

УДК 669.1: 658.26; 621.77: 628.16; 658: 65.012
№ держреєстрації 0123U102947

Товариство з обмеженою відповідальністю
«ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
69008, м. Запоріжжя вул. Південне шосе 80



ЗАТВЕРДЖУЮ

проєктор з науково-дослідної роботи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

_____ Володимир КУХАР
«04» липня 2025 року

ЗВІТ

ПРО НАУКОВО-ДОСЛІДНУ РОБОТУ

«Розвиток наукових та методологічних засад удосконалення металургійних процесів, устаткування та методів управління їх ефективністю»
(остаточний)

Етап 2. Розробка наукових та методологічних рекомендацій з удосконалення технологій, режимів роботи устаткування і підвищення ефективності управління бізнес процесами у чорній металургії

Науковий керівник, д.т.н., професор _____ Володимир КУХАР










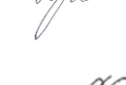





«04» липня 2024 року

2025

Рукопис закінчено «02» липня 2025 року

Результати роботи розглянуто Науково-технічною радою ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», протокол № 12 від «04» липня 2025 року

СПИСОК АВТОРІВ

Керівник НДР, д.т.н., професор		Володимир КУХАР (вступ, розділ 1 та 2, висновки)
Відповідальний виконавець, к.т.н.		Христіна МАЛІЙ (вступ, розділ 1, висновки)
Відповідальний виконавець, к.е.н.		Олександра ХАРЧЕНКО (вступ, розділ 2, висновки)
Виконавець, д.е.н, професор		Ірина ШКРАБАК (вступ, розділ 2)
Виконавець, д.т.н.		Олександр КУРПІЕ (розділ 1)
Виконавець, д.т.н., професор		Едуард ГРИБКОВ (розділ 1 та 2)
Виконавець, д.т.н., доцент		Володимир ПАШИНСЬКИЙ (розділ 1 та 2)
Виконавець, д.т.н., професор		Олексій СМІРНОВ (розділ 1)
Виконавець, д.е.н., професор		Лариса ШАУЛЬСЬКА (розділ 2)
Виконавець, к.т.н., доцент		Олександр СТОЯНОВ (розділ 1)
Виконавець, д.т.н., професор		Костянтин НІЗЯЄВ (розділ 1)
Виконавець, к.т.н., доцент		Євген СИНЕГІН (розділ 1)
Виконавець, к.т.н., доцент		Юрій ДОБРОНОСОВ (розділ 1)
Виконавець, к.т.н., доцент		Максим ШТОДА (розділ 1)
Виконавець		Олександр СПІЧАК (розділ 1)

Виконавець, здобувач
вищої освіти (аспірант)



Ігор НАВОЛЬНСВ
(розділ 1)

Виконавець, здобувач
вищої освіти



Наталія ЧУБ
(розділ 1 а 2)

Виконавець, здобувач
вищої освіти



Данііл ТИМОШЕНКО
(розділ 1 та 2, висновки)

Виконавець, здобувач
вищої освіти



Руслан КРЮКОВ
(розділ 1 та 2)

Виконавець, здобувач
вищої освіти



Олег ЮЗЕФОВИЧ
(розділ 1 та 2)

Виконавець, здобувач
вищої освіти



Андрій ПРИХОДКОВ
(розділ 1 та 2)

Виконавець, здобувач
вищої освіти



Давід БОЖЕНКО
(розділ 2)

Виконавець, здобувач
вищої освіти



Олег БУТУРЛІН
(розділ 2)

Виконавець, здобувач
вищої освіти



Роман ФЕДОРОВ
(розділ 1)

Виконавець, здобувач
вищої освіти



Ігор КИРИЧЕНКО
(розділ 1)

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 95 стор., 111 джерел, 16 рис., 5 табл.

У науковому звіті представлено міждисциплінарне дослідження, присвячене розробці, обґрунтуванню та апробації інноваційних технічних і організаційно-управлінських рішень, спрямованих на підвищення ресурсної, енергетичної та екологічної ефективності металургійного виробництва в умовах післявоєнного відновлення економіки України. Основною метою дослідження є інтеграція сучасних технологій переробки відходів, цифрових інструментів моніторингу та систем управління ефективністю на базі Business Performance Management (BPM), а також впровадження кластерного підходу до створення водневої металургії, орієнтованої на вимоги декарбонізації та відповідності стандартам СВМ.

У першому тематичному блоці розглянуто можливості використання малогабаритних доменних печей (МДП) як ефективного засобу комплексної переробки металургійних і вуглезбагачувальних відходів. Доведено, що малогабаритні доменні печі об'ємом до 1000 м³, зокрема типу MBF і Micro BF, є придатними для стабільної генерації до 100 тис. тонн передільного чавуну на рік. У роботі акцентовано увагу на технології виробництва безобпалювальних вуглецевмісних окатишів зі шламів і пилу. Ці окатиші, на відміну від традиційних агломератів, виготовляються методом холодного формування, що не потребує значних енергетичних витрат на випал, завдяки чому досягається зниження загальних енергетичних витрат на 20–25%. Важливою перевагою є можливість утилізації до 200 тис. т металургійних і до 40 тис. т вуглезбагачувальних відходів щороку, що особливо актуально в умовах післявоєнного накопичення техногенних залишків.

Комплексна енергоефективність таких систем досягається через утилізацію доменного газу, який використовується для генерації електроенергії (до 1,5 МВт) та забезпечення технологічних процесів. Запропонована концепція дозволяє

створювати локальні замкнені цикли утилізації та генерації енергії. Однак дослідження також підкреслює наявність проблем, пов'язаних зі значною варіативністю складу залізовмісних відходів, що потребує вдосконалення логістики, стандартизації процесів підготовки сировини та стабілізації джерел постачання. На основі техніко-економічного моделювання підтверджено, що експлуатаційний цикл таких печей становить 15–20 років за умови забезпечення стабільної сировинної бази.

Другий тематичний напрям охоплює загальносистемні аспекти реінжинірингу виробництва відповідно до вимог зеленої металургії. Традиційні методи металургійного виробництва — насамперед аглодоменний цикл із подальшим мартенівським або кисневоконвертерним переділом — характеризуються надзвичайно високим вуглецевим слідом. Так, сумарні викиди CO₂ можуть сягати до 2390 кг/т сталі, не враховуючи інші шкідливі компоненти (CO, SO₂, NO_x, пил), що унеможливує відповідність новим європейським стандартам. У зв'язку з цим необхідною умовою трансформації є перехід до більш стійких технологій, зокрема використання DRI (прямо відновленого заліза), електродугових печей (ЕДП) та альтернативних відновників (наприклад, водню).

