ISSN 2071-1859 (Print), ISSN 2521-6635 (Online)
УДК 628.474.77:669.1:504.7 https://doi.org/10.33271/crpnmu/86.378

© П.К. Ломазов[1], В.В. Сорока[1]
[1]Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ІМОВІРНІСНА МОДЕЛЬ УЗГОДЖЕННЯ ЦИРКУЛЯРНОСТІ ТА КЛІМАТИЧНОЇ РЕЗУЛЬТАТИВНОСТІ ПЕРЕРОБЛЕННЯ СТАЛЕПЛАВИЛЬНОГО ШЛАКУ

P. Lomazov[1], https://orcid.org/0009-0007-7129-1334
V. Soroka[1] https://orcid.org/0009-0008-1344-3923
[1]Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

A PROBABILISTIC MODEL FOR RECONCILING CIRCULARITY AND CLIMATE PERFORMANCE IN STEEL-SLAG PROCESSING

Мета. Розробити імовірнісну модель узгодження циркулярності з корпоративним обліком викидів Scope 1–3 та наслідковою оцінкою зміни викидів парникових газів для перероблення накопиченого сталеплавильного шлаку; визначити умови кліматичної результативності повернення матеріалу в обіг.

Методика. Функціональною одиницею прийнято 1 т накопиченого шлаку, доставленого на переробну установку. Дані сформовано за відкритим звітом з оцінки впливу на довкілля для установки потужністю 800 тис. т/рік, коефіцієнтами викидів і виробничими орієнтирами. Побудовано три окремі контури: валові операційні викиди Scope 1–3, ефективна циркулярність та порівняльна зміна викидів відносно постачання первинного щебеню. Невизначеність основних технологічних, ринкових і логістичних параметрів оцінено методом Монте-Карло по 100 000 ітерацій для трикутного, рівномірного і бета-PERT розподілів.

Результати. Розрахунковий валовий операційний слід становить 1,569 кг CO_2-екв./т шлаку, з яких 72,8 % припадає на Scope 1, тоді як заявлений вихід потенційно корисної продукції дорівнює 96,1 %. За підтвердженого використання мінеральної фракції детермінована гранична додаткова відстань перевезення становить 49,4 км. Для трикутного розподілу 5-й процентиль, медіана і 95-й процентиль цієї межі дорівнюють 16,7; 30,8 та 49,0 км. Консервативна межа, стійка до форми розподілу, становить 10,2 км. За додаткової відстані 50 км висока циркулярність поєднується з кліматичним навантаженням у 76,3–93,0 % модельних реалізацій.

Наукова новизна. Встановлено лінійну залежність граничної додаткової відстані перевезення від коефіцієнта функціонального заміщення первинного щебеню та обернено пропорційну залежність від вуглецевої інтенсивності транспорту за інших незмінних параметрів. Визначено умови зростання викидів за високої циркулярності. Запропоновано метод визначення консервативної межі перевезення за заданою ймовірністю кліматичної вигоди з перевіркою стійкості до форми розподілу вхідних параметрів.

Практична значимість. Модель дає змогу використовувати неповні відкриті дані для кліматичного скринінгу, визначати пріоритети збору доказів і не допускати віднімання уникнених викидів від Scope 1–3. Кваліфіковане твердження потребує підтвердження кінцевого використання, функціональної еквівалентності, маршрутів та енергоспоживання.

Ключові слова: *сталеплавильний шлак, циркулярність, екологічна безпека, оцінка впливу на довкілля.*

Вступ. Стратегії циркулярної економіки та скорочення викидів парникових газів взаємопов'язані, але не є тотожними. Повернення вторинного матеріалу у виробничий цикл потенційно зменшує видобування та виготовлення первинної сировини, однак саме перероблення потребує палива, електроенергії, води й транспортних послуг. Тому високий коефіцієнт вилучення характеризує рух матеріальних потоків, але сам по собі не доводить зменшення сукупних викидів порівняно з обґрунтованим базовим сценарієм.

Для накопиченого сталеплавильного шлаку ця відмінність особливо важлива. Механічне перероблення з виїмкою, дробленням, грохоченням і магнітною сепарацією дає змогу вилучати металобрухт та одержувати мінеральні фракції для будівництва. Водночас оператор формує прямі й непрямі викиди раніше, ніж виникає будь-який ефект від заміщення первинної продукції. Кліматична вигода з'являється лише тоді, коли вторинна продукція фактично використана, виконує еквівалентну функцію і витісняє постачання матеріалу, яке інакше відбулося б.

Протокол парникових газів розмежовує прямі викиди Scope 1, викиди від придбаної енергії Scope 2 та інші викиди ланцюга створення вартості Scope 3 [1, 2]. Уникнені викиди, пов'язані з переробленням або використанням менш вуглецеємної продукції, не можна віднімати від Scope 1–3; їх слід показувати окремо за прозорою порівняльною методикою [2, 3]. Отже, циркулярний проєкт може збільшувати валовий корпоративний інвентар і водночас зменшувати системні викиди, але може також збільшувати обидва показники за слабкого заміщення або надмірної логістики.

Аналіз попередніх досліджень. Попередні роботи охоплюють окремі складові цієї проблеми. Поєднання організаційної та продуктової перспектив життєвого циклу дає різні оцінки переваг використання сталеплавильного шлаку, оскільки результат залежить від меж системи й способу розподілу навантажень [4]. Підхід життєвого циклу на ранніх етапах дозволяє визначати критичні ресурси та граничні умови ще до одержання повного промислового інвентарю [5]. Дослідження застосування шлаку підтвердили, що транспортна відстань, обраний первинний аналог і функціональна еквівалентність здатні змінити знак екологічного результату [6, 7].

Розподіл навантаження між основною металопродукцією та побічними матеріалами суттєво впливає на показник потенціалу глобального потепління [8], а розподіл вигод між металургійною та цементною галузями залишається окремим методичним вибором [9]. Новіші дослідження вже поєднують оцінку викидів із невизначеністю та аналізом позитивних і негативних наслідків використання сталеплавильного шлаку [10, 11]. Тому ані транспортна межа, ані Монте-Карло, ані саме твердження про можливий конфлікт між циркулярністю та кліматичною результативністю не можуть розглядатися як новизна окремо.

