УДК 330.341.1:669(477)
DOI: https://doi.org/10.32782/2415-3583/42.12

Котляров Є.І.
кандидат економічних наук, доцент
Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку
Національної академії наук України
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6366-6729

Шульга І.В.
кандидат технічних наук, доцент
Державне підприємство «Український державний
науково-дослідний вуглехімічний інститут»
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9389-2690

Трушкіна Н.В.
кандидат економічних наук, старший дослідник
Науково-дослідний центр індустріальних проблем розвитку
Національної академії наук України
ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6741-7738

ОРГАНІЗАЦІЙНО-ТЕХНОЛОГІЧНІ ЗАСАДИ ЦИРКУЛЯРНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ НА ОСНОВІ 9R-ПРИНЦИПІВ

У статті обґрунтовано галузеву адаптацію 9R-принципів циркулярної економіки з урахуванням технологічних особливостей металургійної промисловості України. Запропоновано послідовність визначення циркулярних рішень на основі аналізу стадій виробничого ланцюга, видів ресурсів, їх втрат і можливостей повторного використання. Розроблено матрицю відповідності 9R-принципів технологічним стадіям, ресурсним потокам, організаційно-технологічним рішенням і результатам. Виокремлено три функціональні контури циркулярної трансформації: запобігання ресурсним втратам і переосмислення технології; збереження функції та подовження використання ресурсів; повернення матеріальної та енергетичної цінності. Обґрунтовано напрями практичного застосування підходу для ресурсозбереження, декарбонізації та технологічної модернізації металургійних підприємств.

Ключові слова: *металургійна промисловість, циркулярна економіка, 9R-принципи, циркулярна трансформація, організаційно-технологічні рішення, ресурсозбереження, декарбонізація.*

Постановка проблеми. Металургійна промисловість має важливе значення для економіки України, однак належить до найбільш ресурсо-, енерго- та вуглецемістких видів промислової діяльності. Особливості технологічного ланцюга – від видобутку і збагачення сировини до виробництва коксу, чавуну, сталі та феросплавів і кінцевої металопродукції (прокату, труб, метизів, металоконструкцій) – зумовлюють значне споживання первинних матеріальних і енергетичних ресурсів, утворення відходів і побічних продуктів, викидів парникових газів і промислових стічних вод. Негативний вплив окремих підгалузей гірничо-металургійного комплексу охоплює атмосферу, гідросферу та літосферу, що підсилює потребу в технологічній модернізації галузі.

За таких умов циркулярна трансформація металургії не може обмежуватися лише переробкою відходів або збільшення використання металобрухту. Вона потребує системних змін у використанні сировини, енергії та води, організації виробничих процесів, поводженні з побічними продуктами, відновленні ресурсів і подовженні строку експлуатації обладнання. Для металургійної промисловості особливого значення набувають декарбонізація виробничих процесів, розвиток безкоксових технологій, використання вторинної сировини й енергетичних ресурсів, утилізація поточних і накопичених відходів та формування замкнених матеріальних і ресурсних потоків.

Водночас практичне застосування універсальних принципів циркулярної економіки потребує врахування технологічної специфіки металургійного виробництва. Один і той самий принцип 9R може мати різне змістове наповнення залежно від стадії технологічного ланцюга, виду ресурсів, характеру утворення відходів і можливостей їх повторного використання. Тому механічне перенесення загальної 9R-моделі на металургію не забезпечує достатньої основи для визначення конкретних організаційно-технологічних рішень. Необхідною є її галузева адаптація з урахуванням взаємозв'язків між технологічними процесами, матеріальними, енергетичними та водними потоками.

Актуальність такого підходу для України посилюється необхідністю структурної модернізації металургійної промисловості та переходу від переважно лінійної моделі використання ресурсів до їх більш

© Котляров Є.І., Шульга І.В., Трушкіна Н.В., 2026
Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)

ефективного та повторного залучення у виробничий цикл. Це потребує узгодження технологічних перетворень з принципами циркулярної економіки та формування системи організаційних рішень, здатних забезпечити їх практичну реалізацію.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні дослідження циркулярної економіки виходять далеко за межі традиційного поводження з відходами. Основна увага поступово переноситься на скорочення використання первинних ресурсів, подовження строку служби продукції та матеріалів, їх повторне залучення до виробництва і збереження створеної цінності [1]. Відповідно, R-принципи розглядаються не як набір рівнозначних операцій, а як певна послідовність рішень: від запобігання надмірному споживанню ресурсів і повторного використання продукції до перероблення матеріалів та відновлення енергії [2]. Така логіка особливо важлива для ресурсомістких виробництв, де один і той самий матеріал може залишатися у господарському обігу в різних формах.

У дослідженнях металургійної промисловості можна виокремити кілька взаємопов'язаних напрямів реалізації циркулярного підходу [2–15] (табл. 1). Наведені у табл. 1 напрями показують, що сучасне розуміння циркулярності металургії не зводиться до збільшення частки металобрухту або перероблення відходів. Значення має не лише факт повернення ресурсу у виробництво, а й спосіб його повторного використання, ступінь збереження його властивостей і цінності, можливість залучення до інших виробничих процесів, а також економічні та екологічні наслідки такого рішення. Зокрема, пряме повторне використання сталевих конструкцій може забезпечувати збереження більшої частини вже створеної цінності порівняно з їх переплавленням [3]. Водночас багаторазове перероблення металобрухту супроводжується накопиченням небажаних домішок, що обмежує можливості його використання для окремих видів сталі [4; 5].

Не менш важливим є використання побічних продуктів металургійного виробництва за межами підприємства, на якому вони утворилися. Шлаки та інші мінеральні залишки можуть виступати сировиною для виробництва цементу, будівельних матеріалів та іншої продукції [6; 7]. Проте доцільність таких рішень має оцінюватися з урахуванням характеристик вторинного матеріалу, відстані його транспортування, необхідності додаткової підготовки, економічних витрат та екологічного ефекту [6; 8; 9]. Тому сам факт використання відходу як вторинного ресурсу ще не дає підстав вважати конкретне рішення найбільш ефективним з позицій циркулярної економіки.