Реінжиніринг металургійних виробництв передбачає повну технологічну, енергетичну, екологічну та організаційну трансформацію. У звіті обґрунтовано чотири ключові напрями: (1) технологічна модернізація з використанням енергоефективних рішень (Midrex, HYL, Fastmet, Energiron), (2) інтеграція цифрових рішень для моніторингу та управління, (3) формування циркулярної економіки шляхом повторного використання відходів та шламів, (4) розвиток міжгалузевої кооперації у межах кластерного підходу. Особливу увагу приділено ролі гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК) у постачанні залізорудної сировини, придатної до використання в DRI-технологіях із низьким вмістом фосфору та сірки.

Третій напрям дослідження пов'язаний із цифровим моделюванням фізико-хімічних параметрів технологічних рідин. У рамках роботи розроблено та

апробовано математичні моделі зміни концентрації емульсолів і механічних домішок у процесах холодної прокатки. На основі експериментальних даних, зібраних у промислових умовах (ПАТ «Запоріжсталь»), проведено апроксимацію даних за допомогою квадратичних і експоненційних моделей. Найвища точність спостерігається при використанні поліноміальних залежностей другого порядку з коефіцієнтом детермінації $R^2 > 0,88$. Моделювання виконано в середовищі MATLAB, що забезпечило зручну візуалізацію та автоматизовану обробку великого масиву даних. Аналіз виявив критичні зони зростання вмісту механічних домішок, що корелюють із порушеннями стабільності змащення та зниженням якості холоднокатаного прокату. Отримані результати можуть бути використані для побудови предиктивних моделей контролю параметрів мастильно-охолоджувальних рідин у режимі реального часу.

Четвертий блок стосується впровадження систем Business Performance Management (BPM) у металургійну галузь. У звіті проаналізовано специфіку галузі: високий рівень капіталомісткості, технологічна інерційність, багаторівневість управлінських структур, що ускладнює адаптацію традиційних підходів до управління. Обґрунтовано ефективність BPM як інструменту, що дозволяє забезпечити узгодженість між стратегічними та операційними цілями, скоротити цикл ухвалення управлінських рішень, підвищити прозорість та підзвітність. Застосування КРІ/ОКР у поєднанні з цифровими дашбордами дозволяє візуалізувати результати, здійснювати коригувальний контроль та формувати культуру відповідальності. У межах дослідження представлено досвід впровадження BPM у Групі Метінвест, зокрема в рамках трирівневої моделі — від діагностики до повної інтеграції.

П'ятий ключовий блок присвячений концепції водневої металургії в контексті кластерного підходу. Аналіз сучасних трендів показує, що саме кластеризація є оптимальною моделлю для формування водневої інфраструктури — завдяки ефекту масштабу, централізованому управлінню водневими мережами,

зниженню логістичних витрат і концентрації інвестицій. У дослідженні запропоновано базову архітектуру водневого кластеру на базі активів Групи Метінвест у Запоріжжі, Кам'янському та Кривому Розі. Розглянуто три сценарії впровадження (базовий, оптимальний, інноваційний) з оцінкою інвестицій, термінів окупності (8–10 років), потенційного зменшення викидів CO₂ (до 70%) та ризиків, пов'язаних із воєнною ситуацією. Десятирічна програма розвитку передбачає поступову інтеграцію ВДЕ, використання DRI, водневих печей та спеціалізованої трубопровідної інфраструктури для транспортування H₂. Результати можуть бути покладені в основу державних стратегій декарбонізації, програм ЄС і залучення зеленого фінансування.

Загалом, звіт об'єднує інженерні, екологічні, управлінські та цифрові аспекти розвитку сучасної металургії, пропонуючи цілісну рамку для модернізації галузі в Україні. Результати дослідження мають прикладне значення, придатні для впровадження на рівні виробничих підприємств, урядових програм і міжнародних партнерств.

Ключові слова:

МЕТАЛУРГІЙНІ ВІДХОДИ; МАЛОГАБАРИТНІ ДОМЕННІ ПЕЧІ; ВУГЛЕЦЕВМІСНІ ОКАТИШІ; ХОЛОДНЕ ФОРМУВАННЯ; УТИЛІЗАЦІЯ ДОМЕННОГО ГАЗУ; ЗЕЛЕНА МЕТАЛУРГІЯ; DRI; СВAM; РЕІНЖИНІРИНГ ВИРОБНИЦТВА; БІЗНЕС-МОДЕЛІ; ЦИФРОВА ТРАНСФОРМАЦІЯ; ВОДНЕВІ КЛАСТЕРИ; METINVEST; ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ; СИСТЕМИ ВРМ; УПРАВЛІНСЬКА ЕФЕКТИВНІСТЬ; ПРОКАТКА; ЕМУЛЬСОЛІ; МОДЕЛЮВАННЯ В МАТЛАВ; СТАЛИЙ РОЗВИТОК.

Мета роботи – розробка та обґрунтування інноваційних технологічних, енергетичних і управлінських рішень для підвищення ресурсоефективності,

енергоощадності, екологічної безпеки та гнучкості управління на підприємствах чорної металургії в умовах післявоєнної реконструкції та адаптації до вимог ЄС.

Об'єкт дослідження – технології переробки залізовмісних відходів, збагачення та обробки сталі, а також цифрові та організаційні інструменти управління ефективністю у металургійному виробництві, включно з кластеризацією, цифровізацією, управлінням викидами та водневою трансформацією металургії.

Предмет(и) дослідження:

- енерго- та ресурсоемність альтернативних способів переробки залізовмісної сировини (MBF, DRI, ЕДП);
- ефективність утилізації техногенних відходів у малогабаритних доменних печах;
- емісійний профіль різних схем виробництва сталі з урахуванням СВАМ;
- якість металопродукції при різних режимах прокатки та складі мастильно-охолоджувальних рідин;
- цифрові моделі для прогнозування зміни параметрів емульсолів;
- структура, інструменти та етапи впровадження Business Performance Management (BPM);
- проектування водневих кластерів для декарбонізації металургії.

Результати та їх новизна:

– Вперше для умов післявоєнного розвитку України комплексно обґрунтовано доцільність застосування малогабаритних доменних печей з холодноформованими окатишами з відходів для стабільного виробництва передільного чавуну з повною утилізацією доменного газу.

– Встановлено, що при виробництві чавуну у печах об'ємом 70–100 м³ із застосуванням безобпалювальних окатишів забезпечується річна утилізація до 200 тис. тонн металургійних відходів із питомим споживанням електроенергії до 31 кВт·год/т та води – до 0,23 м³/т.

– Побудовано математичні моделі (у середовищі MATLAB) зміни концентрації емульсій і домішок при прокатці, з точністю до $R^2 = 0,886$, що дозволяє оптимізувати режими обслуговування змащувальних систем.

– Визначено критичні концентрації емульсолу (2,3–4,2%) для підтримання низького рівня механічних домішок (менше 0,05%) у реверсивному і тандем-прокаті.