Методичний огляд практик оцінювання будівельних матеріалів підкреслює залежність висновків від функціональної одиниці, меж системи, сценарію заміщення та якості первинних даних [12]. За умов неповного інвентарю доцільно не підмінювати відсутні значення одиничними середніми оцінками, а подавати їх як епістемічні діапазони та перевіряти стійкість рішення до форми розподілу [13].

Формулювання невирішеної частини проблеми та мети. Невирішеною залишається практична проблема контролю кліматичних тверджень, коли корпоративні викиди, масова циркулярність і системні уникнені викиди зводять до одного «чистого» показника. Такий підхід приховує, чи сприятливий результат отримано з фактичних даних, припущеного ринку збуту або обраного правила розподілу. Звіти з оцінки впливу на довкілля зазвичай містять проєктну потужність, склад обладнання, водоспоживання та матеріальний баланс, але часто не містять фактичних витрат палива, даних обліку електроенергії, маршрутів постачання, пунктів використання продукції та доказів заміщення.

Метою роботи є розроблення імовірнісної моделі узгодження циркулярності з корпоративним обліком Scope 1–3 та наслідковою оцінкою зміни викидів для перероблення накопиченого сталеплавильного шлаку. Для досягнення мети поставлено такі завдання: розмежувати три облікові контури; сформувати розрахунковий інвентар за відкритими даними; визначити граничну додаткову відстань перевезення; перевірити стійкість висновку до форми розподілу невизначених параметрів; встановити пріоритети збору даних, необхідних для кваліфікованого кліматичного твердження.

Основна частина. Демонстраційним об’єктом є перероблення накопиченого шлаку ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» у м. Дніпро. Відкритий звіт з оцінки впливу на довкілля описує установку проєктною потужністю 800 тис. т/рік і максимальною потужністю 1 млн т/рік [14]. Технологічна схема передбачає виїмку шлаку, транспортування до приймального бункера, грохочення на фракції 0-10 і 10-250 мм, магнітну сепарацію, очищення металу та складування продукції. Мінеральні фракції передбачено реалізовувати як шлаковий щебінь та щебенево-піщану суміш.

Матеріальний баланс наведено для 1 млн т/рік: 7,6 % металобрухту, 35,4 % крупної та 53,1 % дрібної мінеральної фракції; 3,9 % залишаються не деталізованими. Ті самі масові частки застосовано до проєктної потужності 800 тис. т/рік. Модельовані річні потоки становлять 60,8 тис. т металобрухту, 708 тис. т мінеральної продукції та 31,2 тис. т залишкової або неврахованої маси.

Функціональною одиницею прийнято 1 т накопиченого сталеплавильного шлаку, доставленого на переробну установку. Корпоративна межа є операційною межею скринінгу, а не повним інвентарем підприємства. Вона охоплює спалювання дизельного палива у контрольованому мобільному обладнанні, придбану електроенергію, попередні викиди виробництва палива, втрати електроенергії під час передавання та постачання технічної води. Капітальне обладнання, будівництво, поїздки працівників та категорії без доступних даних не включено. Доставку продукції не віднесено до корпоративного Scope 3 через невідомі комерційні умови; її враховано лише у порівняльному контурі.

Наслідкова межа додатково охоплює перевезення вторинного матеріалу порівняно з маршрутом первинного аналога та заміщене виробництво природного щебеню. Виробництву історичної сталі, унаслідок якого утворився накопичений шлак, у базовій моделі призначено нульове навантаження за правилом відсікання.

Це припущення придатне лише для перспективного рішення щодо наявного відвалу і не є універсальним правилом для свіжоутвореного шлаку.

Три облікові контури. Запропонована архітектура містить три взаємопов'язані, але невзаємозамінні контури (рис. 1). Вони використовують спільну функціональну одиницю та базу даних, проте відповідають на різні запитання: який валовий слід формує оператор; яка частка продукції фактично повертається у використання; як змінюються сукупні викиди порівняно з постачанням первинного матеріалу.



Рис. 1. Архітектура трьох облікових контурів

Валовий операційний інвентар визначали за формулою:

$$G_{corp} = G_{S1} + G_{S2} + G_{S3} \quad (1)$$

де G_{s1}, G_{s2} та G_{s3} – модельовані викиди відповідно Scope 1, Scope 2 і релевантних категорій Scope 3 у розрахунку на 1 т шлаку.

Заявлений вихід потенційно корисної продукції та ефективну циркулярність визначали окремо:

$$R_{reported} = y_a + y_s \quad (2)$$

$$R_{effective} = \frac{y_a u_a + y_s u_s}{y_a + y_s} \quad (3)$$

де y_a і y_s – вихід мінеральної продукції та металобрухту; u_a і u_s - частки, використання яких у наступному виробничому циклі підтверджене. Показник $R_{effective}$ відображає фактичне використання, але не створює кліматичного кредиту.

Порівняльну зміну викидів для основного сценарію використання мінеральної продукції розраховували так:

$$\Delta G = G_{corp} + EF_T y_a \Delta D_a - y_a u_a q_a EF_a \quad (4)$$

де EF_t – інтенсивність викидів вантажного перевезення; ΔD_a – додаткова одностороння відстань вторинного маршруту порівняно з постачанням первинного матеріалу; q_a – коефіцієнт функціонального заміщення; EFa – вуглецевий слід первинного щебеню від видобування до виходу з підприємства. Від'ємне

значення ΔG означає умовну системну кліматичну вигоду. Імовірність вигоди визначали за формулою:

$$P_{benefit} = P(\Delta G < 0) \tag{5}$$

Граничну додаткову відстань для кожної модельної реалізації визначали як:

$$D_{BE} = \frac{y_a u_a q_a EF_a - G_{corp}}{y_a EF_T}. \tag{6}$$

Змінна «додаткова відстань» усуває поширену помилку порівняння. Якщо первинний щебінь потрібно везти 80 км, а шлаковий – 50 км, то ΔD_a дорівнює – 30 км, а не +50 км.