В українських дослідженнях трансформація металургійної промисловості розглядається насамперед у контексті технологічної модернізації, декарбонізації та зміни способів виробництва заліза і сталі [14]. Окремий напрям становлять питання державної підтримки зеленої металургії, адаптації європейських підходів та формування сприятливих умов для інвестування у нові технології [15]. Водночас ресурсні, технологічні та організаційні рішення поки що переважно досліджуються окремо.

Проведений аналіз дозволяє уточнити наукові прогалини. У сучасних публікаціях достатньо докладно досліджено окремі складові циркулярної трансформації металургії: використання металобрухту, перероблення шлаків та інших залишків, повторне використання сталевих виробів, міжгалузеве використання вторинних ресурсів та оцінювання їх екологічної й економічної ефективності. Проте у відібраному масиві досліджень не простежується цілісна система, яка б пов'язувала 9R-принципи з конкретними стадіями металургійного виробництва, видами ресурсів,

Таблиця 1 – Основні напрями сучасних досліджень циркулярної трансформації металургійної промисловості

Напрям досліджень	Основний зміст	Основні результати та обмеження	Джерела
Повернення вторинних ресурсів у виробництво	Використання металобрухту, пилу, окалини, шламів та інших вторинних матеріалів	Вторинні ресурси дають змогу скоротити споживання первинної сировини та обсяги відходів. Водночас їх використання обмежується доступністю, якістю, вмістом домішок і технологічними вимогами до кінцевої продукції	[7–8; 10–12]
Повторне використання зі збереженням цінності матеріалу	Відновлення і повторне використання металевих виробів і конструкцій без їх попереднього переплавлення	Дає змогу довше зберігати функціональну й матеріальну цінність продукції та уникати додаткових енергетичних витрат на переробку. Потребує контролю якості та технічного стану продукції	[2–5]
Міжгалузеве використання побічних продуктів і відходів	Передача шлаків, мінеральних залишків та інших побічних продуктів для використання в будівництві, виробництві цементу та інших галузях	Розширює можливості повернення ресурсів у господарський обіг за межами самого металургійного підприємства. Результативність залежить від властивостей матеріалу, логістики, економічної доцільності та нормативних вимог	[6–8; 13]
Комплексне оцінювання циркулярних рішень	Аналіз матеріальних потоків, оцінювання життєвого циклу, багатокритеріальне порівняння альтернатив	Дозволяє оцінювати не лише обсяг поверненого ресурсу, а й енергетичні витрати, викиди, якість вторинної сировини, логістичні та економічні наслідки	[5–6; 9; 11–12]
Організаційно-технологічне забезпечення зеленого переходу	Модернізація технологій, декарбонізація, державна підтримка, інвестиційні та регуляторні механізми	Для України циркулярні рішення мають узгоджуватися з технологічним оновленням металургії, ресурсними можливостями галузі та вимогами європейської промислової і кліматичної політики	[14; 15]

Джерело: систематизовано та складено авторами на основі [2–15]

побічних продуктів і відходів та відповідними організаційно-технологічними рішеннями. Недостатньо узгоджено розглядаються також матеріальні, енергетичні й водні потоки, повторне використання та відновлення обладнання, а також внутрішньогалузеві й міжгалузеві зв'язки.

Для України це питання набуває додаткового значення через необхідність поєднання циркулярних принципів з технологічною модернізацією металургійної промисловості та особливостями національної ресурсної бази. Це зумовлює необхідність розроблення цілісного підходу до галузевої адаптації 9R-принципів, який би враховував технологічну структуру металургійного виробництва та дозволяв пов'язати окремі R-рішення з конкретними ресурсними потоками й організаційно-технологічними заходами.

Мета та методи дослідження. Метою дослідження є обґрунтування організаційно-технологічних засад циркулярної трансформації металургійної промисловості України на основі галузевої адаптації 9R-принципів циркулярної економіки та визначення напрямів їх реалізації на окремих стадіях металургійного виробництва.

Для досягнення поставленої мети сформульовано такі дослідницькі питання:

1) Як адаптувати 9R-принципи циркулярної економіки до технологічної специфіки металургійної промисловості?

2) Які організаційно-технологічні рішення відповідають окремим 9R-принципам на різних стадіях металургійного виробництва?

3) Як поєднання різних R-рішень дає змогу перейти від окремих практик повторного використання та перероблення ресурсів до системної циркулярної трансформації металургійного виробництва?

У дослідженні перевіряються дві робочі гіпотези:

H1. Галузева адаптація 9R-принципів з урахуванням технологічного ланцюга металургійного виробництва забезпечує більш системне обґрунтування напрямів циркулярної трансформації, ніж їх універсальне застосування без урахування галузевої специфіки.

H2. Циркулярна трансформація металургійної промисловості не обмежується переробленням металобрухту та відходів, а потребує узгоджених рішень щодо матеріальних, енергетичних і водних ресурсів, побічних продуктів, обладнання та їх повторного використання у межах і поза межами металургійного виробництва.

Методологічну основу дослідження становлять системний і процесний підходи. Використано методи контент-аналізу, порівняльного та структурно-логічного аналізу, аналізу матеріальних та енергетичних потоків, матричного зіставлення, узагальнення і синтезу. Поєднання зазначених підходів і методів дало змогу послідовно зіставити 9R-принципи зі стадіями металургійного виробництва, видами ресурсів і відповідними організаційно-технологічними рішеннями та перевірити сформульовані гіпотези.

Виклад основного матеріалу дослідження. Вихідним положенням дослідження є те, що циркулярність металургійного виробництва формується не на рівні окремої операції з перероблення відходів, а в межах усього технологічного ланцюга. Об'єктами циркулярних перетворень виступають сировина і напівфабрикати, паливо, енергія, вода, побічні продукти, відходи та технологічне обладнання. Відповідно, зміст 9R-принципів має визначатися з урахуванням того, на якій стадії виробництва, щодо якого ресурсу та з якою технологічною метою вони застосовуються. Це принципово відрізняє галузеву адаптацію 9R від формального перенесення універсальної R-ієрархії на металургію.