– Обґрунтовано модель реалізації систем BPM з адаптацією до металургії: включає етапи оцінки готовності, впровадження KPI/OKR, цифрових панелей управління, формування систем зворотного зв'язку.

– Визначено фактори середовища (енергетичні, логістичні, регуляторні), що актуалізують потребу в управлінських змінах; сформульовано матрицю впливу бар'єрів та драйверів впровадження BPM.

– Розроблено кластерну модель декарбонізації виробництва з опорою на водень, з урахуванням геоінфраструктури активів Групи Метінвест, оцінено її економічну доцільність, сценарії впровадження та ключові ризики.

– Результати дослідження можуть бути використані як на рівні підприємств, так і при формуванні державних стратегій відновлення і трансформації металургії України в рамках “зеленого переходу” та відповідності СВAM.

Інформація щодо впровадження: Результати дослідження впроваджено в навчальний процес ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» за спеціальностями 136/G10 «Металургія» та 073 «Менеджмент». Матеріали звіту використовуються у бакалаврських, магістерських та аспірантських (доктор філософії) освітніх програмах:

– ОПП «Металургія чорних металів» при викладанні освітніх компонентів: «Основи металургійних технологій», «Підготовка металургійної сировини», «Шихтові та вогнетривкі матеріали металургійного виробництва», «Металургійні агрегати та обладнання», «Металургія чавуну», «Металургія сталі», «Електрометалургія сталі», «Проектування металургійних цехів», «Енерго- та

ресурсозберігальні технології в промисловості»; «Інноваційні процеси металургійного виробництва», «Прокатне виробництво у чорній металургії»;

– *ОПП «Металургія сталі»*: «Проектний менеджмент», «Рециклінгові технології та підвищення енергоефективності виробництва сталі», «Диджиталізація металургійного виробництва», «Дослідження у проєктах підвищення операційної ефективності», «Наукові основи поєднання процесів лиття та прокатки», «Технологія сортопрокатного та листопрокатного виробництва», «Теоретичні основи водневої металургії і напрямки декарбонізації сталеплавильного виробництва»;

– *ОПП «Аглодоменне виробництво»*: «Ресурсозаощаджувальні технології та рециклінг в аглодоменному виробництві», «Проектний менеджмент», «Перспективи розвитку металургії та позадоменне отримання заліза», «Сучасні технології формування структури та властивостей матеріалів та продукції»;

– *ОПП «Сучасні технології прокатного виробництва»*: «Сучасні техніко-технологічні аспекти прокатного виробництва», «Дослідження у проєктах підвищення операційної ефективності», «Теорія та практика прокатного виробництва», «Моделювання та комп'ютерні технології в прокатному виробництві», «Сучасні технології формування структури та властивостей матеріалів та продукції», «Управління проєктами розвитку прокатного виробництва», «Спеціальні прокатні стани»;

– *Міждисциплінарна освітньо-наукова програма (ОНП) 136+073 «Управління модернізацією металургії»*: «R&D в управлінні металургійними проєктами», «Перспективні технології та кращі практики модернізації металургії», «Управління комунікаціями в проєктах модернізації металургії», «Проектування модернізованих металургійних виробництв», «Економічний та управлінський аналіз і реінжиніринг бізнес-процесів металургійних підприємств», «Інфраструктура металургії», «Наукові основи розвитку кластерів чорної металургії та операційне вдосконалення

виробництв», «Стратегічний розвиток та проєктний менеджмент», «Вартісне управління бізнесом: дослідження та практика»;

– ОПП *«Проєктне управління змінами у гірничо-металургійному бізнесі»*: «R&D проєкт», «Стратегічний менеджмент», «Управління операційною ефективністю промислових корпоративних структур», «Проєктний менеджмент», «Управління змінами в гірничо-металургійному бізнесі»;

– ОПП *«Вартісне управління бізнесом»*: «Прийняття управлінських рішень», «Операційний менеджмент», «Міждисциплінарний дослідницький проєкт», «Оцінка вартості та управління ефективністю бізнесу», «Управління конкурентоспроможністю», «Управління потенціалом підприємства»;

– *Освітньо-наукова програма третього рівня вищої освіти за спеціальністю 136 «Металургія» для здобуття ступеня доктора філософії*: «Концептуальні основи наукового світогляду та методологія наукових досліджень», «Управління науково-дослідними та інноваційними проєктами», «Стратегічні напрямки досліджень та кращі практики в металургії», «Експериментальні дослідження фізико-хімічних процесів в металургії», «Математичне та комп'ютерне моделювання в металургії».

Зв'язок з іншими роботами: Дослідження є логічним продовженням наукових робіт:

– НДР № 0223U003877 «Керуванням показниками енергозбереження металургійних агрегатів та якості металопродукції на завершальних переділах металургійного циклу»;

– НДР № 0223U003910 «Прикладні аспекти трансформації бізнес-процесів гірничо-металургійних компаній на засадах Performance Management»;

– НДР № 0123U102947 «Розвиток наукових та методологічних засад удосконалення металургійних процесів, устаткування та методів управління їх ефективністю» (проміжна). Етап 1. Удосконалення процесів та режимів роботи устаткування на етапах виготовлення металопродукції, оптимізація управління

виробництвом та організаційними змінами підприємств чорної металургії на засадах Business Performance Management .

Рекомендації щодо використання: Отримані результати можуть бути рекомендовані:

– для практичного впровадження на підприємствах гірничо-металургійного комплексу при модернізації виробничих процесів, створенні установок для переробки залізовмісних відходів у малогабаритних доменних печах;

– при створенні або трансформації систем управління (BPM) у великих промислових компаніях;

– у державних програмах розвитку водневої економіки та декарбонізації важкої промисловості;

– у навчальному процесі технічних університетів як приклади інноваційних та адаптивних технологічних і управлінських рішень.

Сфера застосування: Металургійні підприємства та інжинірингові компанії, галузеві наукові установи, бізнес-підрозділи управління інвестиційними, технічними та інноваційними проєктами, освітні програми з металургії, управління, машинобудування та промислової екології.

Економічна та соціально-економічна ефективність:

– *Економічна ефективність* визначається зниженням питомого споживання енергоносіїв та води у процесах виробництва чавуну з відходів, зменшенням викидів парникових газів (до 4–5 разів у порівнянні з класичними схемами), скороченням витрат на змащувальні матеріали та технічне обслуговування.

– *Соціально-економічна ефективність* проявляється у створенні нових екологічних виробництв, які відповідають вимогам СВМ, підвищенні інвестиційної привабливості сектору, створенні високотехнологічних робочих місць та залученні української металургії до глобальних водневих та цифрових ініціатив.

Значимість роботи: Результати дослідження сприяють формуванню довгострокової стратегії трансформації металургійної галузі в умовах післявоєнного відновлення. Практична реалізація рішень дає змогу не лише забезпечити сталий розвиток, а й адаптувати вітчизняну промисловість до вимог міжнародних ринків і стандартів.

