

DOI: 10.34185/1991-7848.2026.01.03

УДК 669.1:504.06:658.562

А.П. Мішалкін, В.О. Петренко, Л.В. Камкіна, Т.А. Фонарьова, А.М. Селегей

## **ІНТЕГРАЦІЯ ФУНКЦІОНАЛУ КОМПЛАЄНС-УПРАВЛІННЯ В СИСТЕМУ ДЕКАРБОНІЗОВАНОГО РОЗВИТКУ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА**

***Анотація.** У статті визначено основні напрями інтеграції складових комплаєнс-функціоналу в систему технологічного розвитку чорної металургії, узгоджену з сучасними концепціями декарбонізації, циркулярної економіки та ESG-орієнтованого управління. Розглянуто механізми та способи підвищення екологічної чистоти основних металургійних процесів шляхом використання вторинних ресурсів (шлами, шлаки, пил, дисперсні відходи вапняного виробництва), фізичної теплоти газів-продуктів виробництва та хімічної енергії CO–H<sub>2</sub>-сумішей. Обґрунтовано концептуальні підходи до інтеграції інструментів комплаєнс-управління до системи управління енергоефективністю та ресурсоефективністю металургійного виробництва, що дає змогу підвищити прозорість матеріальних та енергетичних потоків та контролювати вуглеродомісткість основних етапів наскрізної технологічної схеми виробництва сталі. Доведено що інтеграція інструментів комплаєнс-управління до процесів декарбонізації дозволяє контролювати вуглецевий слід, мінімізувати антропогенний вплив на навколишнє середовище та підвищувати економічну стабільність підприємств. Обґрунтовано роль удосконалення існуючих технологій у реалізації концепції сталого та екологічно безпечного виробництва.*

***Ключові слова:** функціонал комплаєнс - управління, декарбонізація металургії, вуглецевий слід, CO<sub>2</sub>-інтенсивність, циркулярна економіка, ресурсозбереження та енергоефективність, інтеграція комплаєнс-інструментів, ESG-орієнтоване управління.*

Постановка проблеми, мета та завдання дослідження

Враховуючи високу енергоемність і значну частку металургійної галузі у глобальних викидах парникових газів, зниження вуглецевої інтенсивності виробництва стає одним із ключових чинників забезпечення конкурентоспроможності металургійної продукції на світовому ринку,

---

© Мішалкін А.П., Петренко В.О., Камкіна Л.В., Фонарьова Т.А., Селегей А.М., 2026 Copyright for this paper by its authors. Use permitted under License CC BY 4.0.

---

особливо в умовах запровадження механізмів регулювання вуглецевих викидів, зокрема СВМ (Carbon Border Adjustment Mechanism, Механізм вуглецевого коригування імпорту).

У цих умовах особливого значення набуває формування ефективних управлінських механізмів. Одним із таких механізмів, здатних забезпечити інтеграцію технологічних, екологічних та економічних аспектів розвитку металургійного виробництва, виступає комплаєнс-управління, яке доцільно розглядати як інтегровану систему управління декарбонізованим розвитком металургії, що забезпечує узгодження інноваційних технологічних рішень із сучасними екологічними стандартами, регуляторними вимогами та принципами сталого розвитку.

Метою роботи є обґрунтування концептуальних засад інтеграції функціоналу комплаєнс-управління у систему декарбонізованого розвитку металургійного виробництва та визначення його ролі у підвищенні енерго-ресурсної ефективності, екологічної безпеки і технологічної стійкості процесів виплавки чавуну та сталі.

Для досягнення поставленої мети використано наступні методи дослідження: системний аналіз сучасних тенденцій розвитку металургійних технологій; методи структурно-функціонального аналізу систем управління виробництвом; порівняльний аналіз показників енерго-ресурсної ефективності та вуглецевої інтенсивності металургійних процесів; узагальнення наукових і технологічних підходів до декарбонізації металургійного виробництва.

Завдання дослідження. У роботі вирішено наступні завдання:

- проаналізовано сучасні технологічні та екологічні виклики розвитку металургійних підприємств в умовах декарбонізації галузі;
- обґрунтовано концептуальну модель інтеграції комплаєнс-управління в системі сталого розвитку металургійного виробництва;
- визначено основні напрями використання комплаєнс-інструментів для підвищення енерго-ресурсної ефективності та зниження вуглецевої інтенсивності металургійних процесів;

- здійснена оцінка ролі комплаєнс-управління, як інтеграційного механізму узгодження технологічних, екологічних і економічних параметрів виробництва.

**Наукова новизна** отриманих результатів полягає в наступному.

Запропоновано розглядати механізм функціонально-інтегрованої системи комплаєнс-управління задля координації виробничих процесів, як системоутворюючий фактор забезпечення декарбонізованого розвитку виробництва, що поєднує технологічні, екологічні та управлінські інструменти забезпечення сталості металургійних процесів.

Обґрунтовано концептуальні підходи до інтеграції функцій комплаєнс-управління у систему менеджменту, що дозволить контролювати енерго-ресурсну ефективність металургійного виробництва, підвищити прозорість матеріально-енергетичних потоків та здійснювати моніторинг вуглецевої інтенсивності основних етапів наскрізної технологічної схеми виробництва сталі.

Уточнено систему ключових показників оцінки ефективності декарбонізації металургійних процесів, які поєднують технологічні, енергетичні та кліматичні індикатори виробництва.

Розкрито роль комплаєнс-управління як інтеграційного механізму узгодження інноваційних технологічних рішень із сучасними екологічними та регуляторними вимогами, що забезпечує формування передумов сталого розвитку металургійних підприємств.

Показано, що інтеграція комплаєнс-управління у процеси декарбонізації дозволяє забезпечити контроль вуглецевого сліду, мінімізувати техногенне навантаження на довкілля та підвищити економічну стійкість підприємств. Обґрунтовано роль удосконалення існуючих технологій у реалізації концепції сталого та еколого-безпечного виробництва.

#### **Викладення основного матеріалу та результатів дослідження**

Сучасний етап розвитку чорної металургії характеризується посиленням глобальних екологічних, енергетичних та регуляторних викликів, пов'язаних із необхідністю скорочення викидів парникових газів, підвищення ресурсно-енергетичної ефективності виробництва та адаптації існуючих промислових технологій до сучасних принципів сталого розвитку. Враховуючи, що

металургійна галузь належить до найбільш енерго- та вуглецеємних секторів промисловості, її трансформація у напрямку декарбонізації розглядається як один із ключових факторів досягнення кліматичних цілей.

Основні тенденції розвитку металургійних технологій пов’язані з впровадженням комплексних рішень, спрямованих на зниження вуглецевої інтенсивності виробництва. До таких рішень належать використання альтернативних відновників, передусім водню, інтеграція технологій прямого відновлення заліза з подальшою електроплавкою сталі, розширення використання вторинних матеріальних ресурсів та енергетичних потоків поточного виробництва, а також оптимізація теплових і масообмінних процесів у традиційних металургійних агрегатах. Водночас реалізація зазначених технологічних напрямів потребує створення ефективних механізмів управління, здатних забезпечити узгодження інноваційних технологічних рішень із сучасними екологічними, економічними та регуляторними вимогами.

У цих умовах особливого значення набуває формування інтегрованих систем управління, що забезпечують контроль вуглецевої інтенсивності виробництва, прозорість матеріально-енергетичних потоків та відповідність діяльності підприємств міжнародним кліматичним і екологічним стандартам. Одним із таких інструментів виступає комплаєнс-управління, яке у сучасній промисловій практиці трансформується з інструменту нормативного контролю у комплексний механізм стратегічного управління сталим розвитком підприємства.