Класифікація джерел і вихідний інвентар. У таблиці 1 наведено правила включення потоків. Заміщене виробництво первинного щебеню залишається поза корпоративним інвентарем відповідно до принципу окремого подання уникнених викидів [2, 3].

Таблиця 1

Джерела викидів та правила їх обліку

Потік або ефект	**Облікове трактування**	**Правило включення**
Спалювання дизельного палива у контрольованому обладнанні	Scope 1	Операційний корпоративний контур
Придбана електроенергія	Scope 2, location-based	Операційний корпоративний контур
Викиди виробництва і постачання палива	Scope 3, категорія 3	Операційний корпоративний контур
Втрати електроенергії в мережі	Scope 3, категорія 3	Операційний корпоративний контур
Постачання технічної води	Scope 3, категорія 1	Операційний корпоративний контур
Зовнішня доставка продукції	Scope 3, категорія 9 або інвентар покупця	Поза корпоративним контуром через невідомі умови; включено порівняльно
Заміщене виробництво первинного щебеню	Уникнені викиди	Лише наслідковий контур
Заміщення металу вилученим брухтом	Сценарій розподілу	Виключено з основного кліматичного твердження

У звіті з ОВД максимальне електричне навантаження записано як У документі також наведено діапазон продуктивності 100–150 т/год і баланси для 800 тис. та 1 млн т/рік; ці неузгодженості є підставою для використання діапазонів невизначеності.

Базову витрату дизельного палива 0,454 л/т прийнято як виробничий орієнтир за даними двох установок перероблення сталеплавильного шлаку [15]. Витрату води 0,0114 м^3/т розраховано з 76,05 м^3/добу протягом 120 діб теплого періоду та проєктної потужності 800 тис. т/рік. Коефіцієнти для дизельного палива, води, перевезень і природного щебеню прийнято за урядовими конверсійними коефіцієнтами [16], а location-based коефіцієнт електроенергії та втрат у мережі – за національним методичним дослідженням для України [17].

Таблиця 2

Детерміновані параметри базового розрахунку

Параметр	**Значення**	**Джерело або роль даних**
Надходження шлаку	800 000 т/рік	Звіт з ОВД [14]
Вихід мінеральної продукції, y_a	0,885 т/т	Матеріальний баланс ОВД [14]
Вихід металобрухту, y_s	0,076 т/т	Матеріальний баланс ОВД [14]
Дизельне паливо	0,454 л/т	Незалежний виробничий орієнтир [15]
Електроенергія	0,50 кВт·год/т	Інтерпретація потужності та продуктивності [14]
Вода	0,0114 м^3/т	ОВД і проєктна потужність [14]
Дизель, Scope 1	2,51279 кг CO_2-екв./л	Урядовий коефіцієнт [16]
Дизель, попередні викиди	0,61101 кг CO_2-екв./л	Урядовий коефіцієнт [16]
Електроенергія , Scope 2	0,288 кг CO_2-екв./кВт·год	Коефіцієнт для України [17]
Втрати електроенергії	0,008 кг CO_2-екв./кВт·год	Коефіцієнт для України [17]
Постачання води	0,15311 кг CO_2-екв./м^3	Урядовий коефіцієнт [16]
Вантажне перевезення	0,12111 кг CO_2-екв./(т·км)	Прямі та попередні викиди [16]
Первинний щебінь	7,75127 кг CO_2-екв./т	Коефіцієнт використання матеріалу [16]

Сценарії, невизначеність і перевірка стійкості. Сформовано три інтерпретаційні сценарії. S0 описує перероблення без підтвердженого подальшого використання, тому уникнені викиди дорівнюють нулю. S1 передбачає підтверджене використання мінеральної продукції та правило відсікання для вилученого металобрухту; це основний сценарій. У S2 користь від металобрухту може оцінюватися лише окремо після документування його призначення, якості, маршруту плавлення та правила розподілу. Через відсутність цих даних S2 не використовували для центрального кліматичного твердження.

Звіт з ОВД не містить часових рядів, за якими можна було б встановити емпіричні розподіли. Тому невизначені параметри подано як епістемічні діапазони (табл. 3). Базовий аналіз виконано з трикутними розподілами, а залежність від довільно обраної форми апріорного розподілу перевірено рівномірним та бета-PERT розподілами в тих самих межах. Для кожної форми виконано 100 000 ітерацій із фіксованими початковими значеннями генератора. Отримані ймовірності є умовними результатами скринінгу, а не виміряними частотами для підприємства.

Таблиця 3

Епістемічні діапазони параметрів імовірнісної моделі

Параметр	**Мінімум**	**Мода**	**Максимум**
Дизельне паливо, л/т	0,30	0,454	0,65
Електроенергія, кВт·год/т	0,35	0,50	0,75
Вода, $м^3$/т	0,008	0,0114	0,015
Вихід мінеральної продукції	0,82	0,885	0,92
Вихід металобрухту	0,065	0,076	0,085
Слід первинного щебеню, кг CO_2-екв./т	5,0	7,751	10,5
Перевезення, кг CO_2-екв./(т·км)	0,09	0,121	0,16
Функціональне заміщення, q_a	0,60	0,90	1,00
Підтверджене використання щебеню, u_a	0,75	0,90	1,00
Підтверджене використання брухту, u_s	0,80	0,95	1,00

Високу ефективну циркулярність визначено як $R_{effective} \geq 0{,}80$. Кліматично узгоджена циркулярність поєднує $R_{effective} \geq 0{,}80$ і $\Delta G < 0$, а вуглецево обтяжена – $R_{effective} \geq 0{,}80$ і $\Delta G \geq 0$. П’ятий процентиль D_{BE} використано як відстань, сумісну щонайменше з 95 % умовною ймовірністю вигоди для обраного розподілу. Стійкою до форми розподілу межею є мінімум п’ятих процентилів для трьох перевірених форм.