Висновки та пропозиції щодо розвитку об'єкта дослідження і доцільності продовження досліджень: Показано доцільність подальшого вивчення та масштабування малогабаритних доменних комплексів для переробки техногенних відходів, з урахуванням енергетичних обмежень та структури вторинної сировини. Також доцільним є подальший розвиток напрямів, пов'язаних з математичним моделюванням процесів охолодження та забруднення прокатних емульсій, а також удосконаленням технологій їх очищення з метою підвищення ефективності та стабільності холодної прокатки в умовах промислової експлуатації. У сфері управління рекомендовано продовжити дослідження цифрових моделей ВРМ у поєднанні з інструментами AI-аналітики та ризик-менеджменту. В рамках формування водневих кластерів – актуальним є створення галузевої стратегії пілотного впровадження на діючих об'єктах із урахуванням логістичної, військової та енергетичної безпеки.

Тематика відповідає п. 2 і п. 4 Закону України «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки».

Умови одержання звіту: Повний звіт доступний за письмовим запитом у виконавця НДР. Матеріали дослідження є результатом колективної роботи, частково імплементовані в опублікованих наукових статтях і тезах конференцій, доступних через бібліометричні бази даних та інституційні ресурси.

ЗМІСТ

№№	Стор.
ВСТУП.....	16
<p>РОЗДІЛ 1. ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ТА РЕСУРСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА..</p>	
1.1 Інтегрована переробка відходів металургійного та вуглезбагачувального виробництва з використанням малогабаритних доменних печей	18
1.2 Порівняльний аналіз екологічної ефективності металургійних технологій виробництва сталі в контексті “зеленого” переходу.....	26
1.3 Розробка математичних моделей змін концентрації емульсій та вмісту механічних домішок у технологічних рідинах з використанням пакету Matlab для обробки експериментальних даних.....	35
1.4 Висновки до розділу 1.....	47
<p>РОЗДІЛ 2. УПРАВЛІННЯ ТРАНСФОРМАЦІЄЮ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ: ВПРОВАДЖЕННЯ BUSINESS PERFORMANCE MANAGEMENT ТА КЛАСТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВІ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....</p>	
2.1 Впровадження Business Performance Management у чорній металургії: концепція, бар’єри, цифрова інтеграція та приклад Групи Metinvest.....	49

2.2	Організаційні засади впровадження металургійних кластерів та відновлення промислового потенціалу України на основі розвитку водневих технологій.....	64
2.3	Висновки до розділу 2.....	73
	ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	75
	ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	77
	Додаток. ВІДОМОСТІ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ.....	94

ВСТУП

Сучасний розвиток металургії в Україні відбувається в умовах потужного геополітичного, економічного та технологічного тиску. З одного боку, країна змушена відновлювати свій промисловий потенціал після масштабних руйнувань, завданих військовою агресією. З іншого – вступає у фазу глобального енергетичного переходу та декарбонізації, які вимагають радикальної модернізації технологічних основ чорної металургії. Відповідно, виникає необхідність комплексного переосмислення як техніко-технологічних рішень на рівні виробництва сталі, так і організаційно-управлінських моделей в умовах жорстких вимог до ефективності, гнучкості та екологічності.

Особливої актуальності набувають напрями зеленої металургії, серед яких провідне місце займає перехід від аглодоменого циклу до технологій прямого відновлення заліза (DRI), зокрема на основі використання водню як відновника. Застосування процесу Midrex H₂ у поєднанні з дуговими сталеплавильними печами відкриває перспективи для створення нових енергоефективних виробництв з низьким вуглецевим слідом. Разом із цим постають нові виклики – високі питомі енерговитрати на стадії плавки, значна вартість «зеленого» водню та обмеження інфраструктури, які потребують детального інжинірингового, економічного та логістичного обґрунтування.

Важливою ланкою трансформації є розвиток технологій рециклінгу та повторного використання відходів металургійного і вуглезабагачувального виробництва. Дослідження можливостей малогабаритних доменних комплексів показують, що їхнє впровадження здатне забезпечити локальну утилізацію техногенних ресурсів із виробництвом металу, генерацією енергії та мінімальним екологічним навантаженням. Особливу цінність становить можливість використання шламів і дрібнодисперсних матеріалів для виготовлення холодноспечених вуглецевмісних окатишів. У результаті створюється модель

циркулярної мікрOMETалургії, яка може бути інтегрована в регіони з обмеженим доступом до великих виробничих потужностей.

Паралельно з технічними інноваціями, актуальним залишається вдосконалення процесів обробки сталі. У зв'язку з цим проведено моделювання та математичну оцінку динаміки зміни концентрації емульсій та механічних домішок у прокатних рідинах на прикладі реального виробництва. Це дозволило створити засоби цифрового моніторингу стабільності технологічного процесу, що є критично важливим для забезпечення якості прокату в умовах холодної деформації.

Реалізація інноваційних проєктів вимагає не лише технологічного, а й управлінського перезавантаження. В цьому контексті запропоновано адаптивну модель впровадження системи Business Performance Management (BPM) для металургійних підприємств. Ця модель враховує етапність змін, цифрову трансформацію управління, впровадження KPI/OKR, використання ВІ-платформ та гнучке налаштування корпоративної структури. На прикладі досвіду Групи «Метінвест» показано ефективність цієї парадигми для підвищення операційної стійкості та швидкості управлінських рішень.

Стратегічним напрямом, що об'єднує зазначені вектори розвитку, є формування водневих кластерів на базі активів українських металургійних компаній. Ці кластери здатні забезпечити синергію між виробництвом водню, металургією, енергетикою та логістикою. У звіті подано техніко-економічне обґрунтування можливих сценаріїв створення таких кластерів, а також враховано ризики, пов'язані з безпекою, воєнною інфраструктурою, окупністю проєктів і необхідністю державної підтримки.

Таким чином, у звіті систематизовано результати міждисциплінарних досліджень, що охоплюють як технологічні, так і організаційно-економічні аспекти металургійного виробництва та бізнесу. Робота ґрунтується на практичному досвіді, промислових кейсах і розроблених математичних моделях. Отримані результати можуть слугувати основою для проєктування нових і модернізації діючих виробництв, оптимізації процесів та підвищення енергоефективності.