У контексті трансформації металургійного виробництва доцільно розглядати функціонал комплаєнс-управління не лише як систему забезпечення відповідності регуляторним вимогам, але, і як інституційно-технологічну платформу управління декарбонізованим розвитком металургії, що інтегрує технологічні, екологічні та управлінські інструменти забезпечення сталості виробничих систем. Такий підхід дозволяє поєднати процеси модернізації металургійних технологій, підвищення енерго-ресурсної ефективності виробництва, скорочення вуглецевого сліду продукції та формування прозорих механізмів контролю технологічних і екологічних параметрів виробництва.

Сучасний етап розвитку чорної металургії характеризується необхідністю скорочення питомих викидів CO<sub>2</sub>, підвищення ресурсної ефективності та зменшення техногенного навантаження на довкілля. Відповідно до глобальних аналітичних оцінок, металургія залишається одним із найбільших промислових джерел парникових газів [1]. Сталеливарна галузь генерує значну частку глобальних промислових викидів CO<sub>2</sub>, за сучасними оцінками [2], виробництво сталі формує понад 8% світових викидів парникових газів і близько 11 % CO<sub>2</sub>.

Перехід до вуглецево-нейтральних технологій (H<sub>2</sub>-DRI (Водневе пряме відновлення заліза), використання синтез-газу, гібридних BF (Доменна піч) – BOF (киснево-конвертерний процес) – EAF (Електродугова піч) схем вимагає формування системи управління виробництвом, здатної забезпечити контроль технологічних, екологічних та економічних параметрів. Такою системою виступає інтегрований функціонал комплаєнс-управління, який доцільно розглядати як інтеграційний механізм узгодження технологічних, екологічних та управлінських інструментів, спрямований на забезпечення сталого та економічно стійкого розвитку металургійного підприємства.

Концептуальна основа інтеграції комплаєнс-функціоналу в системі декарбонізованого розвитку чорної металургії повинна формуватися на основі поступової трансформації металургійного виробництва, яка передбачає системне поєднання технологічних, екологічних та управлінських інструментів забезпечення сталого розвитку галузі [3]. Автори стверджують, що декарбонізація металургії потребує фундаментальної трансформації всієї галузевої системи, що фактично підтверджує ідею системної інтеграції технологічних, екологічних та управлінських інструментів. У сучасних дослідженнях декарбонізації сталеливарної промисловості також наголошується, що досягнення кліматичних цілей потребує поєднання технологічних інновацій, енергоефективності, фінансових та управлінських механізмів [4]. У роботах з декарбонізації промисловості [5], також зазначається, що реалізація переходу до кліматично нейтрального виробництва потребує інтегрованих моделей, які поєднують технологічну модернізацію, фінансові інструменти та системи моніторингу викидів.

Сучасна модель розвитку металургійного виробництва, ґрунтується на поєднанні взаємопов’язаних напрямів розвитку, до яких належать:

- декарбонізація технологічних процесів, спрямована на зниження вуглецевої інтенсивності виробництва шляхом впровадження енергоефективних технологій, використання альтернативних видів палива та відновників, оптимізації теплових і масообмінних процесів;

- реалізація принципів циркулярної економіки, що передбачає максимальне залучення вторинних матеріальних ресурсів (шлаків, шламів, пилу, метало- кальцієвмісних відходів) у повторний виробничий цикл з формуванням замкнутих матеріальних потоків;

- підвищення ресурсної та енергетичної ефективності виробництва, яке досягається шляхом оптимізації питомих витрат енергоресурсів, розширення використання вторинних енергетичних ресурсів та підвищення коефіцієнта використання корисних складових теплової енергії: хімічної та фізичної;

- запровадження ESG-орієнтованих підходів до управління, де ESG (три ключові критерії для оцінки стійкості та етичності бізнесу: Екологія (Environmental), Соціальна відповідальність (Social) та Управління (Governance)), що забезпечують узгодження виробничої діяльності з екологічними, соціальними та управлінськими вимогами сталого розвитку [6,7];

- використання цифрових систем моніторингу та управління технологічними процесами, які забезпечують оперативний контроль ключових параметрів виробництва, підвищення прозорості матеріально-енергетичних потоків [8] та об’єктивізацію прийняття управлінських рішень [9].

У такій системі комплаєнс-функціонал виступає інтеграційним інструментом, механізм якого забезпечує узгодженість технологічних інновацій, екологічних нормативів і економічних інтересів підприємства. Впровадження комплаєнс-управління формує інституційну основу для реалізації стратегії вуглеце-нейтрального та ресурсо-енергоефективного розвитку металургійного виробництва. Інтеграційно-регуляторний механізм забезпечення сталості виробництва підкреслює, що в умовах металургійного виробництва комплаєнс поєднує технологічні, екологічні та управлінські інструменти; координує різноманітні за змістом та об’єднанні ціллю функції

підприємства, реалізація яких спрямована на досягнення єдиної стратегічної мети.

Для забезпечення раціональних умов інтегрування функцій комплаєнс-управління в структуру металургійного виробництва в дослідженні використано положення гармонізованої методології (ГМ), модифіковані та адаптовані до умов сучасного виробництва та вимог діючих законів.

Інтеграція функціоналу комплаєнс-управління на основних етапах виробництва сталі забезпечить рецикл потоків вторинної теплоти та сировини, і, згідно з основними положеннями ГМ, повинна спиратися на принципи організації виробництва, які наведені нижче.

1. Системна цілісність виробництва. Металургійне підприємство розглядається, як інтегрована системи «сировина – енергія – технологія – відходи – довкілля», що дозволяє:

- розрахувати та узгодити матеріальні та теплові баланси основних етапів сучасних технологічних схем виробництва металів;

- мінімізувати внутрішні втрати ресурсів сировини та енергії, яка витрачається для забезпечення стійкого розвитку виробництва;

- забезпечити трасованість (traceability, у перекладі з англ. «відстежуваність») потоків сировини і теплоти вторинного походження, тобто забезпечити можливості кількісно та якісно простежувати походження, рух, перетворення і кінцеве використання матеріального або теплового потоку в межах виробничої системи (життєвого циклу певних видів складових ресурсів), що є базою для ресурсного та екологічного комплаєнсу.

2. Замкненість матеріальних і теплових потоків, яка передбачає:

- рецикл шлаків, пилу, шламів, метало- кальціє- вуглецевовмісних відходів, які утворюються в результаті здійснення відповідних металургійних процесів, а за характерними ознаками є техногенними за походженням;

- утилізацію фізичної теплоти шлаку, агломерату та технологічних газів у процесах BF – BOF – EAF, що є продуктами реалізації основних етапів виробництва сталі в рамках наскрізної технологічної [10,11] схеми. При цьому, доцільно максимально реалізувати теплову та паливну складові джерел вторинної енергії;

- повторне використання вторинної енергії газів BF–BOF – EAF. Джерелом енергії при цьому стає хімічна енергія газів (CO, H<sub>2</sub> та

---

частково,  $\text{CH}_4$ ). Енергія реалізується через перетворення в теплову (спалювання), далі – у пару або електроенергію [13]. Таким чином, реалізується екзотермічне хімічне перетворення енергії вторинного походження.

3. Технологічна трасованість. Формальне визначення, яке використовується у загальному контексті управління потоками (логістика, виробництво) і добре кореспондується з науковою і технічною термінологією, трактується, згідно з [12], як: «здатність ідентифікувати, відстежувати і прослідковувати шлях, походження, стан і трансформації об’єкта чи матеріалу протягом усіх етапів його життєвого циклу або руху в системі потоків».