Технологічні процеси металургії суттєво відрізняються за характером споживання ресурсів, утворення побічних продуктів і можливостями їх повторного залучення. Основні проблемні зони та відповідні резерви циркулярних перетворень систематизовано в табл. 2.

Як видно з табл. 2, циркулярний потенціал формується по-різному на окремих стадіях виробництва. Для видобутку й збагачення пріоритетними є скорочення питомих витрат ресурсів та повторне використання води; для сталеплавильного виробництва – використання вторинної металевої сировини; для коксохімії – повернення окремих відходів у виробничий цикл та отримання корисної продукції з побічних матеріалів; для основного обладнання – подовження строку його експлуатації. Отже, однакова інтерпретація R-принципів для всіх стадій металургійного виробництва була б методично спрощеною.

Найбільш показовою в цьому контексті є проблема декарбонізації виробництва чавуну. Вуглець у традиційній технологічній схемі одночасно виконує функції палива та відновника, тому просте вдосконалення доменного виробництва не усуває основного джерела викидів. У виконаних авторами розрахунках виробництво чавуну формує переважну частину питомих викидів у розглянутому технологічному ланцюзі, а використання збагаченого воднем синтез-газу для прямого відновлення заліза потенційно дає змогу знизити викиди приблизно до 0,5 т CO_2 на 1 т заліза прямого відновлення порівняно з 2,0–2,3 т CO_2 на 1 т чавуну за традиційної технології виробництва [18].

Цей результат важливий не лише з позицій декарбонізації. Він показує, що для металургії циркулярна трансформація охоплює два типи змін: підвищення ефективності використання ресурсів у межах наявної технології та зміну самої технологічної моделі, коли ресурсомісткий або високовуглецевий процес замінюється іншим. Саме тому принципи Reduce (зменшення), Reuse (повторне використання) та Recycle (перероблення) не можуть повністю охопити циркулярний потенціал галузі без Refuse (відмова) та Rethink (переосмислення).

З урахуванням цього пропонується послідовність галузевої адаптації 9R-принципів, наведену на рис. 1.

Логіка рис. 1 передбачає, що R-принцип визначається не наперед, а після аналізу конкретного технологічного процесу. Для цього враховуються матеріальні й енергетичні баланси, характер утворення відходів і побічних продуктів, можливість їх повернення у виробничий цикл, використання вторинних енергоресурсів, а також стан обладнання. Такий підхід дозволяє пов'язати загальну 9R-модель із реальною структурою металургійного виробництва.

Результатом такого зіставлення стала галузева матриця реалізації 9R-принципів (табл. 3).

Таблиця 2 – Технологічні особливості металургійного виробництва та резерви циркулярних перетворень

Стадія / сфера	Основна проблема	Резерви циркулярних перетворень
Видобуток і збагачення залізорудної сировини	Значне споживання первинної сировини, води та енергії; утворення породи і хвостів збагачення	Зменшення питомих витрат ресурсів; повторне використання води; залучення відходів збагачення до господарського обігу
Коксохімічне виробництво	Споживання вугілля та енергії; утворення газів, стічних вод, побічних продуктів і відходів	Повернення окремих відходів у шихту; вилучення корисних компонентів; повторне використання води; одержання продукції з побічних продуктів
Виробництво чавуну	Залежність від коксу; висока вуглецева інтенсивність; утворення доменного газу та шлаку	Заміна вуглецевого відновника; пряме відновлення заліза; використання вторинних енергетичних ресурсів; перероблення шлаків
Виробництво сталі	Використання чавуну та первинної сировини; утворення шлаків, пилу й окалини	Збільшення використання металобрухту; повернення металовмісних матеріалів у виробничий цикл; розвиток електросталеплавильних технологій
Феросплавні та допоміжні виробництва	Висока енергоємність; використання первинних ресурсів; утворення шлаків і газів	Підвищення енергоефективності; вилучення цінних компонентів; використання побічних продуктів
Експлуатація обладнання	Зношування деталей і вузлів; матеріальні витрати на їх заміну	Діагностика технічного стану; превентивне обслуговування; відновлення деталей і вузлів; подовження строку експлуатації

Джерело: систематизовано та складено авторами на основі [14; 16; 17; 18]



Рисунок 1 – Послідовність галузевої адаптації 9R-принципів у металургійному виробництві

Джерело: побудовано авторами

Наукове значення запропонованої матриці полягає не у повторенні відомих 9R-принципів, а в їх прив'язці до конкретної структури металургійного виробництва. Один технологічний захід при цьому може одночасно реалізовувати кілька принципів. Так, використання металобрухту відповідає Recycle, але водночас забезпечує Reduce, оскільки скорочує потребу в залізорудній сировині та коксі. Перехід до прямого відновлення заліза або електрометалургійного маршруту вже належить до Rethink, оскільки змінює не спосіб поводження з окремим ресурсом, а сам технологічний маршрут.

Для подальшої інтерпретації результатів 9R-принципи доцільно згрупувати не за часовою послідовністю, а за їх функціональною роллю у циркулярній трансформації. На цій основі запропоновано три взаємопов'язані контури (рис. 2).

Запропоновані контури не є новою універсальною ієрархією 9R. Вони використовуються для функціонального впорядкування R-рішень саме в межах металургійного виробництва. Перший контур спрямовано на недопущення або скорочення ресурсних втрат ще до їх виникнення; другий – на максимально тривале збереження функції та вартості вже залучених ресурсів; третій – на повернення матеріальної або енергетичної цінності після завершення попереднього циклу використання. Такий поділ дозволяє розглядати циркулярний підхід у металургії ширше, ніж лише через перероблення відходів.