РОЗДІЛ 1

ІННОВАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА ЦИФРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОЇ ТА РЕСУРСНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ МЕТАЛУРГІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1 Інтегрована переробка відходів металургійного та вуглезбагачувального виробництва з використанням малогабаритних доменних печей

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. Розвиток металургійних та переробних технологій, особливо міні- та мікродоменних печей, претендує стати ключовим фактором при відновленні післявоєнної промисловості. В умовах значного накопичення металевого брухту різної консистенції, який залишився після бойових дій, ці технології надають можливість ефективної переробки відходів і повторного використання сировини. Малогабаритні доменні печі є ідеальними для гнучкої переробки як промислового брухту, так і залишків металів, забезпечуючи зниження витрат і енергоефективність в умовах обмежених ресурсів. Протягом останніх тридцяти-сорока років розвиток технологій доменної плавки суттєво вплинув на створення великих і високопродуктивних агрегатів. Як зазначено в роботах [1, 2], у світі збудовано понад 40 доменних печей з корисним об'ємом понад 4000 м³: серед них шість установок в Китаї, Японії, Індії та Європі, а також чотири в країнах пострадянського простору. В результаті цього старіші та менш об'ємні печі на металургійних комбінатах були замінені на сучасніші великі агрегати. Хоча збільшення масштабів виробництва залишається основою понад 70% світового виробництва чавуну і сталі, починаючи з 1990-х років, малогабаритні доменні печі з об'ємом до 1000 м³ почали знову використовуватися у металургії.

Аналіз досліджень та публікацій. Відповідно до прийнятих підходів до

визначення доменної печі за розмірами [3, 4], малогабаритні доменні печі діляться на три категорії (табл. 1.1). Кожна з них зайняла своє місце на ринку. Особливо помітне збільшення виробництва сталі на міні-металургійних заводах за останні три десятиліття, що сприяло впровадженню інноваційних технологій.

Таблиця 1.1 – Систематизація доменних печей за об'ємом [3, 4]

Вид агрегату та міжнародне скорочене позначення	Корисний об'єм, м ³	Продуктивність, т/добу
Компактна ДП (CBF – Compact Blast Furnace)	500...1000	1000...2000
Мала або міні ДП (МДП) (MBF – Mini Blast Furnace)	100...500	300...1000
Мікро ДП (Micro Blast Furnace)	До 100	Менше 300

До основних результатів цієї політики відносяться:

По-перше, виробництво електросталі було розширено до сортаменту, який раніше випускався лише в кисневих конвертерах, що дозволило замінити їх [5, 6].

По-друге, освоєння випуску тонколистової сталі, зокрема автомобільного листа, сприяло використанню в дугових печах рідкого чавуну, заліза прямого відновлення та інших первинних матеріалів [7].

У цьому контексті печі типу CBF (див. табл. 1.1) успішно інтегрувалися в виробничі процеси на малих металургійних заводах [8]. Значні капіталовкладення, які раніше були необхідні для традиційних доменних печей, були скорочені завдяки застосуванню модульної конструкції, яка дозволяє зручно розміщувати й з'єднувати їх у загальну технологічну лінію. Це стосується таких компонентів, як повітрянагрівачі, склади для сировини, а також інші важливі вузли та елементи.

Печі серії MBF (див. табл. 1.1) на сьогодні використовуються в рамках двох стратегій, що передбачають гнучке використання сировини [3, 4]. Перша стратегія орієнтована на виробництво передільного чавуну з кускової руди (агломерату),

вміст заліза в якій становить 65,0...66,0%. Також використовуються окатиші та брикети, а для спалювання — деревне вугілля або кам'яновугільний кокс. Найпопулярнішими є печі з об'ємами 135, 150, 215, 300 і 350 м³, які здатні виробляти від 100 до 250 тисяч тон чавуну щорічно. Комплекси, що містять кілька таких печей, можуть забезпечити стабільне й економічне постачання чавуну для міні-металургійних підприємств.

Альтернативна стратегія передбачає використання малогабаритних доменних печей серії MBF для обробки нетрадиційних відходів, не обмежуючись лише металевим брухтом або відходами чорних металів [3, 4]. До таких відходів можна віднести пластикові матеріали, а також шлами, що утворюються у процесах гальванічного виробництва. Упродовж останніх двох десятиліть було досягнуто значного прогресу в технологіях введення дрібнодисперсних матеріалів у доменні печі. Сюди входять, наприклад, пил рукавних фільтрів, колошниковий пил та інші вторинні ресурси, а також використання ільменіту та синтетичних матеріалів, зокрема рутиліту, що містять титан.

Малогабаритні доменні печі, відомі як Micro Blast Furnace (MBF), хоча й мають певні обмеження у продуктивності, мають важливу перевагу — невелику робочу висоту (до 10...12 метрів). Це робить їх придатними для ефективної переробки дрібнодисперсних металургійних відходів, попередньо компактованих у вигляді окатишів або брикетів, а в деяких випадках — агломерату [9, 10]. Для створення стійких брикетів зазвичай використовують такі зв'язувальні матеріали, як цемент, рідке скло (сілікат натрію), меласу та інші сполуки.

Використання зв'язувальних компонентів відкриває можливості для більш комплексної переробки оксидних залізовмісних відходів разом із відходами вуглецевого багатства. Цей процес починається з компактування відходів у вуглецевмісні окатиші або брикети [11, 12]. Однією з ключових переваг використання такої порошкової суміші є поступове нагрівання шихти під час її опускання. За температури близько 1000°C у брикетах починає відбуватися процес прямого

відновлення заліза завдяки реакції оксидів заліза з відновлювальним газом CO. Це явище, відоме як "самовідновлення", дозволяє розплавити залізо та додаткові металовмісні компоненти в зоні плавлення [13, 14]. Найбільш активна ця реакція при температурі приблизно 1400 °C [15].

Проведені дослідження показують, що малогабаритні доменні печі мають великий потенціал для використання у таких промислових регіонах світу, як Пенсільванія (США), Південний Уельс (Велика Британія), Лотарингія (Франція) і Верхня Сілезія (Польща), де спостерігається значне скупчення металургійних відходів, що можуть бути успішно перероблені.

Формулювання цілей статті. Метою цього дослідження є оцінка ефективності технології використання малогабаритної доменної печі для комплексної переробки відходів, що утворюються у процесах металургійного виробництва та збагачення вугілля.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилося в умовах комплексу, який використовує шлами з відстійників вуглезбагачення (до 20%) і металургійного виробництва (до 80%). Комплекс оснащений доменною піччю малого об'єму з корисним об'ємом 70 м³, що було надано китайським постачальником. Метою комплексу є випуск продукції у вигляді передільного чавуну, гранульованого шлаку та виробництво електроенергії. Технологічна схема комплексу подана на рисунку.

Проектна потужність комплексу передбачає переробку до 200 тис. тон металургійних відходів і до 40 тис. тон відходів вуглезбагачення щорічно. При цьому запланований випуск передільного чавуну становить 100 тис. тон на рік, а гранульованого шлаку — 60 тис. тон.

З урахуванням обсягів накопичених відходів у вищезазначених регіонах, робота комплексу може забезпечити стабільне постачання сировини протягом 15...20 років. Модульна структура комплексу дозволяє швидко та недорого

здійснювати його демонтаж, монтаж і переміщення в інші регіони, що значно зменшує витрати на транспортування сировини.