4. Термодинамічна узгодженість процесів. Згідно з ним, як з одним з основних положень ГМ, інтеграція комплаєнс-функціоналу повинна базуватись на:

- реальних фізико-хімічних закономірностях та особливостях технологій виплавки, позапічної обробки, розливання, хіміко-термічної та обробки металу тиском;

- оптимізації окислювально-відновлювального режиму, параметрів дуття та шлакоутворення; способів позапічної обробки чавуну та сталевих напівпродукту;

- мінімізації втрат фізичної теплоти чавуном, сталлю і хімічної енергії при реалізації процесів з участю металевої, шлакової та газової фаз, яке відбувається під впливом факторів зовнішньої дії. В результаті це дозволить знизити перевитрати палива, електроенергії; зменшити утворення надлишкового  $\text{FeO}$  в шлаках, що підвищить вихід придатного та сприятиме зниженню техногенного навантаження на довкілля.

5. Мінімізація техногенного навантаження передбачає системне зниження інтенсивності утворення виробничих відходів і скорочення пилогазових викидів, що зумовлено невідповідністю фактичного рівня розвитку науково-технологічних рішень та технічного оснащення металургійного виробництва сучасним екологічним нормативам і регуляторним вимогам. Реалізація зазначеного принципу організації, також, орієнтована на зменшення питомого показника викидів  $\text{CO}_2$  на одиницю продукції (кг  $\text{CO}_2$ /т сталі), що виступає базовим індикатором екологічної та кліматичної складових комплаєнс-функціоналу підприємства.

6. Інтеграція комплаєнсу в технологічні регламенти визначає комплаєнс не як зовнішній контроль, а як: елемент технологічного алгоритму; критерій прийняття операційних рішень; інструмент оптимізації режимів плавки, які дозволяють переводити комплаєнс з декларативної функції у виробничу.

7. Енерго-ресурсна ефективність як критерій сталості металургійного виробництва полягає у досягненні мінімально можливих питомих витрат енергетичних та матеріальних ресурсів за умови збереження стабільності технологічних режимів, нормативної якості продукції та екологічної безпеки процесів.

У сучасних умовах енерго-ресурсна ефективність розглядається не лише як економічна категорія, а, як інтегрований показник технологічної досконалості, екологічної відповідності та інституційної зрілості підприємства.

Згідно з [13], трасованість, як елемент управління матеріальними потоками (material flow management), визначається процесом відстеження та аналізу руху матеріалів і енергії в межах системи, що включає поняття джерел, потоків, накопичення та їх перетворень. Інше, близьке за суттю трактування наведено в [14], яке визначено як «система кількісного і якісного обліку, контролю та відстежуваності, утворення, переміщення, переробки та повторного їх використання». Це є фундаментальною концепцією, що лежить в основі системної трасованості потоків, основні положення якої доцільно використати для інтеграції комплаєнс-функціоналу в структуру управління металургійним підприємством.

Включення до системи трасованості потоків вторинної сировини та енергії, які мають техногенне походження, не визначається з аналізу результатів досліджень [13, 14], а є наслідком узагальнення трьох концепцій, заснованих на контролі та аналізі матеріальних потоків та промислової екології.

На основі ISO-підходу (ISO – Міжнародна організація зі стандартизації), «трасованість» узагальнена для промислового виробництва, що робить її коректною для інтерпретації, також і металургійного виробництва, як здатність ідентифікувати, кількісно обліковувати та простежувати походження, рух, перетворення і кінцеве використання матеріальних та енергетичних потоків у межах визначеної системи [15]. У металургійному контексті,

використовуючи ISO-підхід, об’єктом трасованості доцільно визначити матеріальні та енергетичні потоки; технологічні перетворення; переміщення потоків між етапами наскрізної технології виробництва сталі.

До основних напрямів інтеграції комплаєнс-функціоналу доцільно віднести наступні:

- декарбонізацію технологічних процесів;
- комплексне використання вторинних ресурсів – відходів техногенного походження;
- комплаєнс енергетичної інтеграції, технологічної чистоти щодо впливу сучасних способів виробництва металів на екологію та інноваційний розвиток в умовах сучасного виробництва та при його декарбонізації.

Системно проаналізуємо вищезазначені напрями інтеграції функціоналу комплаєнс-управління в загальну систему забезпечення металургійного виробництва.

Декарбонізація технологічних процесів є ключовою передумовою подальшої трансформації чорної металургії у напрямку формування енергоефективного, ресурсно-замкненого та екологічно безпечного виробництва, що забезпечить зниження вуглецевої інтенсивності металопродукції, підвищення конкурентоспроможності підприємств та їх відповідність сучасним кліматичним і регуляторним вимогам.

До важливих напрямів декарбонізації технологічних процесів, від реалізації яких залежить ефективність розвитку вуглецево-нейтрального виробництва, відносяться:

- часткова або максимально можлива заміна коксу, природного газу (ПГ) та ПВП (пиловугільного палива ) на водень ( $H_2$ ) з розробкою технологій на основі використання корисних властивостей його фізико-хімічного потенціалу – паливної та хімічної енергії;
- використання в металургійному виробництві процесів підготовки залізорудних матеріалів; застосування у виробництві сталі продуктів підготовки та сумішей  $CO-H_2$  (синтез-газ), що суттєво зменшує «вуглецевий слід»;

- оптимізація зон теплового резерву, яка визначається зниженням температури TRZ (thermal reserve zone), покращенням ефективності реакції відновлення, що дозволяє працювати з низькою швидкістю відновника [16];

- інтенсифікація прямого відновлення оксидів заліза, збалансована з вкладом реакцій відновлення газами (CO, H<sub>2</sub>);

- поступовий перехід до гібридних схем виробництва сталі BF–DRI–EAF (Доменна піч – Пряме відновлення заліза – Електродугова піч);

- зниження в енергетичних балансах металургійних процесів частки теплоти, що витрачається для здійснення ендотермічних реакцій, наприклад газифікації вуглецю ( $\Delta H \approx +172$  кДж/моль при 1000 °C) в умовах доменної печі, де вона отримує розвиток в TRZ – зоні і вище неї («solution loss» реакції) [17];

- контроль вуглецевого сліду по основним етапам металургійного переділу;

- аудит відповідності СВМ визначає механізм коригування вуглецю на кордоні ЄС для товарів із високою вуглецевою інтенсивністю (зокрема сталі) для узгодження імпорту з правилами EU ETS (European Union Emission Trading Scheme - схема торгівлі викидами Європейського Союзу) [18].

- технологічна верифікація ефективності водневих технологій DRI → EAF та CPI (Вдування вуглецевмісних матеріалів) → BF; при дослідженні технологічної схеми H<sub>2</sub> → DRI → EAF [19] показано, що використання водню, як відновника, може знизити викиди CO<sub>2</sub> приблизно на 90 % порівняно з традиційним доменним процесом;

- управління ризиками нестабільності технологічних параметрів металургійних процесів полягає у системному моніторингу та регулюванні ключових параметрів плавки: хімічного складу чавуну, параметрів дуття, газової атмосфери та складу шлакової фази, від яких залежить тепловий та окислювально-відновлювальний баланс плавки.

Основною функцією комплаєнс-управління є встановлення та контроль допустимих вуглецевих індикаторів, в якості яких доцільно використати показник питомої емісії CO<sub>2</sub> по технологічних переділах (кг CO<sub>2</sub>/т агломерату/кг CO<sub>2</sub>/т чавуну (BF)/ кг CO<sub>2</sub>/т сталі (BOF або EAF) [20].

За даними [21] показники питомої емісії CO<sub>2</sub> становлять при виробництві: агломерату  $\approx 319$  кг CO<sub>2</sub>/т; чавуну (BF)  $\approx 1500$  кг CO<sub>2</sub>/т. Це визначає необхідність окремого розрахунку викидів для агломерації, доменного процесу,

конвертерного та електросталеплавильного. Результати дослідження доцільності використання показників інтенсивності викидів на тону сталі, приведені в [20], підтверджують зв'язок між споживанням коксу / енергії та інтенсивністю викидів CO<sub>2</sub>.