Практичний зміст запропонованої моделі добре простежується на прикладі металобрухту. У 2021–2024 рр. співвідношення обсягів його заготівлі до виплавки сталі в Україні коливалося приблизно в межах 16–23% [17]. При цьому йдеться саме про співвідношення заготівлі та виплавки, а не про фактичну частку брухту в металошихті. Багаторазове повернення брухту у сталеплавильний цикл також супроводжується ризиком накопичення небажаних домішок, що підвищує значення сортування та контролю його якості [4; 5]. Тому металобрухт є важливим елементом циркулярної моделі, але не може бути її єдиною основою.

Таблиця 3 – Галузева матриця реалізації 9R-принципів у металургійній промисловості

9R-принцип	Основні стадії / ресурси	Організаційно-технологічні рішення	Очікуваний результат
Reduce – зменшення	Усі стадії; сировина, паливо, енергія, вода	Нормування витрат ресурсів; оптимізація матеріальних та енергетичних балансів; скорочення втрат води й тепла	Зниження ресурсо- та енергоємності, скорочення відходів
Reuse – повторне використання	Водні цикли; матеріали, вироби та компоненти, придатні до повторного використання	Оборотне водопостачання; повторне використання матеріалів і металевих елементів без глибокої переробки	Скорочення потреби у первинних ресурсах і продовження строку їх використання
Recycle – перероблення	Сталеплавильне і коксохімічне виробництво; металобрухт, пил, окалина, шлами	Перероблення металобрухту; повернення металовмісних залишків та окремих коксохімічних відходів у виробничий цикл	Заміщення первинної сировини та скорочення відходів
Refuse – відмова	Найбільш ресурсо- і вуглецемісткі технологічні операції	Відмова від окремих видів первинної сировини та високовуглецевих технологій за наявності технологічно й економічно прийнятної альтернативи	Зниження залежності від первинних ресурсів та вуглецю
Repurpose – зміна призначення	Шлаки, побічні продукти, коксохімічні відходи	Використання шлаків у будівництві й цементному виробництві; отримання дорожніх та хімічних продуктів із побічних матеріалів	Залучення вторинних ресурсів до інших виробничих ланцюгів
Rethink – переосмислення	Виробництво заліза і сталі; матеріальні та енергетичні потоки	Пряме відновлення заліза; водневі технології; електрометалургія; замкнені водні та матеріальні цикли	Зміна технологічної моделі та істотне зниження ресурсо- і вуглецемісткості
Repair – ремонт	Основне й допоміжне обладнання	Діагностика; обслуговування за технічним станом; відновлення працездатності агрегатів	Подовження строку експлуатації та скорочення простоїв
Remanufacture – відновлення для повторного використання	Деталі, вузли й компоненти обладнання	Наплавлення, відновлення та повторне використання деталей; ремонт вузлів, устаткування	Економія матеріалів і скорочення потреби у нових компонентах
Recover – відновлення ресурсів та енергії	Скидне тепло, доменний і коксовий гази, відходи з цінними компонентами	Рекуперація тепла; використання вторинних газів; вилучення металів та інших корисних компонентів	Повернення енергії й матеріалів у господарський обіг

Джерело: запропоновано та складено авторами на основі [2–10; 13; 14; 16; 18; 19]

Другу групу практичних рішень пов'язано з побічними продуктами та відходами. Доменні й сталеплавильні шлаки можуть бути сировиною для цементного і будівельного виробництва [6; 7]. Для коксохімічних підприємств можливе повернення частини малотоннажних відходів у шихту, одержання дорожньов'яжучих матеріалів, пластифікаторів та інших продуктів, а також регенерація окремих каталізаторів. Це означає, що повернення ресурсу може здійснюватися як у межах вихідного технологічного процесу, так і через його передачу до іншого виробництва.

Третя група рішень охоплює воду, енергію та ресурс обладнання. Оборотні системи водопостачання скорочують потребу у свіжій воді та обсяги стічних вод; використання доменного і коксового газів та рекуперація скидного тепла повертають частину енергетичної цінності виробничих потоків. Для обладнання принципи Repair і Remanufacture реалізуються через діагностику технічного стану, превентивне обслуговування, відновлення деталей і вузлів та подовження міжремонтних періодів. Отже, циркулярність металургії поширюється не тільки на матеріальну сировину, а й на ресурс основних засобів.

Для України практична реалізація цієї моделі має враховувати ще один вимір – умови технологічної модернізації. Вартість енергії, доступ до фінансування, конкурентоспроможність продукції на зовнішніх ринках та вимоги до її вуглецевої інтенсивності впливатимуть на вибір і швидкість впровадження окремих R-рішень. Тому оцінювання заходів доцільно здійснювати не лише за потенціалом скорочення відходів чи первинної сировини, а й за капіталомісткістю, енергетичними витратами, технологічною готовністю та можливістю практичного впровадження на конкретному підприємстві.

Таким чином, проведене зіставлення 9R-принципів зі стадіями металургійного виробництва показало, що їх практичний зміст не є універсальним. Один і той самий принцип набуває різного наповнення залежно від виду ресурсу, технологічної операції та можливостей його повторного залучення до виробничого процесу. Зокрема, Reduce (зменшення) може реалізовуватися через скорочення питомих витрат сировини, енергії або води; Recycle (перероблення) – через повернення металобрухту, виробничих відходів, побічних продуктів та металовмісних залишків; Repair (ремонт) і Remanufacture (відновлення для повторного використання) – через подовження строку експлуатації обладнання та відновлення його вузлів і деталей. Це свідчить, що ефективність 9R-підходу в металургії визначається ступенем його прив'язки до конкретної технологічної стадії, що підтверджує робочу гіпотезу H1.