До складу комплексу входять такі ділянки (див. рис. 1.1):

- ділянка підготовки сировини, рудний двір, склад готової продукції, резервний склад сировини;
- ділянка виробництва безобпалювальних вуглецевмісних окатишів;
- плавильна ділянка з доменною піччю малого об'єму на 70 м³;
- ділянка розливу та грануляції доменного шлаку;
- енергетичний блок.

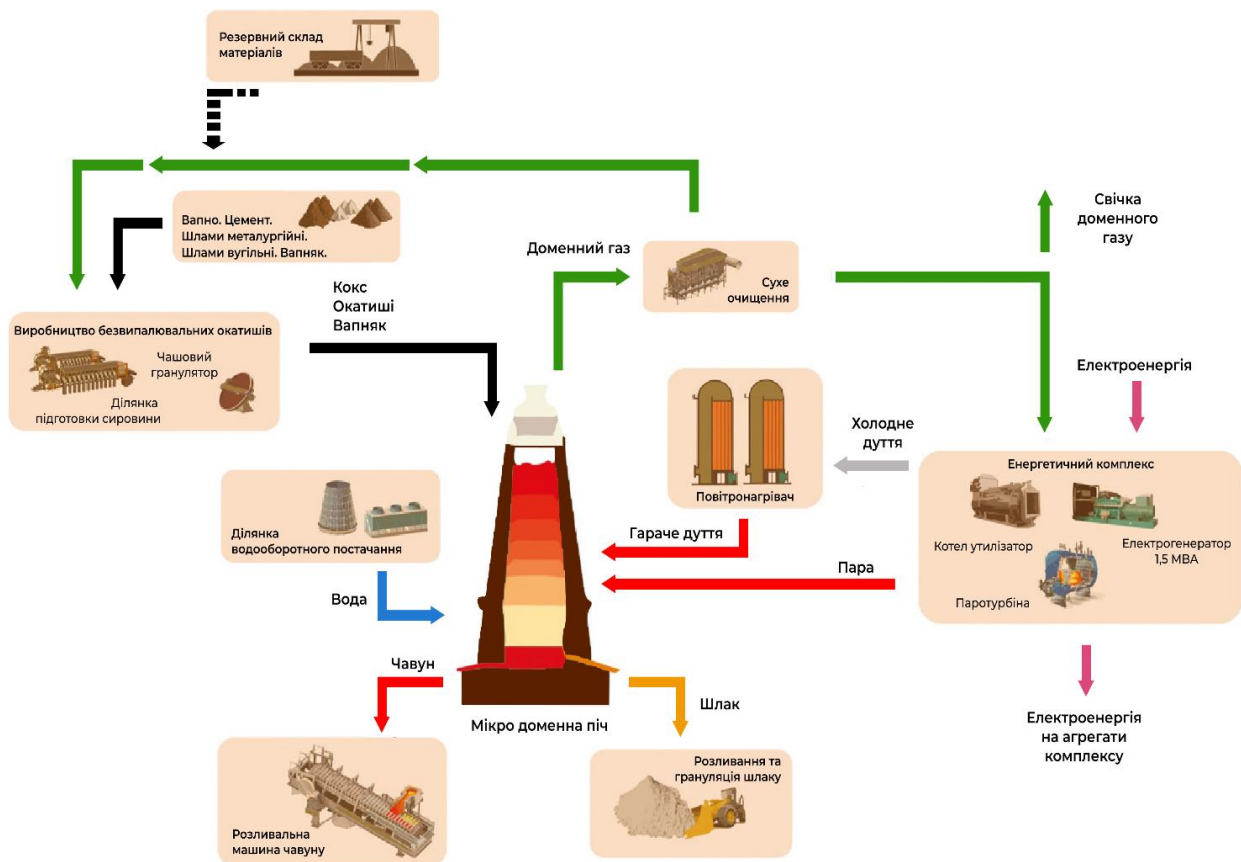


Рисунок 1.1 – Технологічна схема комплексу з утилізації шламів вуглезбагачення та металургійного виробництва з використанням малогабаритної доменної печі

Цей комплекс відзначається кількома енергоощадними технологічними особливостями.

По-перше, випуск рідкого чавуну відбувається безпосередньо до машини розливу за допомогою системи жолобів, що усуває необхідність транспортування ківшами.

По-друге, переміщення матеріалів у межах комплексу виконується автомобільним транспортом, зокрема, навантажувачами. Залізничний транспорт використовується лише для доставки вихідної сировини.

По-третє, споживання зовнішніх енергоресурсів або виключено (при використанні природного газу та електроенергії), або мінімізовано (при використанні технічної води для підживлення систем). Наявність енергетичного блоку, що включає котел-утилізатор доменного газу, парову турбіну та електрогенератор потужністю 1,5 МВт із замкнутим циклом водопостачання, дозволяє знизити споживання зовнішньої енергії. Відхідні гази з теплотворною здатністю 3,6...4,6 МДж/м³ використовуються для виробництва електроенергії. Генерована електрика спрямовується на забезпечення роботи всіх механізмів і систем комплексу, освітлення та обігрів будівель. Крім того, продукти згоряння після турбіни використовуються на ділянці сушки вуглецевмісних окатишів.

Впроваджена система замкнутого водопостачання передбачає очищення, охолодження та спеціальну обробку води реагентами, що запобігають утворенню накипу, корозії та біологічному обростанню поверхонь. У нормальних умовах технологічного процесу вода не скидається у водойми, а для підтримання постійного рівня її періодично поповнюють.

Попередні лабораторні випробування технології виробництва вуглецевмісних окатишів проводилися з використанням обладнання: лабораторного дискового подрібнювача ЛДІ-65, ситового аналізатора АСВ-30, лабораторного окатишувача та електричної печі ТК.20.1300.Ш.3Ф. Міцність окатишів перевіряли за допомогою преса ПРГ-1-10.

Випробування показали, що стабільна робота технологічного процесу виготовлення вуглецевмісних окатишів досягалася, коли їх склад відповідав даним табл. 1.2, з урахуванням специфіки сировини (тип шламу, фракційний склад, вологість тощо).

Подальша експлуатація малогабаритної доменної печі підтвердила ефективність прийнятого рішення. Усереднені за три місяці витрати сировини та енергоносіїв на виробництво 1 тони чавун у наведені в табл. 1.3.