Відповідно до методології IPCC (Міжурядової групи експертів зі зміни клімату) [22], яка базується на принципі повного обліку потоків вуглецю, здійснюється з урахуванням процесів утворення, використання та втрат технологічних газів, зокрема при їх спалюванні та факельному згорянню, визначаються основні складові її функціонального призначення та способи раціональної утилізації доменних та конвертерних газів, як джерел вторинної теплової енергії – палива.

На основі комплексної енергетичної та технологічної оцінки водневої металургії [23] автори дослідження [24] провели моделювання технологічних параметрів H<sub>2</sub>-DRI-процесу, а його результати використали для верифікації ефективності водневого відновлення та масштабування H<sub>2</sub>-DRI-процесу.

Таким чином, комплексне оцінювання стану металургійного виробництва по основним технологічним переділам дозволяє ідентифікувати найбільш вуглецемісткі стадії виробництва, з визначенням показників інтенсивності вуглецю та ефективності використання вторинних енергоресурсів, зокрема коефіцієнт утилізації технологічних газів. При цьому, керування параметрами основних етапів наскрізної технології виробництва сталі дозволяє своєчасно виявляти та сприяти виправленню відхилень технологічного режиму від регламенту, запобігати порушенню стійкості процесу та стабільності його кінцевих результатів. Управління ризиками технологічної нестабільності доцільно спрямовувати на підтримання оптимального співвідношення між хімічним складом металу, параметрами дуття та шлаковим режимом. Це, в свою чергу, сприятиме забезпеченню стабільності плавки, мінімізації енерговитрат, дозволить прогнозувати якість металу, запроваджувати ефективний комплаєнс-функціонал управління ризиками нестабільності вихідних характеристик чавуну, дуття, шлакової фази та інших параметрів основних етапів відповідних технологій. Оцінку результатів здійснення заходів інтегрування комплаєнс-функціоналу до умов металургійного виробництва

раціонально визначати за показником зниження питомих викидів CO<sub>2</sub> без втрати стабільності процесу та металургійної цінності металопродукції.

Контроль вуглецевого сліду на основних етапах металургійного переділу доцільно здійснювати шляхом процесно-орієнтованого обліку викидів CO<sub>2</sub> [18 ], при якому емісії визначаються окремо для кожної технологічної стадії виробництва. Такий методологічний підхід дозволяє ідентифікувати основні джерела CO<sub>2</sub> і оптимізувати технологічні режими відповідних процесів.

Розглянемо другий напрям інтеграції комплаєнс-функціоналу – комплаєнс використання вторинних ресурсів – відходів техногенного походження. Ресурсна база, як джерело вторинних ресурсів сировини визначається рівнем розвитку виробництва, що поєднує науку, технологію, обладнання та культуру виробництва. Створюється вона зі шлаків та шламів поточного виробництва на основних етапах металургійного переділу; пилу газоочисток; дисперсних відходів виробництва вапна; металовмісних відходів прокатного виробництва техногенного походження.

Комплаєнс-завданнями є наступні: контроль токсикологічного складу; запобігання накопиченню Zn, Pb, Cu; управління замкнутими матеріальними потоками; верифікація коефіцієнта циркулярності та ін. Результатами реалізації цих завдань є зменшення техногенного навантаження та скорочення потреби виробництва у первинній сировині.

Третій напрям інтеграції комплаєнс-функціоналу – енергетична інтеграція включає управління (прогнозуванням, поточним контролем, корегуванням та аналізом результатів) використанням фізичної теплоти об'єктів металургійного походження на всіх етапах наскрізної технології виробництва чавуну, сталі та спеціальних сплавів, утилізація/рекуперация фізичної теплової енергії процесів і агрегатів. Окремо, хімічна енергія спрямовується на використання: CO, як відновника; H<sub>2</sub>, як відновника і теплоносія; повторне спалювання доменного газу; перетворення CO у синтез-газ. Функціонально комплаєнс-управління зводиться до: аудиту енергоефективності; контролю коефіцієнта використання вторинних газів; мінімізації фугитивних викидів; верифікації ККД (коефіцієнту корисної дії) утилізаційних систем та управління ризиками вибухонебезпечності H<sub>2</sub>, з

метою зниження питомої енергоємності та зменшення забруднення навколишнього середовища.

Комплаєнс екологічної інтеграції, який визначається досягнутим рівнем технологічної чистоти виробництва, контролює його вплив на екологію, а його функціональні можливості доцільно спрямовати на: зниження в металі S, P, N, H; контроль вмісту активного кисню в ньому; стабілізацію шлакового режиму; зменшення кількості шлаку без зниження рівню його реакційної та мінімізацію неметалевих включень. Ефективними інструментами контролю, за впливом на стан процесу, являються: цифровий контроль потенціалу окислення фаз; контроль газо-гідродинамічної стабільності металеві ванни, шляхом оптимізації параметру, який визначається як:  $L_{pz}/h_v$ , змінюючись за ходом продувки металеві ванни в інтервалі (0,3÷0,75) [25]; оптимізація хімічного складу та властивостей шлаку, який визначає спектр його призначення. Окрім того, важливими складовими комплаєнс-функціоналу є способи моніторингу та контролю дотримання технологічних регламентів; управління відхиленнями; мінімізації техногенних аварій, застосування яких сприяє стабілізації якості металу та зниженню аварійних викидів шкідливих з'єднань техногенного походження.

Інноваційна спрямованість комплаєнс-управління дозволяє досягти цілей декарбонізації металургійного виробництва таких, як: ризик-орієнтоване впровадження нових технологій; правовий захист (патентування) інновацій [26]; екологічна експертиза; економічна оцінка основних етапів життєвого циклу процесів, що забезпечить зниження інноваційних ризиків; прискорення сертифікації; відповідність міжнародним стандартам; інтеграцію на ринки ЄС; інвестиційну привабливість.

Удосконалення існуючих технологій визначається не лише «радикальними» переходами типу (H<sub>2</sub>-DRI), але й модернізацією доменного процесу; стабілізацією хімічного та фракційного складу шихтових матеріалів (агломерату, інших залізородних компонентів) [27]; удосконаленням режиму продувки металеві ванни кисневого конвертера та дугової сталеплавильної пічі; управлінням тепловим балансом сталеплавильних агрегатів, що є критично важливим для реалізації поступової декарбонізації; зниженням капітальних

витрат; мінімізацією виробничих ризиків при збереженні економічної стійкості підприємств.

Концептуально, формулу інтегрованої моделі залучення основних складових комплаєнс-управління в процес декарбонізації металургійного виробництва, можна визначити як систему взаємопов'язаних нормативно-регуляторних, технологічно-екологічних, цифрово-аналітичних, корпоративно-управлінських, фінансово-інвестиційних та ланцюгово-ринкових механізмів. Системно інтегрована модель забезпечує узгодження виробничих рішень із вимогами кліматичної політики, вуглецевого обліку, ресурсної ефективності та ринкової прийнятності низьковуглецевої сталі. Така постановка відповідає тому, як міжнародні інституції описують декарбонізацію сталеплавильного виробництва: як поєднання технологій, політик, інфраструктури, даних та інструментів управління.

Узагальнена таблиця інтегрованої моделі комплаєнс-управління процесом декарбонізації металургійного виробництва у форматі «блок моделі → функція → інструменти → результат» приведено в табл. 1.