Водночас сформована 9R-матриця показала, що циркулярні перетворення охоплюють значно ширше коло об'єктів, ніж металобрухт і відходи. До них належать матеріальні, енергетичні та водні потоки, побічні продукти, вторинні ресурси, технологічне обладнання

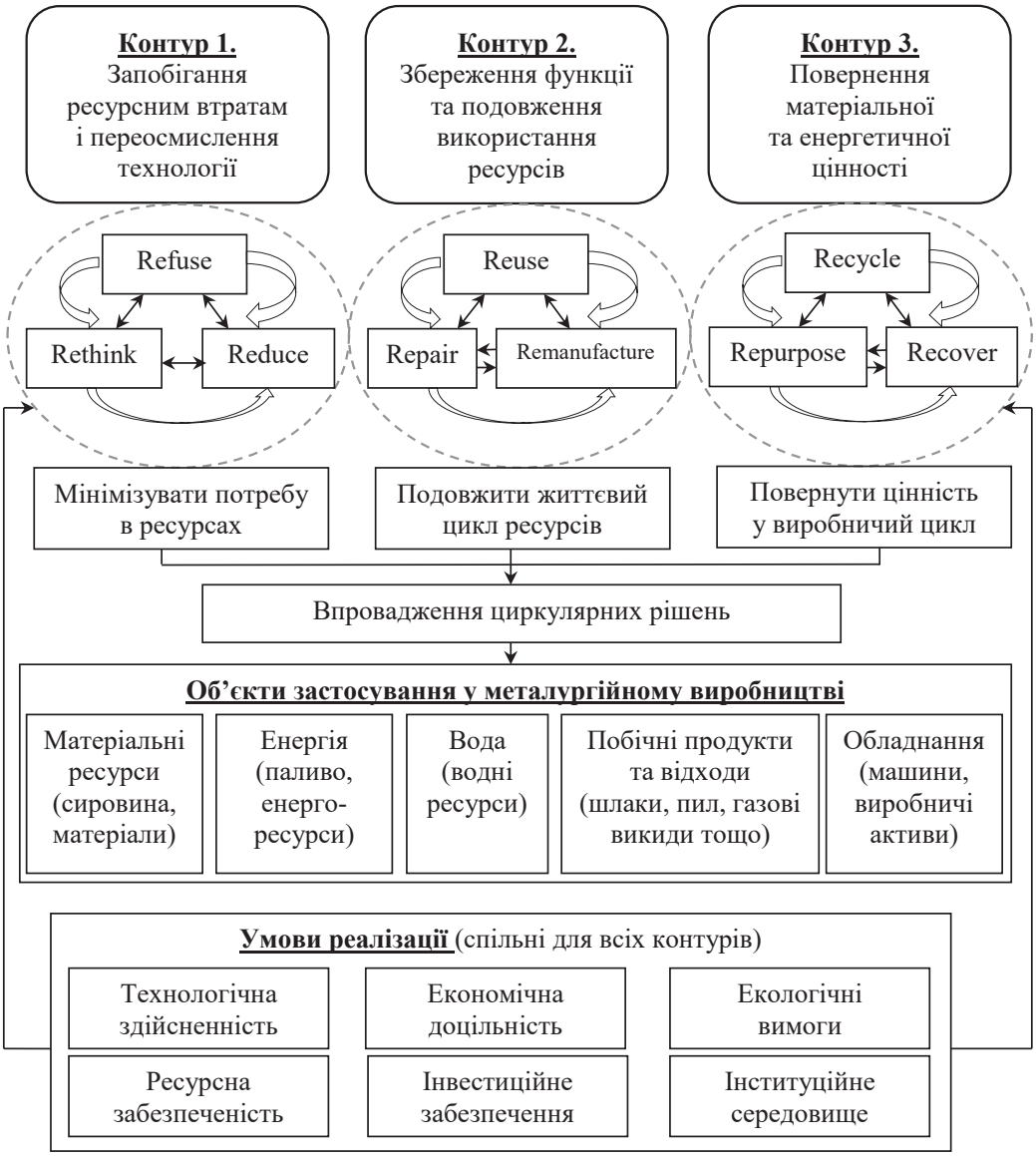


Рисунок 2 – Концептуальна модель реалізації 9R-принципів у металургійному виробництві

Джерело: побудовано авторами

та самі виробничі процеси. Їх об'єднання у три функціональні контури – запобігання ресурсним втратам і переосмислення технології; збереження функції та подовження використання ресурсів; повернення матеріальної та енергетичної цінності – підтверджує робочу гіпотезу Н2. Отже, предметом циркулярної трансформації в металургії має бути не окремий вид відходу або ресурсу, а взаємопов'язана система ресурсних потоків і технологічних рішень у межах усього виробничого ланцюга.

Висновки. Проведене дослідження підтвердило необхідність галузевої адаптації 9R-принципів до технологічної специфіки металургійного виробництва. Циркулярна трансформація металургії не може обмежуватися переробленням металобрухту та відходів, оскільки охоплює весь виробничий ланцюг: використання первинної і вторинної сировини, енергії та води, поводження з побічними продуктами, повернення ресурсів у виробничий обіг, подовження строку експлуатації обладнання та зміну технологічної моделі виробництва.

Запропоновано послідовність галузевої адаптації 9R-принципів, відповідно до якої циркулярне рішення обирається з урахуванням стадії технологічного процесу, виду ресурсу, характеру його втрат, можливостей повторного використання та очікуваного результату. На цій основі сформовано галузеву 9R-матрицю, що поєднує технологічні стадії, ресурсні потоки, організаційно-технологічні рішення та результати їх реалізації. Для систематизації цих рішень виділено три функціональні контури: запобігання ресурсним втратам і переосмислення технології; збереження функції та подовження використання ресурсів; повернення матеріальної та енергетичної цінності.