Перевірка моделі включала узгодження детермінованих рівнянь із медіанами Монте-Карло, порівняння трьох форм розподілу та заміну розрахованого сліду двома незалежними виробничими значеннями 5,05 і 8,03 кг CO_2-екв./т шлакового заповнювача [15]. Остання процедура є стрес-тестом, а не зовнішньою валідацією, оскільки зовнішні установки мають інші операційні й транспортні межі. Глобальну чутливість на відстані 25 км оцінено за ранговою кореляцією Спірмена між кожним входом і ΔG.

Результати розрахунку валових викидів і циркулярності. Розрахунковий валовий операційний слід становить 1,569 кг CO_2-екв./т шлаку. Scope 1 дорівнює 1,141 кг CO_2-екв./т (72,8 %), Scope 2 – 0,144 кг CO_2-екв./т (9,2 %), а включені джерела Scope 3 – 0,283 кг CO_2-екв./т (18,0 %). За проєктної потужності це відповідає 913,1; 115,2 та 226,6 т CO_2-екв./рік відповідно, або 1255 т CO_2-екв./рік загалом.

Заявлений вихід потенційно корисної продукції становить 96,1 %: 88,5 % мінеральних фракцій і 7,6 % металобрухту. Однак у сценарії S0 такий баланс не підтверджує уникнених викидів. Перероблення без документованого використання створює +1,569 кг CO_2-екв./т відносно скринінгового базового сценарію без операції. Це не є оцінкою доцільності проєкту, а демонструє, що корпоративний контур відображає валову діяльність, тоді як порівняльний результат потребує додаткових доказів.

Гранична логістика та стійкість до форми розподілу. За повного використання мінеральної продукції, функціонального заміщення один до одного та детермінованих коефіцієнтів заміщення первинного щебеню дозволяє уникнути 6,860 кг CO_2-екв. на 1 т вхідного шлаку. Детермінована гранична додаткова одностороння відстань становить 49,4 км. За 10 км порівняльний результат дорівнює -4,219 кг CO_2-екв./т, а за 50 км - +0,068 кг CO_2-екв./т, тобто перебуває практично на межі зміни знака.

Урахування невизначеності суттєво зменшує відстань, на якій можна формулювати надійне твердження. Для трикутних розподілів п’ятий процентиль, медіана і 95-й процентиль D_{BE} становлять 16,7; 30,8 та 49,0 км. Імовірність кліматичної вигоди дорівнює 99,6 % за 10 км, 72,9 % за 25 км і лише 4,2 % за 50 км. Рисунок 2 показує, що поблизу межі висновок залежить і від форми розподілу.

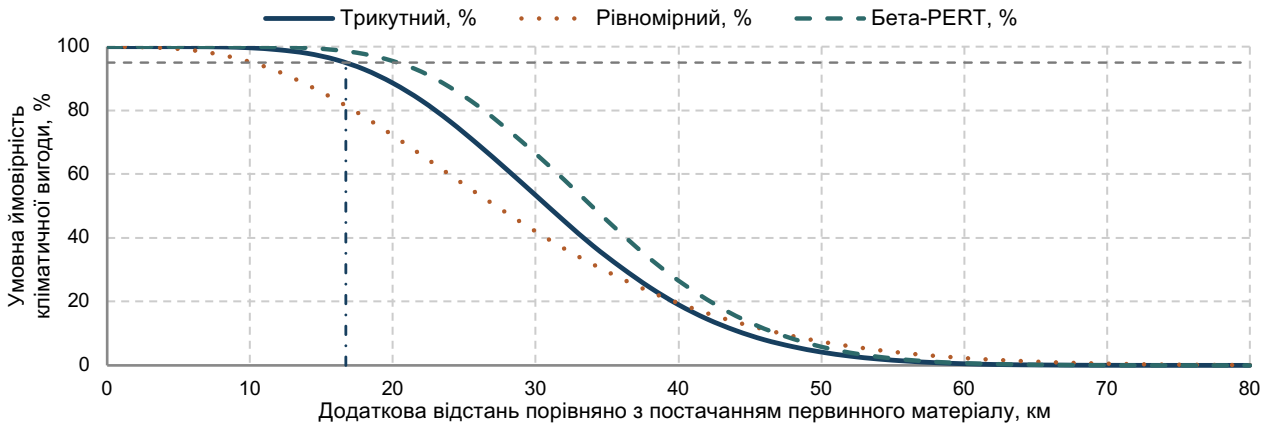


Рис. 2. Умовна ймовірність кліматичної вигоди за різних форм розподілу

Рівномірний розподіл дає п’ятий процентиль 10,2 км, медіану 27,2 км та 95-й процентиль 53,6 км. Для бета-PERT відповідні значення становлять 20,4; 33,9 і 50,8 км. За 50 км імовірність вигоди залишається низькою для всіх форм – 4,2–7,4 %. Отже, консервативна відстань, сумісна щонайменше з 95 % умовною ймовірністю вигоди та стійка до форми розподілу, дорівнює 10,2 км.

Таблиця 4

Граничні відстані та ймовірність кліматичної вигоди

Форма розподілу	**D_{BE}, 5-й процентиль, км**	**Медіана, км**	**95-й процентиль, км**	**$P(\Delta G < 0)$, 25 км**	**$P(\Delta G < 0)$, 50 км**
Трикутний	16,7	30,8	49,0	72,9 %	4,2 %
Рівномірний	10,2	27,2	53,6	56,7 %	7,4 %
Бета-PERT	20,4	33,9	50,8	84,5 %	5,8 %

Узгодженість циркулярності та кліматичного результату. За додаткової відстані 50 км і трикутного розподілу 95,7 % реалізацій досягають високої ефективної циркулярності, проте 95,8 % мають $\Delta G \geq 0$. Обидві умови одночасно виконуються у 91,6 % реалізацій (рис. 3). Це центральний діагностичний результат: мету повернення матеріалу в обіг може бути виконано тоді, коли порівняльна кліматична оцінка вже є несприятливою.