Таблиця 1

Інтегрована блочна модель комплаєнс-управління декарбонізацією металургійного виробництва

Блок моделі	Функція	Основні інструменти	Очікуваний результат
Нормативно-регуляторний комплаєнс	Забезпечення відповідності діяльності екологічним, кліматичним та промисловим вимогам	Моніторинг існуючого законодавства; системи MRV *[28]; виконання вимог СВАН, ESG-звітності; внутрішні регламенти комплаєнсу.	Мінімізація регуляторних ризиків; відповідність міжнародним вимогам кліматичної політики
Технологічно-екологічний комплаєнс	Узгодження технологічних процесів із цілями декарбонізації та оновлення клімату	Аудит вуглецевого профілю; оптимізація шихти за хімічним та фракційним складом її компонентів; рецикл вторинних ресурсів; впровадження енерго-ефективних технологій	Зниження вуглецевої інтенсивності виробництва; підвищення його ресурсної ефективності

Продовження таблиці 1

Цифровий та MRV-комплаєнс	Забезпечення вимірювання, обліку, контролю викидів CO <sub>2</sub>	Системи збору даних; цифрові паспорти плавки; автоматизований контроль параметрів процесу	Достовірність даних щодо викидів; прозорість кліматичної звітності
Корпоративно-управлінський комплаєнс	Інтеграція декарбонізації у систему стратегічного управління підприємством	ESG-політика ; кліматична стратегія; комплаєнс-комітети; системи внутрішнього контролю	Підвищення рівню керованості трансформації підприємства; узгодження стратегічних і рішень
Фінансово-інвестиційний комплаєнс	Забезпечення фінансової підтримки процесів декарбонізації	Оцінка вуглецевої-інтенсивності інвестицій; внутрішня ціна вуглецю; зелені інвестиції; ESG-фінансування	Економічна ефективність переходу до низько вуглецевих технологій
Комплаєнс ланцюгів постачання (логістики)	Забезпечення прозорості джерел походження ресурсів сировини та енергії	Due diligence** [29]: класифікація брухту; контроль вуглецевого сліду продукції; стандарти сталей закупівель ресурсів	Підвищення екологічної та ринкової прийнятності продукції
Енергетичний комплаєнс	Оптимізація використання енергоресурсів	Енергетичні аудити; системи управління енерго-менеджментом ISO 50002-1:2025***; використання відновлюваної енергії; рекуперація теплоти	Зниження енергоємності основних етапів та металургійного виробництва загалом
Екологічний моніторинг та контроль	Оцінка впливу виробництва на довкілля	Системи моніторингу викидів CO <sub>2</sub> ; екологічний аудит; оцінка життєвого циклу металопродукції	Зменшення навантаження виробництва на екологію
Інноваційно-технологічний розвиток	Підтримка впровадження нових технологій декарбонізації	Водневі технології; електрометалургія; цифровізація виробництва	Підвищення технологічної конкурентної спроможності металургійного підприємства

Продовження таблиці 1

Комплаєнс-компетенцій профільної освіти	Формування комплаєнс-компетентності фахівців у сфері декарбонізації металургійного виробництва	Освітньо-професійні програми, міждисциплінарні курси (ESG, СВAM, екологічне право, вуглецевий менеджмент), цифрові моделі оцінки викидів	Підготовка фахівців, здатних забезпечувати нормативну відповідність, управління вуглецевими ризиками та впровадження низьковуглецевих технологій у металургійному виробництві
Комплаєнс інвестиційного забезпечення	Забезпечення відповідності інвестиційних рішень вимогам декарбонізації та сталого розвитку металургійного виробництва	ESG-критерії відбору інвестицій, СВAM-орієнтований інвестиційний аналіз, комплаєнс-аудит інвестиційних проектів, оцінка вуглецевих ризиків, механізми фінансування «зелених» програм	Спрямування інвестицій у низьковуглецеві технології, зниження регуляторних та вуглецевих ризиків, підвищення інвестиційної привабливості і конкурентоспроможності металургійного виробництва

*\*MRV Облік викидів парникових газів у сучасних металургійних системах здійснюється відповідно до принципів MRV (Monitoring, Reporting, Verification), що передбачають системний моніторинг, звітність і незалежну верифікацію даних про викиди, зокрема у рамках механізмів UNFCCC та регуляторних вимог ЄС.*

*\*\*Supplier due diligence - перевірка постачальників на відповідність правовим, етичним та ESG-вимогам для мінімізації ризиків у ланцюгах постачання].*

*\*\*\*ISO 50002-1:2025. нова редакція стандарту енергетичних аудитів визначає: принципи проведення енергоаудиту; процесні вимоги; структуру та результати аудиту.*

Очікувані результати від впровадження інтегрованої моделі функціоналу комплаєнс-управління в процес декарбонізації металургійного виробництва корелюють з аналізом умов успішної трансформації галузі. Узагальнений ефект моделі комплаєнс-управління декарбонізацією металургійного виробництва визначається інтеграцією наведених в табл. 1 блоків комплаєнс-управління, поєднання ефектів взаємодії яких, забезпечує:

- системно - поступове зниження вуглецевої інтенсивності виробництва;

- підвищення енерго- та ресурсоефективності металургійних процесів;
- відповідність міжнародним ESG-стандартам і кліматичним регуляціям;
- підвищення інвестиційної, експортної стійкості та інноваційної привабливості підприємств.

### **Висновки**

В результаті проведеного дослідження проаналізовано сучасні технологічні та екологічні виклики розвитку металургійних підприємств в умовах декарбонізації галузі, а саме: зниження вуглецевої інтенсивності виробництва, залучення вторинних матеріальних ресурсів, підвищення ресурсної та енергетичної ефективності виробництва, запровадження ESG-орієнтованих підходів до управління, використання цифрових систем моніторингу та комплаєнс-управління технологічними процесами;

Обґрунтовано концептуальну модель інтеграції комплаєнс-управління в системі сталого розвитку металургійного виробництва. Доведено, що інтеграція комплаєнс-функціоналу в систему декарбонізованого розвитку чорної металургії повинна розглядатися не як регуляторний інструмент контролю, а як інженерно-управлінська платформа забезпечення технологічної чистоти, ресурсної замкненості, енергетичної ефективності суттєвого зниження шкідливого впливу сучасних металургійних процесів на довкілля.

Задля підвищення енерго-ресурсної ефективності та зниження вуглецевої інтенсивності металургійних процесів уточнено систему ключових показників оцінки ефективності декарбонізації металургійних процесів, які поєднують технологічні, енергетичні та кліматичні індикатори виробництва.

Визначено основні напрями використання комплаєнс-інструментів, які дозволять контролювати енерго-ресурсну ефективність металургійного виробництва, підвищити прозорість матеріально-енергетичних потоків та здійснювати моніторинг вуглецевої інтенсивності основних етапів наскрізної технологічної схеми виробництва сталі.

Розкрито роль комплаєнс-управління, як інтеграційного механізму, розробки та реалізації інноваційних технологічних рішень із дотриманням сучасних екологічних та регуляторних вимог, що забезпечує формування передумов сталого розвитку металургійних підприємств.