Одержані результати підтверджують обидві робочі гіпотези в межах застосованого методологічного підходу. Зміст і способи реалізації R-принципів залежать від конкретної стадії металургійного виробництва та

виду ресурсу, що обґрунтовує необхідність їх галузевої адаптації. Водночас системний перехід до циркулярної моделі потребує поєднання рішень щодо матеріальних, енергетичних і водних потоків, побічних продуктів, відходів та обладнання зі зміною технологічної основи окремих виробничих процесів.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розвитку підходу до реалізації 9R-принципів у металургійній промисловості через їх одночасне узгодження зі стадіями технологічного ланцюга, видами ресурсів та конкретними організаційно-технологічними рішеннями. Запропонований підхід дає змогу визначити, на якій ділянці виробничого процесу виникає потенціал циркулярних перетворень, який R-принцип відповідає характеру проблеми та якими заходами цей потенціал може бути реалізований. Це дозволяє використовувати 9R не лише як класифікацію циркулярних практик, а як основу для обґрунтування управлінських і технологічних рішень.

Практичне використання отриманих результатів доцільно конкретизувати за основними групами суб'єктів:

– *Керівництву металургійних підприємств* доцільно включити оцінювання циркулярності до системи планування технологічної модернізації. Для кожної виробничого підрозділу необхідно визначати основні вхідні ресурси, величину та характер їх втрат, утворені побічні продукти і відходи, можливості їх повторного використання та відповідні R-рішення. За результатами такого аналізу слід формувати портфель проєктів із зазначенням необхідних інвестицій, строків реалізації, очікуваного скорочення споживання сировини, енергії та води, зменшення відходів і викидів.

– *Технічним, виробничим, енергетичним та екологічним службам підприємств* доцільно перейти від загального обліку ресурсоспоживання до пооперацій-ного контролю матеріальних, енергетичних і водних потоків. Практичними заходами мають бути підвищення якості сортування і підготовки металобрухту, повернення придатних металовмісних залишків, відходів та побічних продуктів у виробництво, розширення оборотного водопостачання, використання доменного і коксового газів та скидного тепла, а також пошук напрямів використання шлаків і побічних продуктів поза межами підприємства.

– *Службам технічного обслуговування і ремонту* доцільно окремо впроваджувати принципи Repair і Remanufacture щодо основного технологічного обладнання. Йдеться про діагностику фактичного технічного стану, планування ремонтів за результатами такої діагностики, відновлення придатних деталей і вузлів, подовження міжремонтних періодів та формування обліку повторно використаних компонентів. Це дозволить оцінювати циркулярність не лише через матеріальні відходи, а й через продовження ресурсу основних засобів.

– І*нвестиційним підрозділам підприємств, банківським установам* доцільно оцінювати проєкти циркулярної модернізації за єдиним набором параметрів: обсяг необхідних капітальних вкладень, зміна операційних витрат, економія первинної сировини, енергії та води, скорочення утворення відходів і викидів, технологічні ризики та строк досягнення очікуваного ефекту. Це дасть змогу зіставляти проєкти різного масштабу – від локального повернення ресурсу у виробничий цикл до переходу на новий технологічний маршрут – за однаковими критеріями.

– *Органам державної промислової та екологічної політики і галузевим об'єднанням* доцільно використовувати 9R-матрицю при формуванні критеріїв відбору проєктів технологічної модернізації. Державна підтримка має бути пов'язана з вимірюваними результатами: скороченням використання первинної сировини, енерго- та водоспоживання, зменшенням викидів і відходів, збільшенням використання вторинних ресурсів. Окремим напрямом має стати створення умов для міжгалузевого використання металургійних шлаків, побічних продуктів і вторинних матеріалів через узгодження технічних вимог до їх якості, логістики та можливих сфер застосування.

Таким чином, практична цінність запропонованої 9R-матриці полягає не лише в систематизації циркулярних рішень. Вона може використовуватися для виявлення ресурсних резервів на конкретній виробничій дільниці, формування портфеля проєктів модернізації, порівняння технологічних альтернатив та визначення заходів, які можуть бути реалізовані в межах чинної технології або потребують її принципової зміни.

Перспективою подальших досліджень є розроблення методичного підходу до комплексного оцінювання економічної та екологічної ефективності 9R-рішень для різних технологій металургійного виробництва. Наступним етапом має стати формування системи кількісних показників і критеріїв для порівняння альтернативних рішень за ресурсоспоживанням, енергоємністю, водоспоживанням, утворенням відходів і викидів, капітальними та операційними витратами. На цій основі можна буде визначати пріоритетність конкретних 9R-рішень для окремих підприємств і технологічних процесів та перейти від концептуальної моделі до кількісного інструментарію підтримки управлінських рішень.

Список використаних джерел:

1. Kirchherr J., Yang N.-H. N., Schulze-Spüntrup F., Heerink M. J., Hartley K. Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. 2023. Vol. 194. Art. 107001. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001

2. Reike D., Vermeulen W. J. V., Witjes S. The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? Exploring controversies in the conceptualization of the circular economy through a focus on history and resource value retention options. *Resources, Conservation and Recycling*. 2018. Vol. 135. P. 246–264. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027

3. Lee H.-W., Shih H.-C., Ma H.-W. Direct reuse of the end-of-use structural steel: Assessing the economic and carbon reduction effects. *Journal of Industrial Ecology*. 2025. Vol. 29, No. 4. P. 1237–1249. DOI: https://doi.org/10.1111/jiec.70044

4. Mukhlis R., Satritama B., Brooks G., Rhamdhani M. A. Steel Scrap: Strategic Commodity for Green Steel Circularity and Analyses of Tramp Elements Accumulation. *Journal of Sustainable Metallurgy.* 2026. Vol. 12. P. 2705–2740. DOI: https://doi.org/10.1007/s40831-025-01397-5

5. Wagner A., Mogollón J. M., Albizzati P. F., Walker A., Tukker A., Tonini D. Circular Economy can substantially reduce EU steel supply chain emissions: A quality-focused circularity assessment. *Resources, Conservation and Recycling*. 2026. Vol. 228. Art. 108825. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2026.108825

6. Piemonti A., Conforti A., Cominoli L., Luciano A., Plizzari G., Sorlini S. Exploring the Potential for Steel Slags Valorisation in an Industrial Symbiosis Perspective at Meso-scale Level. *Waste and Biomass Valorization*. 2023. Vol. 14. P. 3355–3375. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-022-01940-5