Таблиця 1.2 – Усереднені витрати сировини на виготовлення 1 т вуглецевмісних окатишів

Вид сировини або відходів	Обсяг, т
Залізовмісні відходи (в тому числі пилоподібні)	0,828
Вапно	0,05
Цемент	0,01
Вугілля (шлам вуглезбагачення)	0,11
Каталізатор	0,005

Таблиця 1.3 – Питомі витрати сировини та енергоносіїв, необхідних для отримання 1 т чавуну при роботі малогабаритної доменної печі на вуглецевмісних окатишах

Вид сировини	Обсяг
Вуглецевмісні окатиші, т	2,011
Кокс, т	0,350
Електроенергія, кВт·год	31,0
Вода технічна, м ³	0,23
Коефіцієнт використання корисного об'єму печі	0,3

Попри позитивні результати, виявлені певні недоліки. Потужність з виробництва чавуну, заявлена постачальником обладнання, була завищена: фактичний обсяг виробництва чавуну за рік склав близько 78 тис. тон, що збігається з результатами експертної оцінки у 80 тис. тон [14, 16].

Одним із факторів, що вплинув на продуктивність печі та стабільність плавки, була нестабільність фракційного та хімічного складу залізовмісних відходів. На відміну від стабільних характеристик шламу вуглезабагачення, залізовмісні відходи містили різні фракції зі шлакових відвалів, окалину та пил. Усереднення компонентів перед виготовленням вуглецевмісних окатишів допомогло наблизити їх склад до рекомендованого.

Нестабільність постачання залізовмісних відходів, особливо в холодний період, значно впливала на їхній склад, що створювало проблеми в процесі плавки. Виникали численні затримки через зависання шихти, нестабільний вихід чавуну, підвищені витрати коксу та коливання об'ємів газу, що утворюється. Це призвело до необхідності відмовитися від хаотичного використання різних видів відходів. Також виникла потреба в удосконаленні підготовки залізовмісних відходів перед створенням вуглецевмісних окатишів, з урахуванням стабільності їх постачання на 10...15 років.

Основні енергозберігаючі та екологічні переваги комплексу включають:

- виробництво окатишів для доменної плавки без випалу, що дозволяє значно знизити енерговитрати.
- відмова від використання природного газу під час доменної плавки.
- повна утилізація доменного газу для забезпечення технологічного процесу та вироблення електроенергії, що також може передаватися до зовнішніх мереж для інших споживачів.
- скорочення витрат на кокс у процесі виробництва чавуну.
- оптимізація споживання технічної води завдяки замкнутому циклу водопостачання, що дозволяє скоротити витрати на 50%.

- основною сировиною є шлами, що допомагає зменшити екологічний тиск на регіон.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. У рамках дослідження було оцінено можливості використання малогабаритних доменних печей як для металургійного виробництва, так і для обробки відходів. Виявлено, що малогабаритні печі (до 12 м заввишки) ефективні для комплексної переробки металургійних і вуглезабагачувальних відходів, оскільки дозволяють виготовляти окатиші або брикети без випалу. На прикладі комплексу з піччю об'ємом 70 м³ показано, що використання вуглецевмісних окатишів, виготовлених із шламів металургійного виробництва, дозволяє скоротити витрати на виробництво однієї тони чавуну. Однак стабільна робота печі потребує подальшого вдосконалення підготовки залізовмісних відходів для виготовлення окатишів. Перспективи подальших досліджень малогабаритних доменних печей включають оптимізацію процесів переробки різних типів відходів, зокрема залізовмісних і вуглецевмісних матеріалів, для підвищення енергоефективності та зниження витрат на виробництво чавуну. Особлива увага повинна бути приділена розвитку технологій приготування сировини для більш стабільного використання печей, що дозволить забезпечити довгострокову експлуатацію в умовах зростаючого попиту на екологічні та енергоощадні рішення.

1.2 Порівняльний аналіз екологічної ефективності металургійних технологій виробництва сталі в контексті “зеленого” переходу

Вступ. Металургійна промисловість, будучи одним з ключових секторів світової економіки, сьогодні опиняється на перехресті екологічних викликів. Традиційні геотехнологічні методи видобутку основані на переведенні корисної копалини у рухомий стан за допомогою здійснення на місці його залягання теплових, масообмінних, хімічних і гідродинамічних процесів [17], методи

виробництва, що спираються на видобувне паливо та енергоємні процеси, призводять до значних викидів CO₂ та негативного впливу на довкілля. У контексті глобальної боротьби зі зниженням викидів CO₂, стає очевидним, що без радикальних змін металургійна галузь не зможе забезпечити сталий розвиток. Україна, маючи потужний металургійний комплекс, також стоїть перед вибором: продовжувати експлуатацію застарілих технологій чи обрати шлях екологічної модернізації. Перехід до зеленої металургії - це не лише про впровадження новітніх технологій, а й про комплексну трансформацію всієї галузі, включаючи зміну підходів до управління та організації виробництва.

Ключові напрямки реінжинірингу металургійного виробництва:

1. Технологічна модернізація:

1.1. Заміна доменних печей на більш екологічні електродугові печі, що дозволяє скоротити викиди CO₂ [17, 18] та використовувати вторинну сировину (металобрухт).

1.2. Впровадження технологій прямого відновлення заліза (DRI) [18] з використанням водню як відновника, що має потенціал повністю декарбонізувати процес виробництва сталі [19].

1.3. Використання відновлюваних джерел енергії для живлення виробничих процесів.

1.4. Впровадження систем уловлювання та зберігання вуглецю (CCS) для зниження викидів парникових газів.

2. Цифровізація:

2.1. Застосування штучного інтелекту та машинного навчання для оптимізації виробничих процесів, прогнозування та запобігання аварійним ситуаціям.

2.2. Використання Інтернету речей (IoT) для моніторингу та контролю обладнання в режимі реального часу, що дозволяє підвищити ефективність та знизити витрати на обслуговування.

2.3. Впровадження цифрових двійників для моделювання та оптимізації

виробничих процесів ще на етапі проектування.

3. Розвиток циркулярної економіки:

3.1. Створення ефективної системи збору, сортування та переробки металобрухту [20].

3.2. Розвиток технологій переробки відходів металургійного виробництва для отримання цінних матеріалів.

3.3 Співпраця з іншими галузями для створення замкнутих циклів виробництва та споживання.

4. Співпраця та інновації:

4.1. Створення партнерства між металургійними підприємствами, науковими установами та державними органами для спільного вирішення проблем та розробки нових рішень.

4.2. Підтримка досліджень та розробок у сфері зеленої металургії.

Створення сприятливого інвестиційного клімату для залучення коштів на модернізацію та впровадження інновацій.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю трансформації металургійної промисловості України у відповідь на глобальні екологічні виклики та зростаючий тиск з боку міжнародних регуляторів (введення вуглецевого податку СВAM) [21]. Традиційні методи виробництва сталі характеризуються високим рівнем викидів парникових газів та негативним впливом на довкілля. Впровадження принципів "зеленої" металургії є критично важливим для: зниження екологічного сліду галузі та досягнення цілей сталого розвитку, Підвищення конкурентоспроможності української металургії на світовому ринку. Метою дослідження є обґрунтування необхідності та розробка шляхів реінжинірингу металургійного виробництва в Україні для переходу до "зеленої" сталі та забезпечення сталого розвитку галузі.