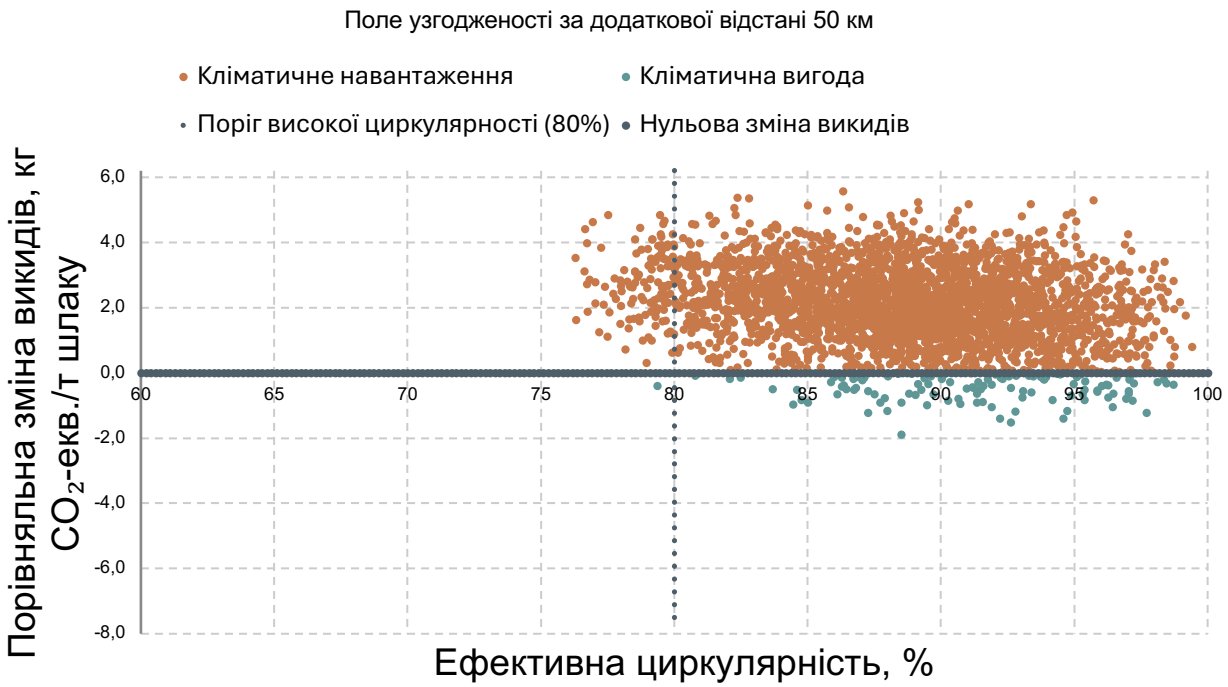


Рис. 3. Поле узгодженості циркулярності та кліматичного результату за додаткової відстані 50 км і трикутного розподілу

Висновок не є наслідком однієї форми розподілу. Поєднання високої циркулярності з кліматичним навантаженням виникає у 76,3 % реалізацій для рівномірного та у 93,0 % для бета-PERT розподілу. Точне значення ймовірності залишається умовним, але якісний діагноз є стійким.

Стрес-тест за незалежними виробничими орієнтирами. Після перерахунку на 1 т мінеральної продукції операційний слід кейсу за ОВД дорівнює 1,773 кг CO_2-екв. Заміна цього значення двома незалежними виробничими орієнтирами змінює детерміновану межу з 49,4 до 22,3 км для сліду 5,05 кг CO_2-екв./т продукції. За сліду 8,03 кг CO_2-екв./т межа становить -2,3 км: вторинний маршрут повинен мати логістичну перевагу над первинним ще до того, як можна допустити додаткове перевезення.

Таблиця 5

Стрес-тест граничної відстані на одиницю мінеральної продукції

Слід перероблення, кг CO_2-екв./т продукції	**Роль даних**	**Гранична додаткова відстань, км**
1,773	Розрахунковий кейс за ОВД	49,4
5,05	Незалежний виробничий орієнтир [15]	22,3
8,03	Незалежний виробничий орієнтир [15]	-2,3

Стрес-тест показує, що перенесення результату між підприємствами без гармонізованих меж є неприпустимим. Показник виходу продукції, енергоємність, функціональний аналог і маршрути потрібно замінювати для кожного об’єкта. Кількісне врахування металобрухту може ще сильніше змінити результат, однак без підтверджених даних про його призначення та правило розподілу такий ефект не є доказом кліматичної результативності конкретної установки.

Чутливість моделі та пріоритети доказів. На відстані 25 км найсильніший зв’язок із ΔG має вуглецевий слід первинного щебеню (ρ = -0,704), далі – функціональне заміщення (ρ = -0,493), інтенсивність перевезення (ρ = +0,304), підтверджене використання продукції (ρ = -0,269) і витрата дизельного палива (ρ = +0,213). Споживання електроенергії та води, а також вихід мінеральної продукції мають слабший вплив у заданих межах (рис. 4).