Показано, що інтеграція комплаєнс-управління у процеси декарбонізації дозволяє забезпечити контроль вуглецевого сліду, мінімізувати техногенне навантаження на довкілля та підвищити економічну стійкість підприємств. Обґрунтовано роль удосконалення існуючих технологій у реалізації концепції сталого та еколого-безпечного виробництва.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі пов’язані з поглибленням теоретичних і методичних засад інтеграції функціоналу комплаєнс-управління у систему декарбонізованого розвитку металургійного виробництва: розроблення кількісних методів оцінювання ефективності комплаєнс-функціоналу на основі інтегрованих показників енерго-ресурсної ефективності, вуглецевої інтенсивності та рівня використання вторинних матеріальних і енергетичних ресурсів. При цьому, ключовою ідеєю стає перехід металургійного комплаєнсу від функції контролю до ролі інституційно-технологічної платформи управління декарбонізацією виробництва.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. International Energy Agency (IEA). Iron and Steel Technology Roadmap – Towards more sustainable steelmaking. Paris: IEA, 2020. 187 p. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.
2. Hasanbeigi A. Steel Climate Impact Benchmarking. Global Efficiency Intelligence, 2025., 39 p. URL: <https://www.globalefficiencyintel.com/s/Steel-benchmarking-10102025-E1.pdf>.
3. Hermwille L., S. Lechtenböhm, M. Åhman et al. A Climate Club to Decarbonize the Global Steel Industry. Wuppertal Institute. 2022. Nature Climate Change, 12, 494 - 496. p. DOI: 10.1038/s41558-022-01383-9. URL: [https://dnb.info/1274820367/34?utm\\_source=chatgpt.com](https://dnb.info/1274820367/34?utm_source=chatgpt.com).
4. Goldar A., Md Sarwar Ali, M Kotal et al. Policy Landscape for Transition Towards Carbon Neutral Steel Sector, 2024, 33 p. URL: [https://icrier.org/pdf/pb-33-Green-Steel.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://icrier.org/pdf/pb-33-Green-Steel.pdf?utm_source=chatgpt.com).
5. Кірейцева Г., Виговська О., Хоменко С. Інтегрована модель залучення зелених інвестицій для декарбонізації залізорудної промисловості України. Науковий вісник Вінницької академії безперервної освіти. Серія «Екологія. Публічне управління та адміністрування», Вип. 2 (8), 2025. С. 10-19. DOI: [https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02.4\(2\).pdf](https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02.4(2).pdf).
6. OECD, Global Corporate Sustainability Report. 2025. 94 p. URL: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/10/global-corporate-sustainability-report-2025\\_57b105f2/bc25ce1e-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/10/global-corporate-sustainability-report-2025_57b105f2/bc25ce1e-en.pdf).
7. Методичні рекомендації з оцінки викидів парникових газів та здійснення моніторингу, звітності і верифікації. Київ: Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів України, 2023. 67с. URL: [https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/671\\_Metodychni.pdf](https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/671_Metodychni.pdf).

8. Воротніков В.В., Матвеев К.І., Россінський Ю.М. Система керування технологічними процесами з використанням концепції IoT і технологій штучного інтелекту. *Технічна інженерія*. № 2 (94), 2024. С. 90-103. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-90-103](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-90-103).
9. Цифрова трансформація промислового менеджменту: теорія і практика: монографія / за ред. д. філософ. н., проф. В. Г. Воронкової, д. е. н., проф. Н. Г. Метеленко. Львів: Торунь Liha-Pres, 2023. 816с. URL: <file:///C:/Users/anato/Downloads/0062154.pdf>.
10. Мішалкін А.П., Сокур Ю.І., Камкіна Л.В., Мішалкін В.А. Використання вторинних енергоресурсів при відновлювально-тепловій обробці ряду техногенних відходів. *Системні технології*. №3 (68), 2014. С. 156-162.
11. Мішалкін А.П., Камкіна Л.В., Іващенко В.П. та ін. Аналіз можливостей створення автономної системи енергозабезпечення металургійного виробництва з використанням водневих технологій та фізичного тепла металургійного обладнання. *Теорія і практика металургії*. №4 (149), 2025. С. 50-57. URL: [https://nmetau.edu.ua/file/zh\\_04\\_2025.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh_04_2025.pdf).
12. Traceability: Definition and how to implement it successfully. 2025. URL: [https://www.mecalux.com/blog/traceability?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mecalux.com/blog/traceability?utm_source=chatgpt.com).
13. Material Flow Management. Marian R. Chertow. *Encyclopedia of Energy Reference Work 2004*. URL: [https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and-finance/material-flow-management?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and-finance/material-flow-management?utm_source=chatgpt.com).
14. Guilherme Fortuna, P. Dinis Gaspar. Implementation of Industrial Traceability Systems: A Case Study of a Luxury Metal Pieces Manufacturing Company. *Processes*. 2022, 10(11), <https://doi.org/10.3390/pr10112444> URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/11/2444>.
15. ISO 9000:2015 (en). Quality management systems - Fundamentals and vocabulary. section 3. - Terms and definitions пункт paragraph 3.6.13. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:en>.
16. K. Higuchi, K. Kunitomo, S. Nomura. Reaction Behaviors of Various Agglomerates in Reducing the Temperature of the Thermal Reserve Zone of the Blast Furnace. *SIJ International*, Vol. 60 (2020), No. 11, pp. 2366–2375. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-115>. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/11/60\\_ISIJINT-2020-115/\\_pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/11/60_ISIJINT-2020-115/_pdf?utm_source=chatgpt.com).
17. Naito M., Okamoto A., Yamaguchi K. et. el. Improvement of Blast Furnace Reaction Efficiency by Temperature Control of Thermal Reserve Zone. *Nippon Steel Technical Report*. No. 94 July 2006, p. 103-108. URL: [https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9417.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9417.pdf?utm_source=chatgpt.com).
18. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism. *Official Journal of the European Union*. OJ L 130, 16.05.2023, p. 52–104. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956&utm\\_source=chatgpt.com](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956&utm_source=chatgpt.com).
19. Patisson F., Mirgaux O. Hydrogen Ironmaking: How It Works. *Metals*. 2020, 10(7), 922; <https://doi.org/10.3390/met10070922>. URL: [https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/922?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/922?utm_source=chatgpt.com).
20. Wenqing Xu, Wanjie Cao, Tingyu Zhu et el. Material Flow Analysis of CO2 Emissions from Blast Furnace and Basic Oxygen Furnace Steelmaking Systems in China. *Steel Research International*. September 201586(9). DOI:10.1002/srin.201400228.
21. Strizhenok I A., Bykova M., Korotaeva A. Extractive Industries as a Source of Greenhouse Gas Emissions and the Possibility of its Natural Sequestration under the Climatic Conditions of Central and Northern Eurasia. *Journal of Ecological Engineering*. 2024, 25(5), 43-69. <https://doi.org/10.12911/22998993/185585>.
22. IPCC – 2026. The Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: [https://www.ipcc.ch/about/engage\\_with\\_the\\_ipcc/](https://www.ipcc.ch/about/engage_with_the_ipcc/).

23. Andrew J. Pimm, Tim T. Cockerill, William F. Gale. Energy system requirements of fossil-free steelmaking using hydrogen direct reduction. *Journal of Cleaner Production*. Vol. 312, 20 August 2021, 127665. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127665>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621018837>.
24. Shahabuddin M., Alireza Rahbari, Akbar Rhamdhani M. Process modelling for the production of hydrogen-based direct reduced iron in shaft furnaces using different ore grades. *Ironmaking & Steelmaking*. 2025. Vol. 52(1) 3-16 p. <https://doi.org/10.1177/03019233241254666>.
25. Камкіна Л.В., Мішалкін А.П., Камкін В.Ю., Мянзовська Я.В., Дворковий О. І., Ісаєва Л.Є. Моделювання впливу режиму продування ванни на масообмінні процеси та шлакоутворення у кисневому конвертері. *Теорія і практика металургії*. №1, 2022. С. 27-37.
26. Мішалкін А.П., Камкіна Л.В., Іващенко В.П., Петренко В.А., Мянзовська Я.В., Івченко О.В. Місце винахідництва як складової інтелектуально-фахового потенціалу науковців у вдосконаленні промислових технологій. *Теорія і практика металургії*. №3, 2025. С. 75-87. ISSN 1028-2335 (print). URL: [https://nmetau.edu.ua/file/zh\\_03\\_2025\\_v.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh_03_2025_v.pdf).
27. Мішалкін А.П., Маловік Д.В., Чистяков В.Г., Петренко В.О. Аналіз впливу стабілізації вихідних властивостей агломерату на фізико-хімічні процеси в характерних зонах доменної печі. *Met. lit'e Ukr.*, vol. 33 № 3-4 (342-343), 2025. С. 28-42.
28. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism (Text with EEA relevance). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj>.
29. OECD Due Diligence Guidance for Responsible Business Conduct. Paris: OECD Publishing, 2018., 95 p. URL: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2018/02/oecd-due-diligence-guidance-for-responsible-business-conduct\\_c669bd57/15f5f4b3-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2018/02/oecd-due-diligence-guidance-for-responsible-business-conduct_c669bd57/15f5f4b3-en.pdf).
30. ISO 50002-1:2025. Energy audits. Part 1: General requirements with guidance for use. Edition 1, 2025. URL: [https://www.iso.org/standard/83645.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.iso.org/standard/83645.html?utm_source=chatgpt.com).

