634 p

15. Lapshin, Ye. S., & Shevchenko, A. I. (2012). Analysis of the state of development of vibration screening during the dehydration of mineral raw materials. *Geo-Technical Mechanics*. Issue 101. P. 84–104. URL: <http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/54004/11-Lapshin.PDF?sequence=1>

16. Biletskyi, V. S., Smyrnov, V. O. (2009). *Mineral Processing Technology*. Donetsk: Skhidnyi Vydavnychi Dim. 72 p. URL:

https://ea.donntu.edu.ua/bitstream/123456789/34510/1/Book_2009_Biletskyi_Tekh_nolohiia_zbahachennia.pdf

17. Nadutyi, V. P., & Lapshyn, E. S. (2005). *Probabilistic processes of vibrational classification of mineral raw materials*. Scientific opinion. 180 p.

18. Nadutyi, V. P., & Lapshyn, E. S. (2001). Determining the time of planned and preventive cleaning of the sieve screen. *Metallurgical and mining industry*, (3), 55–57.

19. Birth–death process. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Birth%E2%80%93death_process

20. Bharucha-Reid, A. T. (1960). *Elements of the Theory of Markov Processes and Their Applications*. Consulting editor D. Blackwell. New York; London: McGraw-Hill. 468 p

Ye. S. Lapshyn¹, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0002-5443-5566

O. I. Shevchenko^{1,*}, D. Sc. (Tech.), Senior Researcher, ORCID 0000-0003-2630-0186

¹ *M. S. Poliakov Institute of Geotechnical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine*

* *Corresponding author: igtm.aishevchenko@gmail.com*

JUSTIFICATION FOR THE APPLICATION OF FINE SCREENING OF METALLURGICAL WASTES AND DETERMINATION OF THE TIMING FOR SCHEDULED PREVENTIVE CLEANING OF THE SCREENING SURFACE

Abstract. Ferrous metallurgy is a core industrial sector that, alongside the fuel and energy complex, determines the competitiveness of our country's economy. Metallurgical production in Ukraine generates vast quantities of industrial waste. Slag accounts for approximately 80% of this waste, while dust and gas-cleaning sludges make up about 20%. Slag screening is typically performed to separate the material into fractions of various sizes, enabling the recovery of valuable metal inclusions, the preparation of slag for further processing or disposal, and the production of material with specific particle sizes for construction or industrial applications. Due to its composition, heterogeneity, and moisture-retention properties, slag is a challenging material to screen; these factors can reduce process efficiency, increase equipment downtime for cleaning the screening surface, and significantly shorten the service life of the screen itself. Blinding of the screening surface apertures leads to productivity losses and reduced product quality, while also increasing downtime and labor requirements. The dynamics of aperture blinding are described by a continuous-time Markov process with two discrete states ("clear" / "blinded"). The blinding process during the classification of difficult-to-screen material is mathematically modeled as a pure-death process. The operating time between cleanings is calculated by multiplying the duration of a test run by the ratio of the logarithm of the permissible fraction of clear apertures to the logarithm of the fraction of clear apertures observed during that test. This calculation enables the determination of the optimal time interval between cleanings (or cleaning device

activations). It prevents both premature shutdowns (unnecessary downtime) and inefficient operation with a blinded screening surface. For enterprises aiming to maximize the value of slag – whether through processing, material recovery, or aggregate production – it is essential to have equipment that offers a reliable and cost-effective solution for these tasks. With its ability to handle solid materials and deliver consistent results, the screen transforms slag classification from a challenging task into an opportunity to enhance production efficiency.

Keywords: metallurgical waste, slag, processing, fine screening, screening surface, apertures, blinding, scheduled cleaning time, mathematical modeling.

For citation: Lapshyn, Ye. S., & Shevchenko, O. I. (2026). Justification for the application of fine screening of metallurgical wastes and determination of the timing for scheduled preventive cleaning of the screening surface. *Fundamental and applied problems of ferrous metallurgy*, 40, 562-576. <https://doi.org/10.52150/2522-9117-2026-40-033>

Рукопис надійшов до редакції / Received 01.04.2026

Рекомендовано до друку / Accepted 28.05.2026

Опубліковано / Published 30.05.2026