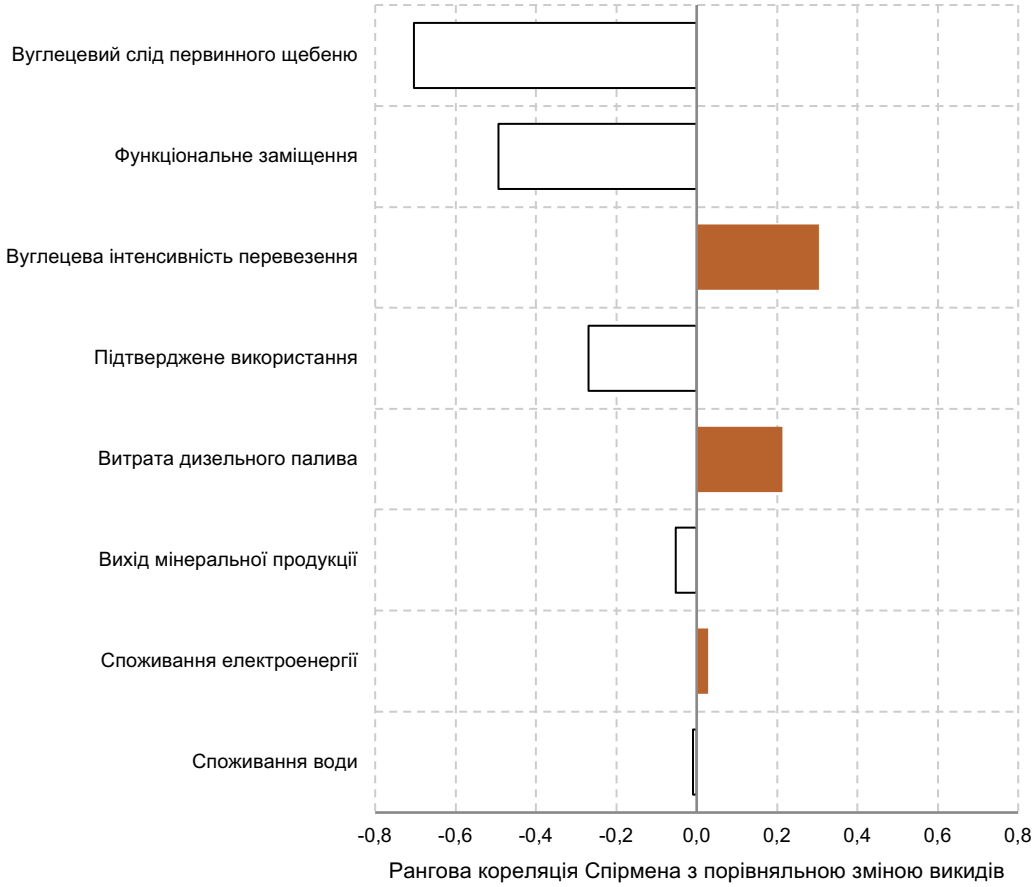


Рис. 4. Рангова чутливість порівняльного результату за додаткової відстані 25 км

Ранжування змінює порядок збору даних. Окремий лічильник електроенергії є корисним, але першочерговими мають бути специфікація заміщеного матеріалу, походження первинного аналога, пункт призначення покупця, підтверджена доставлена маса та фактична витрата палива на 1 т шлаку. Саме ці змінні частіше визначають знак результату, ніж установлена електрична потужність.

Обговорення результатів та обмеження. Отриманий результат не слід тлумачити як твердження, що циркулярність є негативною або що перероблення шлаку завжди забезпечує кліматичну вигоду. Модель є ненормативною: вона встановлює умови, за яких цілі матеріального відновлення та скорочення викидів узгоджуються за заданого набору доказів. Та сама установка може збільшувати валові операційні викиди підприємства й одночасно зменшувати системні викиди за реального заміщення; або може досягати високої утилізації, але збільшувати викиди, якщо енергоємність і відносна логістика перевищують уникнене навантаження.

Науковий внесок роботи є вужчим, ніж створення нового стандарту обліку або повної оцінки життєвого циклу. Він полягає у формуванні архітектури контролю тверджень, яка чітко розмежовує Scope 1-3, ефективну циркулярність та уникнені викиди; використовує не абсолютну відстань шлакової продукції, а різницю з маршрутом первинного аналога; перевіряє стійкість рішення до форми розподілу; і задає поріг, придатний для відкритих промислових даних. Такий

підхід доповнює дослідження промислового симбіозу [22] та узгоджується з ширшим баченням компромісів і синергій циркулярності [20].

Таблиця 6

Мінімальний пакет доказів для кваліфікованого кліматичного твердження

Необхідні дані	**Рекомендований документ**	**Роль у прийнятті рішення**	**Пріоритет**
Пункт призначення і доставлена маса	Накладні, вагові відомості, підтвердження покупця	Підтверджує u_a та відокремлює реалізацію від складування	Критичний
Сфера застосування і заміщений матеріал	Договір, специфікація, відомість обсягів	Визначає базовий сценарій та EF_a	Критичний
Функціональна еквівалентність	Стандарт продукції, протокол випробувань, проєктне співвідношення	Визначає q_a	Критичний
Маршрути для вторинного й первинного матеріалу	Диспетчерські записи та маршрутні дані	Визначає ΔD, а не абсолютну відстань шлаку	Критичний
Паливо та перероблена маса за один період	Відомості видачі палива і вагові дані	Замінює домінантний проксі-показник Scope 1	Високий
Вихід продукції та складські залишки	Матеріальний баланс щонайменше за 12 місяців	Замінює проєктні частки та враховує накопичення	Високий
Електроенергія	Окремий лічильник	Уточнює Scope 2	Середній
Призначення, якість і маршрут плавлення брухту	Приймальні документи й металургійна специфікація	Дозволяє окремий сценарій користі від брухту	Критичний за заявлення користі

Для практичного застосування запропоновано три рівні доказовості. Рівень 0 – лише інвентар: можна наводити валові процесні викиди та заявлений вихід продукції, але не формулювати твердження про уникнені викиди. Рівень 1 –

умовний сценарій: кінцеве використання і первинний аналог є правдоподібними, але неповністю підтвердженими; ΔG подають як діапазон із припущеннями. Рівень 2 – кваліфікована кліматична вигода: документовано доставлене використання, функціональну еквівалентність, порівняльні маршрути та фактичні операційні дані, а заздалегідь обраний імовірнісний поріг виконано.

Для консервативного твердження в межах використаних діапазонів додаткова одностороння відстань не повинна перевищувати 10,2 км, якщо висновок має зберігати щонайменше 95 % умовної підтримки для всіх трьох форм розподілу. Інтервал 10,2–20,4 км може залишатися привабливим, але сила твердження залежить від апріорного розподілу й потребує оновлення за виміряними даними. Відстань 50 км не підтримує користі лише від заміщення щебеню за жодної перевіреної форми, незважаючи на високу циркулярність. Рівень 95 % є правилом прийняття рішення, а не універсальним статистичним стандартом; його потрібно фіксувати до перегляду результатів.