## REFERENCES

1. International Energy Agency (IEA). *Iron and Steel Technology Roadmap – Towards more sustainable steelmaking*. Paris: IEA, 2020. 187 p. URL: <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>.
2. Hasanbeigi A. *Steel Climate Impact Benchmarking*. *Global Efficiency Intelligence*, 2025., 39 p. URL: <https://www.globalefficiencyintel.com/s/Steel-benchmarking-10102025-E1.pdf>.
3. Hermwille L., S. Lechtenböhm, M. Åhman et al. A Climate Club to Decarbonize the Global Steel Industry. *Wuppertal Institute*. 2022. *Nature Climate Change*, 12, 494 - 496. p. DOI: 10.1038/s41558-022-01383-9. URL: [https://d-nb.info/1274820367/34?utm\\_source=chatgpt.com](https://d-nb.info/1274820367/34?utm_source=chatgpt.com).
4. Goldar A., Md Sarwar Ali, M Kotal et al. *Policy Landscape for Transition Towards Carbon-Neutral Steel Sector*, 2024, 33 p. URL: [https://icrier.org/pdf/pb-33-Green-Steel.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://icrier.org/pdf/pb-33-Green-Steel.pdf?utm_source=chatgpt.com).
5. Kireitseva H., Vyhovska O., Khomenko S. *Intehrovana model zaluchennia zelenykh investytsii dlia dekarbonizatsii zalizorudnoi promyslovosti Ukrainy*. *Naukovyi visnyk Vinnytskoi akademii bezpererвної osvity. Seriya «Ekolohiia. Publichne upravlinnia ta administruvannia»*, Vyp. 2 (8), 2025. С. 10-19. DOI: [https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02.4\(2\).pdf](https://doi.org/10.32782/2786-5681-2025-2.02.4(2).pdf).
6. OECD, *Global Corporate Sustainability Report*. 2025. 94 p. URL: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/10/global-corporate-sustainability-report-2025\\_57b105f2/bc25ce1e-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2025/10/global-corporate-sustainability-report-2025_57b105f2/bc25ce1e-en.pdf).

7. Metodichni rekomendatsii z otsinky vykydiv parnykovykh haziv ta zdiisnennia monitorynhu, zvitnosti i veryfikatsii. Kyiv: Ministerstvo zakhystu dovkillia ta pryrodnykh resursiv Ukrainy, 2023. 67p. URL: [https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/671\\_Metodichni.pdf](https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/07/671_Metodichni.pdf).
8. Vorotnikov V.V., Matvieiev K.I., Rossynskiy Yu.M. Systema keruvannia tekhnolohichnymy protsesamy z vykorystanniam kontseptsii IoT i tekhnolohii shtuchnoho intelektu. Tekhnichna inzheneriia. № 2 (94), 2024. P. 90-103. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-2\(94\)-90-103](https://doi.org/10.26642/ten-2024-2(94)-90-103)
9. Tsyfrova transformatsiia promyslovoho menezhmentu: teoriia i praktyka: monohrafiia / za red. d. filosof. n., prof. V. H. Voronkovi, d. e. n., prof. N. H. Metelenko. Lviv: Torun Liha-Pres, 2023. 816s. URL: <file:///C:/Users/anato/Downloads/0062154.pdf>
10. Mishalkin A.P., Sokur Yu.I., Kamkina L.V, Mishalkin V.A. Vykorystannia vtorynnykh enerhozabehpochennia pry vidnovliuvanno-teplovii obrobttsi riadu tekhnohennykh vidkhodiv. Systemni tekhnolohii. №3 (68), 2014. P. 156-162.
11. Mishalkin A.P., Kamkina L.V., Ivashchenko V.P. ta in. Analiz mozhlyvostei stvorennia avtonomnoi systemy enerhozabezpechennia metalurhiinoho vyrobnytstva z vykorystanniam vodnevnykh tekhnolohii ta fizychnoho tepla metalurhiinoho obladnannia. Teoriia i praktyka metalurhii. №4 (149), 2025. S. 50-57. URL: [https://nmetau.edu.ua/file/zh\\_04\\_2025.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh_04_2025.pdf).
12. Traceability: Definition and how to implement it successfully. 2025. URL: [https://www.mecalux.com/blog/traceability?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mecalux.com/blog/traceability?utm_source=chatgpt.com).
13. Material Flow Management. Marian R. Chertow. Encyclopedia of Energy Reference Work 2004. URL: [https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and-finance/material-flow-management?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.sciencedirect.com/topics/economics-econometrics-and-finance/material-flow-management?utm_source=chatgpt.com).
14. Guilherme Fortuna, P. Dinis Gaspar. Implementation of Industrial Traceability Systems: A Case Study of a Luxury Metal Pieces Manufacturing Company. Processes. 2022, 10(11), <https://doi.org/10.3390/pr10112444> URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/11/2444>.
15. ISO 9000:2015 (en). Quality management systems - Fundamentals and vocabulary. section 3. - Terms and definitions пункт paragraph 3.6.13. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:en>.
16. K. Higuchi, K. Kunitomo, S. Nomura. Reaction Behaviors of Various Agglomerates in Reducing the Temperature of the Thermal Reserve Zone of the Blast Furnace. SIJ International, Vol. 60 (2020), No. 11, pp. 2366–2375. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2020-115>. URL: [https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/11/60\\_ISIJINT-2020-115/\\_pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.jstage.jst.go.jp/article/isijinternational/60/11/60_ISIJINT-2020-115/_pdf?utm_source=chatgpt.com).
17. Naito M., Okamoto A., Yamaguchi K. et. el. Improvement of Blast Furnace Reaction Efficiency by Temperature Control of Thermal Reserve Zone. Nippon Steel Technical Report. No. 94 July 2006, p. 103-108. URL: [https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9417.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.nipponsteel.com/en/tech/report/nsc/pdf/n9417.pdf?utm_source=chatgpt.com).
18. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a Carbon Border Adjustment Mechanism. Official Journal of the European Union. OJ L 130, 16.05.2023, p. 52–104. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956&utm\\_source=chatgpt.com](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R0956&utm_source=chatgpt.com).
19. Patisson F., Mirgaux O. Hydrogen Ironmaking: How It Works. Metals. 2020, 10(7), 922; <https://doi.org/10.3390/met10070922>. URL: [https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/922?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.mdpi.com/2075-4701/10/7/922?utm_source=chatgpt.com).
20. Wenqing Xu, Wanjie Cao, Tingyu Zhu et el. Material Flow Analysis of CO2 Emissions from Blast Furnace and Basic Oxygen Furnace Steelmaking Systems in China. Steel Research International. September 201586(9). DOI:10.1002/srin.201400228.
21. Strizhenok A., Bykova M., Korotaeva A. Extractive Industries as a Source of Greenhouse Gas Emissions and the Possibility of its Natural Sequestration under the Climatic Conditions of