7. Krammer A. C., Doschek-Held K., Steindl F. R. et al. Valorisation of metallurgical residues via carbothermal reduction: A circular economy approach in the cement and iron and steel industry. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. 2024. Vol. 42. No. 9. P. 797–805. DOI: https://doi.org/10.1177/0734242X241240040

8. Chandel S. S., Singh P. K., Katiyar P. K., Randhawa N. S. A Review on Environmental Concerns and Technological Innovations for the Valorization of Steel Industry Slag. *Mining, Metallurgy & Exploration.* 2023. Vol. 40. P. 2059–2086. DOI: https://doi.org/10.1007/s42461-023-00886-z

9. Falsafi M., Terkaj W., Guzzon M., Malfa E., Fornasiero R., Tolio T. Assessment of valorisation opportunities for secondary metallurgy slag through multi-criteria decision making. *Journal of Cleaner Production.* 2023. Vol. 402. Art. 136838. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136838

10. Kieush L., Rieger J., Attrotto R. et al. Roadmap for recycling practices and resource utilization in the iron and steelmaking industry: a case studies. *Matériaux & Techniques*. 2024. Vol. 112. No. 5. Art. 503. DOI: https://doi.org/10.1051/mattech/2024026

11. Gao H., Liu J., Daigo I. Methodology development for estimating the impact of restriction factors to promote national steel recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 2025. Vol. 215. Art. 108052. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108052

12. Watari T., Fishman T., Wieland H., Wiedenhofer D. Global stagnation and regional variations in steel recycling. *Resources, Conservation and Recycling*. 2025. Vol. 220. Art. 108363. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108363

13. Brescini M., Antomarioni S., Ciarapica F. E., Bevilacqua M. A critical review on industrial symbiosis applied to the steel manufacturing. *Environmental Technology Reviews*. 2026. Vol. 15. No. 1. P. 97–117. DOI: https://doi.org/10.1080/21622515.2025.2608249

14. Кизим М. О., Хаустова В. Є., Котляров Є. І., Шульга І. В. Аналіз напрямків трансформації гірничо-металургійного комплексу України. *Бізнес Інформ*. 2024. № 6. С. 217–225. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-6-217-225

15. Шликова В. О., Полякова О. Ю., Котляров Є. І. Державна допомога у розвитку зеленої металургії: принципи і досвід ЄС для України. *Проблеми економіки.* 2026. № 1. С. 122–131. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-0712-2026-1-122-131

16. Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking. Paris: OECD Publishing, 2020. 190 p. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/10/iron-and-steel-technology-roadmap_040b14d5/3dcc2a1b-en.pdf (дата звернення: 07.09.2026).

17. Внесок ГМК в економіку України 2024. Київ: GMK Center, 2025. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2025/04/ukr_2025_Econ_Steel-impact.pdf (дата звернення: 05.09.2026).

18. Перспективні напрями розвитку чорної металургії в умовах екологічних обмежень : монографія / за ред. Є. І. Котлярова, Т. І. Салашенко; авт. кол.: В. Є. Хаустова, М. О. Кизим, Є. І. Котляров, Т. І. Салашенко, І. В. Шульга, І. О. Губарєва, Д. М. Костенко. Харків : ФОП Лібуркіна Л. М., 2025. 178 с. DOI: https://doi.org/10.32983/978-617-7801-57-2

19. Трушкіна Н. В. Циркулярна економіка: становлення концепції, еволюція розвитку, бар'єри, проблеми і перспективи. *Вісник економічної науки України*. 2021. № 1 (40). С. 9–20. DOI: https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.1(40).9-20

References:

1. Kirchherr J., Yang N.-H. N., Schulze-Spüntrup F., Heerink M. J., Hartley K. (2023) Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 194, 107001. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107001

2. Reike D., Vermeulen W. J. V., Witjes S. (2018) The circular economy: New or Refurbished as CE 3.0? – Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 135, pp. 246–264. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.08.027

3. Lee H.-W., Shih H.-C., Ma H.-W. (2025) Direct reuse of the end-of-use structural steel: Assessing the economic and carbon reduction effects. *Journal of Industrial Ecology*, vol. 29 (4), pp. 1237–1249. DOI: https://doi.org/10.1111/jiec.70044

4. Mukhlis R., Satritama B., Brooks G., Rhamdhani M. A. (2026) Steel Scrap: Strategic Commodity for Green Steel Circularity and Analyses of Tramp Elements Accumulation. *Journal of Sustainable Metallurgy*, vol. 12, pp. 2705–2740. DOI: https://doi.org/10.1007/s40831-025-01397-5

5. Wagner A., Mogollón J. M., Albizzati P. F., Walker A., Tukker A., Tonini D. (2026) Circular Economy can substantially reduce EU steel supply chain emissions: A quality-focused circularity assessment. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 228, 108825. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2026.108825

6. Piemonti A., Conforti A., Cominoli L., Luciano A., Plizzari G., Sorlini S. (2023) Exploring the Potential for Steel Slags Valorisation in an Industrial Symbiosis Perspective at Meso-scale Level. *Waste and Biomass Valorization*, vol. 14, pp. 3355–3375. DOI: https://doi.org/10.1007/s12649-022-01940-5

7. Krammer A. C., Doschek-Held K., Steindl F. R. et al. (2024) Valorisation of metallurgical residues via carbothermal reduction: A circular economy approach in the cement and iron and steel industry. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, vol. 42 (9), pp. 797–805. DOI: https://doi.org/10.1177/0734242X241240040

8. Chandel S. S., Singh P. K., Katiyar P. K., Randhawa N. S. (2023) A Review on Environmental Concerns and Technological Innovations for the Valorization of Steel Industry Slag. *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 40 (6), pp. 2059–2086. DOI: https://doi.org/10.1007/s42461-023-00886-z

9. Falsafi M., Terkaj W., Guzzon M., Malfa E., Fornasiero R., Tolio T. (2023) Assessment of valorisation opportunities for secondary metallurgy slag through multi-criteria decision making. *Journal of Cleaner Production*, vol. 402, 136838. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136838