Дослідження має шість основних обмежень. По-перше, звіт з ОВД описує проєктну, а не стабільну виміряну експлуатацію. По-друге, розподіли є епістемічними й умовними навіть після перевірки їх форми. По-третє, корпоративна межа містить лише джерела, підтверджені доступними даними, і не є повним інвентарем підприємства. По-четверте, правило відсікання для накопиченого шлаку може бути непридатним для свіжого шлаку. По-п’яте, коефіцієнти первинного щебеню і вантажного транспорту є загальними, а не даними конкретних постачальників. По-шосте, дослідження охоплює лише зміну клімату і не доводить ширшої екологічної переваги. Вилуговування, об’ємна стабільність, вільні CaO/MgO, пилення та відповідність конкретному застосуванню потребують окремих випробувань [18, 19, 21].

Незалежне порівняння виробничих слідів є стрес-тестом, а не валідацією. Його значення полягає в демонстрації того, що правдоподібна енергоємність іншої установки може більш ніж удвічі скоротити допустиму логістичну відстань або зробити її від’ємною.

Висновки. Циркулярність і кліматичну результативність перероблення сталеплавильного шлаку необхідно узгоджувати, але не об’єднувати в один показник. Для розрахункового кейсу за даними ОВД валовий операційний слід становить 1,569 кг CO_2-екв./т шлаку, а заявлений вихід потенційно корисної продукції – 96,1 %; жоден із цих показників не підтверджує інший.

За підтвердженого використання мінеральної продукції та правила відсікання для брухту детермінована гранична додаткова відстань становить 49,4 км. Після врахування невизначеності медіана для трикутного розподілу дорівнює 30,8 км, а межа 95-відсоткової підтримки - 16,7 км. Інші форми розподілу зміщують 95-відсоткову межу до 10,2-20,4 км, тому консервативний стійкий поріг становить 10,2 км.

За додаткової відстані 50 км висока ефективна циркулярність одночасно з кліматичним навантаженням виникає у 76,3-93,0 % реалізацій. Стрес-тест за незалежними виробничими орієнтирами знижує детерміновану межу до 22,3 км за сліду 5,05 кг CO_2-екв./т продукції та до -2,3 км за 8,03 кг CO_2-екв./т.

Практичним результатом є правило прийняття рішення: показувати валові Scope 1-3 окремо; підтверджувати фактичне використання і функціональне заміщення; порівнювати маршрути вторинного та первинного матеріалів; не приписувати користь металобрухту без правила розподілу; формулювати кліматичне твердження лише за попередньо визначеного імовірнісного порога. Подальші дослідження мають замінити скринінгові діапазони виміряними даними та провести зовнішню валідацію на зіставному підприємстві.

Перелік посилань

1. World Resources Institute, & World Business Council for Sustainable Development. (2004). *The greenhouse gas protocol: A corporate accounting and reporting standard* (Rev. ed.). https://ghgprotocol.org/corporate-standard
2. World Resources Institute, & World Business Council for Sustainable Development. (2011). *Corporate value chain (Scope 3) accounting and reporting standard*. https://ghgprotocol.org/corporate-value-chain-scope-3-standard
3. GHG Protocol. (2026). *How should avoided emissions from the use of sold products be accounted for?* https://ghgptechassistance.zendesk.com/hc/en-us/articles/47992104211732-How-should-avoided-emissions-from-the-use-of-sold-products-be-accounted-for
4. Toniolo, S., Marson, A., & Fedele, A. (2023). Combining organizational and product life cycle perspective to explore the environmental benefits of steel slag recovery practices. *Science of the Total Environment, 867*, 161440. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161440
5. Joyce, P. J., & Björklund, A. (2019). Using life cycle thinking to assess the sustainability benefits of complex valorization pathways for bauxite residue. *Journal of Sustainable Metallurgy, 5*, 69–84. https://doi.org/10.1007/s40831-019-00209-x
6. Díaz-Piloneta, M., Terrados-Cepeda, I., Álvarez-Cabal, J. V., & Vergara-González, E. (2021). Comprehensive analysis of steel slag as aggregate for road construction: Experimental testing and environmental impact assessment. *Materials, 14*(13), 3587. https://doi.org/10.3390/ma14133587
7. Loureiro, C. D. A., Moura, C. F. N., Rodrigues, M., Martinho, F. C. G., Silva, H. M. R. D., & Oliveira, J. R. M. (2022). Steel slag and recycled concrete aggregates: Replacing quarries to supply sustainable materials for the asphalt paving industry. *Sustainability, 14*(9), 5022. https://doi.org/10.3390/su14095022
8. Fernandez, M. C., Grund, S., Phillips, C., Fradet, J., Hage, J., Silk, N., Zeilstra, C., Barnes, C., Hodgson, P., & McKechnie, J. (2024). Attribution of global warming potential impacts in a multifunctional metals industry system using different system expansion and allocation methodologies. *The International Journal of Life Cycle Assessment, 29*, 873–889. https://doi.org/10.1007/s11367-023-02274-7
9. Shin, K., Kim, J., Hwang, Y. W., Kim, B. C., & Kim, D. H. (2024). LCA-based environmental benefit allocation between steel and cement industries in steel byproduct recycling. *Environmental Engineering Research, 30*(1), 240032. https://doi.org/10.4491/eer.2024.032
10. Zhang, Z., Huang, W., Sun, J., Zhang, X., Lu, G., Luo, S., Qin, Y., & Dong, Q. (2026). Extended sustainability assessment of steel slag waste application in urban transportation infrastructure based on environmental impact and implementing feasibility. *Waste Management & Research, 44*(4). https://doi.org/10.1177/0734242X251385868
11. Wang, R., Ma, T., Zhang, Y., Mu, L., & Hu, J. (2026). Enabling the sustainable utilization of steel slag in asphalt mixtures for base and surface layers: Life cycle assessment and environmental benefits. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, 152*(3). https://doi.org/10.1061/JPEODX.PVENG-2136