- Central and Northern Eurasia. Journal of Ecological Engineering. 2024, 25(5), 43-69. <https://doi.org/10.12911/22998993/185585>.
22. IPCC – 2026. The Intergovernmental Panel on Climate Change. URL: [https://www.ipcc.ch/about/engage\\_with\\_the\\_ipcc/](https://www.ipcc.ch/about/engage_with_the_ipcc/).
23. Andrew J. Pimm, Tim T. Cockerill, William F. Gale. Energy system requirements of fossil-free steelmaking using hydrogen direct reduction. Journal of Cleaner Production. Vol. 312, 20 August 2021, 127665. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127665>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621018837>.
24. Shahabuddin M., Alireza Rahbari, Akbar Rhamdhani M. Process modelling for the production of hydrogen-based direct reduced iron in shaft furnaces using different ore grades. Ironmaking & Steelmaking. 2025. Vol. 52(1) 3-16 p. <https://doi.org/10.1177/03019233241254666>.
25. Kamkina L.V., Mishalkin A.P., Kamkin V.Iu., Mianovska Ya.V., Dvorkovyi O. I., Isaieva L.Ie. Modeliuvannia vplyvu rezhymu produvannia vanny na masoobminni protsesy ta shlakoutvorennia u kysnevomu konverteri. Teoriia i praktyka metalurhii. №1, 2022. P. 27-37.
26. Mishalkin A.P., Kamkina L.V., Ivashchenko V.P., Petrenko V.A., Mianovska Ya.V., Ivchenko O.V. Mistse vynakhidnytstva yak skladovoi intelektualno-fakhovoho potentsialu naukovtsiv u vdoskonalenni promyslovykh tekhnolohii. Teoriia i praktyka metalurhii. №3, 2025. S. 75-87. ISSN 1028-2335 (print). URL: [https://nmetau.edu.ua/file/zh\\_03\\_2025\\_v.pdf](https://nmetau.edu.ua/file/zh_03_2025_v.pdf).
27. Mishalkin A.P., Malovik D.V., Chystiakov V.H., Petrenko V.O. Analiz vplyvu stabilizatsii vykhidnykh vlastyvostei ahlomeratu na fizyko-khimichni protsesy v kharakternykh zonakh domennoi pechi. Met. lite Ukr., vol. 33 № 3-4 (342-343), 2025. P. 28-42.
28. Regulation (EU) 2023/956 of the European Parliament and of the Council of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism (Text with EEA relevance). URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/956/oj>.
29. OECD Due Diligence Guidance for Responsible Business Conduct. Paris: OECD Publishing, 2018., 95 p. URL: [https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2018/02/oecd-due-diligence-guidance-for-responsible-business-conduct\\_c669bd57/15f5f4b3-en.pdf](https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2018/02/oecd-due-diligence-guidance-for-responsible-business-conduct_c669bd57/15f5f4b3-en.pdf).
30. ISO 50002-1:2025. Energy audits. Part 1: General requirements with guidance for use. Edition 1, 2025. URL: [https://www.iso.org/standard/83645.html?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.iso.org/standard/83645.html?utm_source=chatgpt.com).

Received 10.03.2026.

Accepted 10.04.2026.

Published 30.04.2026

UDK 669.1:504.06:658.562

A. Mishalkin, V. Petrenko, L. Kamkina, T. Fonarova, A. Selegei

**INTEGRATION OF COMPLIANCE MANAGEMENT FUNCTIONALITY INTO THE  
SYSTEM OF DECARBONIZED DEVELOPMENT OF  
METALLURGICAL PRODUCTION**

***Abstract.** The article identifies the main directions for integrating compliance functionality components into the technological development system of ferrous metallurgy, in line with modern concepts of decarbonization, circular economy, and ESG-oriented management. It examines mechanisms and methods for improving the environmental friendliness of key metallurgical processes through the use of secondary resources (slag, dust, dispersed waste from lime production), the physical heat of production gases, and the chemical energy of CO–H<sub>2</sub> mixtures.*

*Relevance of the study. Given the high energy intensity and significant share of the metallurgical industry in global greenhouse gas emissions, reducing the carbon intensity of production is becoming one of the key factors in ensuring the competitiveness of metallurgical products on the world market, especially in the context of the introduction of carbon emission regulation mechanisms, in particular CBAM.*

*In these conditions, the formation of effective management mechanisms becomes particularly important. One such mechanism capable of ensuring the integration of technological, environmental, and economic aspects of metallurgical production development is compliance management. Its functionality should be viewed as an integrated system for managing the decarbonized development of metallurgy, ensuring the alignment of innovative technological solutions with modern environmental standards, regulatory requirements, and sustainable development principles.*

*The purpose of the work is to substantiate the conceptual foundations for integrating compliance management functionality into the system of decarbonized development of metallurgical production and to determine its role in improving energy and resource efficiency, environmental safety, and technological sustainability of iron and steel smelting processes.*

*To achieve this goal, the following research methods were used: systematic analysis of current trends in the development of metallurgical technologies; methods of structural and functional analysis of production management systems; comparative analysis of energy and resource efficiency indicators and carbon intensity of metallurgical processes;*

*generalization of scientific and technological approaches to the decarbonization of metallurgical production.*

*Research objectives. The following tasks were solved in the work:*

*Analysis of current technological and environmental challenges for the development of metallurgical enterprises in the context of industry decarbonization.*

*Justification of a conceptual model for integrating compliance management into the sustainable development system of metallurgical production.*

*Identification of the main directions for the use of compliance tools to improve energy and resource efficiency and reduce the carbon intensity of metallurgical processes.*

*Assessment of the role of compliance functionality as an integration mechanism for coordinating technological, environmental, and economic parameters of production.*

*The scientific novelty of the results obtained lies in the following.*

*It is proposed to consider the mechanism of a functionally integrated system of compliance control and coordination of production processes, the main component of compliance – assurance as: a system-forming factor based on an institutional and technological platform for management/regulation of the mechanism for ensuring decarbonized development of production, combining technological, environmental, and management tools for ensuring the sustainability of metallurgical processes.*

*Conceptual approaches to the integration of compliance tools into the energy and resource efficiency management system of metallurgical production have been substantiated, which allows for increased transparency of material and energy flows and control of the carbon intensity of the main stages of the end-to-end technological scheme of steel production.*

*The system of key indicators for assessing the effectiveness of decarbonization of metallurgical processes, which combine technological, energy, and climate indicators of production, has been refined.*

*The role of compliance management as an integration mechanism for harmonizing innovative technological solutions with modern environmental and regulatory requirements is revealed, which ensures the formation of prerequisites for the sustainable development of metallurgical enterprises.*

*It is shown that the integration of compliance tools into decarbonization processes allows for carbon footprint control, minimization of man-made environmental impact, and increased economic stability of enterprises. The role of improving existing technologies in the implementation of the concept of sustainable and environmentally safe production is substantiated.*

**Keywords:** *compliance functionality, management, decarbonization of metallurgy, carbon footprint, CO<sub>2</sub> intensity, circular economy, resource conservation and energy efficiency, integration of compliance tools, ESG-oriented management.*

**Мішалкін Анатолій Павлович**, доцент кафедри теоретичних основ металургійних процесів, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0009-0002-7206-1809>

**Петренко Віталій Олександрович**, професор, заслужений діяч науки і техніки України, завідувач кафедри інтелектуальної власності та управління проектами, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

**Камкіна Людмила Володимирівна**, професор, завідувачка кафедри теоретичних основ металургійних процесів, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0002-8329-0917>

**Фонарьова Тетяна Анатоліївна**, доцент кафедри інтелектуальної власності та управління проектами, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0001-7726-6999>

**Селегей Андрій Миколайович**, доцент кафедри інженерії та фундаментальних дисциплін, Український державний університет науки і технологій, <https://orcid.org/0000-0003-3161-5270>

**Mishalkin Anatolii**, associate Professor of the Department of Theoretical Fundamentals of Metallurgical Processes, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0009-0002-7206-1809>

**Petrenko Vitalii**, professor, Head of the Department of Intellectual Property and Project Management, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

**Kamkina Lydmila**, professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0002-8329-0917>

**Fonarova Tetiana**, associate Professor of the Department of Intellectual Property and Project Management, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0001-7726-6999>

**Selegei Andrii**, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Engineering and Fundamental Disciplines, Ukrainian State University of Science and Technology, <https://orcid.org/0000-0003-3161-5270>