10. Kieush L., Rieger J., Attrotto R. et al. (2024) Roadmap for recycling practices and resource utilization in the iron and steelmaking industry: a case studies. *Matériaux & Techniques*, vol. 112 (5), 503. DOI: https://doi.org/10.1051/mattech/2024026

11. Gao H., Liu J., Daigo I. (2025) Methodology development for estimating the impact of restriction factors to promote national steel recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 215, 108052. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.108052

12. Watari T., Fishman T., Wieland H., Wiedenhofer D. (2025) Global stagnation and regional variations in steel recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 220, 108363. DOI: https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2025.108363

13. Brescini M., Antomarioni S., Ciarapica F. E., Bevilacqua M. (2026) A critical review on industrial symbiosis applied to the steel manufacturing. *Environmental Technology Reviews*, vol. 15(1), pp. 97–117. DOI: https://doi.org/10.1080/21622515.2025.2608249

14. Kyzym M. O., Khaustova V. Ye., Kotliarov Ye. I., Shulga I. V. (2024) Analiz napriamkiv transformatsii hirnycho-metalurhiinoho kompleksu Ukrainy [Analyzing the Directions of Transformation of the Mining and Metallurgical Complex of Ukraine]. *Biznes Inform – Business Inform*, vol. 6, pp. 217–225. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-6-217-225 (in Ukrainian)

15. Shlykova V. O., Poliakova O. Yu., Kotliarov Ye. I. (2026) Derzhavna dopomoha u rozvytku zelenoi metalurhii: pryntsypy i dosvid YeS dlia Ukrainy [State Aid for the Development of Green Metallurgy: EU Principles and Experience for Ukraine]. *Problemy ekonomiky – The Problems of Economy*, vol. 1, pp. 122–131. DOI: https://doi.org/10.32983/2222-0712-2026-1-122-131 (in Ukrainian)

16. International Energy Agency (2020) *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking*. Paris: OECD Publishing. Available at: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2020/10/iron-and-steel-technology-roadmap_040b14d5/3dcc2a1b-en.pdf (accessed September 7, 2026).

17. GMK Center (2025) *Vnesok HMK v ekonomiku Ukrainy 2024* [Contribution of iron & steel industry to the Ukrainian economy in 2024]. Kyiv: GMK Center. Available at: https://gmk.center/wp-content/uploads/2025/04/ukr_2025_Econ_Steel-impact.pdf (accessed September 5, 2026). (in Ukrainian)

18. Khaustova V. Ye., Kyzym M. O., Kotliarov Ye. I. et al. (2025) *Perspektyvni napriamy rozvytku chornoi metalurhii v umovakh ekolohichnykh obmezhen: monohrafiia* [Prospective directions for the development of ferrous metallurgy under environmental constraints: monograph], Ye. I. Kotliarov, T. I. Salashenko (Eds.). Kharkiv: FOP Liburkina L. M., 178 p. DOI: https://doi.org/10.32983/978-617-7801-57-2 (in Ukrainian)

19. Trushkina N. V. (2021) Tsyrkuliarna ekonomika: stanovlennia kontseptsii, evoliutsiia rozvytku, bariery, problemy i perspektyvy [Circular Economics: Concept Formation, Evolution of Development, Barriers, Problems and Prospects]. *Visnyk ekonomichnoi nauky Ukrainy – Herald of the Economic Sciences of Ukraine*, vol. 1 (40), pp. 9–20. DOI: https://doi.org/10.37405/1729-7206.2021.1(40).9-20 (in Ukrainian)

Kotliarov Yevhen
Research Center for Industrial Problems of Development of the National Academy of Sciences of Ukraine

Shulga Igor
State Enterprise "Ukrainian State Research Institute of Carbochemistry"

Trushkina Nataliia
Research Center for Industrial Problems of Development of the National Academy of Sciences of Ukraine

ORGANIZATIONAL AND TECHNOLOGICAL FOUNDATIONS FOR THE CIRCULAR TRANSFORMATION OF UKRAINE'S METALLURGICAL INDUSTRY BASED ON THE 9R PRINCIPLES

The article substantiates a sector-specific adaptation of the 9R principles of the circular economy, taking into account the technological characteristics of Ukraine's metallurgical industry. The study aims to define the organizational and technological foundations of the sector's circular transformation and to establish the relationships between the R-principles, the stages of the production chain, the types of resources involved, and the possible solutions. The methodological framework combines systems and process approaches with content analysis, comparative and structural-logical analysis, material and energy flow analysis, matrix matching, generalization, and synthesis. A sequence for identifying circular solutions is proposed on the basis of an analysis of the technological stage, resource losses, by-products, waste, and opportunities for reuse. A matrix has been developed to link the 9R principles with technological stages, resource flows, organizational and technological solutions, and expected outcomes. Three functional pathways of circular transformation are distinguished: preventing resource losses and rethinking technology; preserving functionality and extending the use of resources; and recovering material and energy value. The study shows that the practical meaning of the R-principles varies depending on the type of resource and the production operation, while a single technological measure may contribute to the implementation of several R-principles at the same time. It is argued that a circular approach in metallurgy should address not only scrap metal and waste, but also material, energy, and water flows, by-products, equipment, and changes in individual production processes. The scientific novelty lies in moving beyond a general 9R classification towards a practical framework for substantiating decisions at specific stages of metallurgical production. The practical value of the results lies in their use for identifying resource losses, developing portfolios of modernization projects, selecting measures for resource efficiency and decarbonization, setting investment priorities for metallurgical enterprises, and preparing programs for the technological modernization of the industry.

Keywords: *metallurgical industry, circular economy, 9R principles, circular transformation, organizational and technological solutions, resource efficiency, decarbonization.*

JEL classification: L61, O33, Q53, Q56

Дата надходження статті: 09.09.2026
Дата прийняття статті до публікації: 13.10.2026
Дата публікації статті: 29.10.2026