12. Olsson, J. A., Miller, S. A., & Kneifel, J. D. (2024). A review of current practice for life cycle assessment of cement and concrete. *Resources, Conservation and Recycling, 206*, 107619. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107619
13. Bin Thaneya, A., Gursel, A. P., Kane, S., Miller, S. A., & Horvath, A. (2024). Assessing uncertainty in building material emissions using scenario-aware Monte Carlo simulation. *Environmental Research: Infrastructure and Sustainability, 4*, 025003. https://doi.org/10.1088/2634-4505/ad40ce
14. PJSC INTERPIPE NTZ. (2024). *Environmental impact assessment report: Management of non-hazardous waste at the slag dumps of PJSC INTERPIPE NTZ* (Case No. 4895). https://my.eco.gov.ua/ovd-citizen-app?docNumber=4895
15. Alzard, M. H., Najm, O., Hamdan, A., & Sinka, M. (2026). Life cycle impact assessment for steel slag aggregates production in Abu Dhabi, United Arab Emirates. *Environmental Science and Sustainable Development, 11*(1), 130–142. https://doi.org/10.21625/essd.v11i1.1304
16. Department for Energy Security and Net Zero, & Department for Environment, Food and Rural Affairs. (2024). *UK government GHG conversion factors for company reporting 2024: Flat file* (Version 1.1). https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2024
17. Green Transition Office, & DiXi Group. (2024). *GHG emission factors for electricity generation and consumption in Ukraine: Analytical study and description of the methodological approach to the calculation*. https://gto.dixigroup.org/en/assets/images/files/dixi-gto-a4-eng-1.pdf
18. Soliman, N., Roghani, H., Aghayan, I., Omran, A., & Sobolev, K. (2025). Utilization of steelmaking by-products in the construction industry: A comprehensive review of steel slag and steel mill scale. *Case Studies in Construction Materials, 23*, e05077. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05077
19. Li, Z., Xing, Y., Ma, M., Su, W., Cui, Y., Tian, J., & Fei, F. (2024). Towards the co-benefits of carbon capture, utilization, and sequestration: A life cycle assessment study for steel slag disposal. *Journal of Cleaner Production, 443*, 141166. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141166
20. Aguilar-Hernandez, G. A. (2025). A novel framework to measure circularity trade-offs and synergies in the global context. *Journal of Circular Economy, 3*(1). https://doi.org/10.55845/YTGD9041
21. Kieush, L., Rieger, J., Attrotto, R., Sorino, A., van der Stricht, W., Oterdoom, H., Heikkinen, E. P., Dall'Osto, G., Mapelli, C., Mombelli, D., Di Sante, L., Cirilli, F., Colla, V., Branca, T. A., Matino, I., Petrucciani, A., Zaccara, A., Brondi, C., Mousa, E., … Bellemans, I. (2024). Roadmap for recycling practices and resource utilization in the iron and steelmaking industry: Case studies. *Matériaux & Techniques, 112*, 503. https://doi.org/10.1051/mattech/2024026
22. Bonoli, A., Degli Esposti, A., & Magrini, C. (2020). A case study of industrial symbiosis to reduce GHG emissions: Performance analysis and LCA of asphalt concretes made with RAP aggregates and steel slags. *Frontiers in Materials, 7*, 572955. https://doi.org/10.3389/fmats.2020.572955

ABSTRACT

Purpose. To develop a probabilistic model for reconciling circularity with corporate Scope 1–3 emissions accounting and consequential assessment of changes in greenhouse gas emissions for legacy steel-slag processing, and to determine the conditions under which returning the material to use delivers climate benefits.

The methods. The functional unit was defined as 1 t of legacy slag delivered to the processing installation. The data were compiled from a publicly available environmental impact assessment report for a facility with a capacity of 800,000 t/year, emission factors, and industrial benchmarks. Three separate accounting ledgers were established: gross operational Scope 1–3 emissions, effective circularity, and the comparative change in emissions relative to virgin-aggregate supply. Uncertainty

in the main technological, market, and logistical parameters was assessed using Monte Carlo simulation, with 100,000 iterations for each of the triangular, uniform, and beta-PERT distributions.

Findings. The calculated gross operational footprint is 1.569 kg CO_2-eq/t of slag, of which 72.8% is attributable to Scope 1, while the reported yield of potentially useful products is 96.1%. With verified use of the mineral fraction, the deterministic break-even additional transport distance is 49.4 km. For the triangular distribution, the 5th percentile, median, and 95th percentile of this threshold are 16.7, 30.8, and 49.0 km, respectively. The conservative threshold, robust to the form of the distribution, is 10.2 km. At an additional distance of 50 km, high circularity coincides with a climate burden in 76.3–93.0% of model realizations.

The originality. The break-even additional transport distance was found to depend linearly on the functional substitution coefficient for virgin aggregate and to be inversely proportional to transport carbon intensity, with all other parameters held constant. Conditions under which high circularity coincides with increased emissions were identified. A method was proposed for determining a conservative transport distance threshold for a specified probability of achieving a climate benefit, with robustness tested across different forms of input probability distributions.

Practical significance. The model enables climate screening using incomplete publicly available data, prioritization of evidence collection, and prevention of the deduction of avoided emissions from Scope 1-3 inventories. A qualified claim requires confirmation of end use, functional equivalence, transport routes, and energy consumption.

Keywords: *steel slag, circularity, environmental safety, environmental impact assessment.*

дата першого надходження статті до видання	10.07.2026
дата прийняття до друку статті після рецензування	24.08.2026
дата публікації (оприлюднення)	30.09.2026

© 2026. P. Lomazov, V. Soroka
Published by the Dnipro University of Technology on behalf of Collection of Research Papers of the National Mining University. ISSN 2521-6635 (Online) | ISSN 2071-1859 (Print). This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted reuse, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.