Метою дослідження є аналіз шляхів реінжинірингу металургійного виробництва в Україні для переходу до "зеленої" сталі та забезпечення сталого

розвитку галузі шляхом впровадження інноваційних технологій, таких як Midrex та ЕДСП, з метою зниження викидів CO₂ та відповідності вимогам СВМ.

Методика дослідження. Дане дослідження базується на комплексному підході, що поєднує в собі глибокий аналіз фактичних даних, отриманих в процесі експлуатації автоматизованої системи моніторингу викидів на ПАТ "Запоріжсталь", та детальний порівняльний аналіз з передовими галузевими практиками, зокрема, з технологією Midrex для прямого відновлення заліза та електродуговою сталеплавильною піччю (ЕДСП).

Безперервне обчислення та збір даних про концентрації пилу та діоксиду сірки у відхідних газах агломераційного цеху та доменних печей здійснюється за допомогою сучасної автоматизованої системи моніторингу викидів (рис. 1.2), встановленої на ПАТ "Запоріжсталь". Система має безперервний моніторинг, вона працює 24/7, що дозволяє отримувати актуальні дані про викиди в будь-який момент часу. Завдяки високій точності та надійності, система моніторингу на ПАТ "Запоріжсталь" відповідає найсуворішим екологічним стандартам. Впровадження дозволило значно підвищити рівень екологічної безпеки, покращити управління виробничими процесами, враховуючи вплив на середовище.

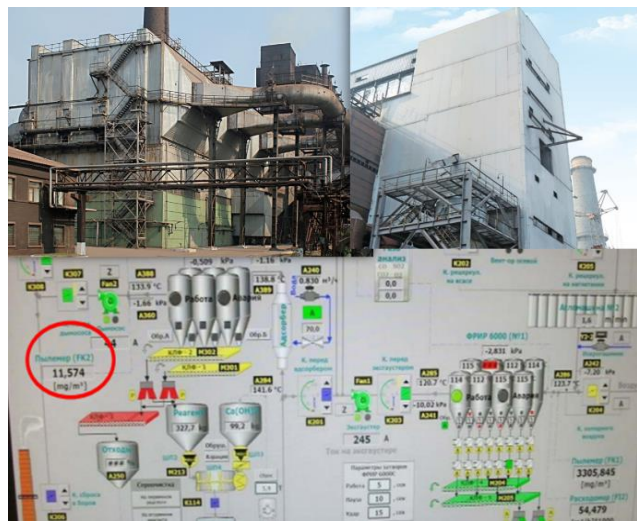


Рисунок 1.2 – Автоматизована система моніторингу викидів на аглофабриці

Можливість аналізу та візуалізації даних - зібрані дані можуть бути проаналізовані та представлені у вигляді графіків та звітів, що дозволяє оцінити динаміку викидів, виявити пікові значення та визначити ефективність природоохоронних заходів.

На підприємстві використовуються високоточні датчики моніторингу пилу D-R 808 фірми Durag (рис. 1.3) на аглодоменному переділі, що забезпечують високу точність вимірювань та інтегровані в загальнозаводську систему контролю. Контроль ключових технологічних параметрів: температури, розрідження та витрати газів, що дозволяє відстежувати динаміку процесів та виявляти потенційні відхилення.



Рисунок 1.3 – Прилад Durag що застосовується у аглодоменному переділі

У доменному та мартенівському переділі, крім автоматизованої системи моніторингу, також застосовуються датчики фірми Sintrol S304 (рис. 1.4). Ці датчики призначені для вимірювання концентрації пилу в промислових газах та відрізняються високою точністю, надійністю та стійкістю до агресивних середовищ. Застосування датчиків Sintrol S304 дозволяє отримувати додаткові дані про викиди пилу в доменному та мартенівському переділах, що доповнюють

інформацію, отриману від основної системи моніторингу АСУ. Датчики допомагають підвищити точність контролю викидів та забезпечити більш ефективне управління природоохоронною діяльністю на цих ділянках виробництва. Своєчасність виявлення відхилень від нормативних показників та вживання заходів для їх усунення, допомагає завжди знизити негативний вплив на навколишнє середовище і не заступати за рамки дозволених викидів які прописані та затверджені у нормативних документах та актах для виробництва.



Рисунок 1.4 – Датчик Sintrol S304 що застосовується у доменному та мартенівському переділі

Використано дані, отримані в процесі експлуатації автоматизованої системи моніторингу викидів на ПАТ "Запоріжсталь". Ці дані включають вимірювання концентрацій пилу та діоксиду сірки в відхідних газах агломераційного цеху та доменних печей, а також додаткові дані про викиди пилу в доменному та мартенівському переділах, отримані за допомогою датчиків Sintrol S304 та Durag. Залучено референтні дані від провідних виробників сучасного металургійного обладнання, таких як Midrex та Danieli. Ці дані дозволяють порівняти фактичні показники викидів на ПАТ "Запоріжсталь" з показниками, досяжними при використанні передових технологій, та оцінити потенціал для скорочення викидів.

У дослідженні застосовано комплексний підхід до аналізу та оцінки ефективності переходу металургійної промисловості до зелених технологій. Він включає наступні методи:

Статистичний аналіз проведення статистичного аналізу часових рядів даних про викиди для виявлення тенденцій, сезонних коливань та кореляцій з технологічними параметрами, що дозволяє глибше зрозуміти фактори, що впливають на рівень викидів. Детальне порівняння фактичних показників викидів аглодоменного виробництва з показниками технології Midrex + ЕДСП для об'єктивної оцінки потенціалу зниження викидів.

Використання сучасних датчиків, контрольно-вимірювальних приладів, систем збору та передачі даних, а також спеціалізованого програмного забезпечення для візуалізації, аналізу та архівування інформації, що забезпечує високу точність та надійність отриманих даних. Застосування АСУ ТП для забезпечення оптимального режиму роботи газоочисних установок та ефективного контролю основних технологічних параметрів.

Результати дослідження. Результати наведені у таблиці 1.4 технологій Midrex та ДСП від компанії Danieli демонструють значну перевагу у скороченні викидів CO₂ та інших забруднювачів у порівнянні з традиційним аглодоменним переділом та мартенівською піччю наведених у таблиці 1.5, що у свою чергу дозволяє відповідати суворим екологічним стандартам та уникнути фінансових втрат пов'язаних з вуглецевим податком СВAM.

Перехід на нові технології підвищить конкурентоспроможність на ринку виробників сталі, забезпечить зниження викидів CO, пилу, SO₂ та NO_x, що сприяє покращенню якості повітря та навколишнього середовища.

Таблиця 1.4 – Викиди в при роботі на установці Midrex та ДСП

Процес	CO ₂	CO	Пил	SO ₂	NO _x
Midrex (пряме відновлення заліза)	400	10	5	5	2
ДСП	100	1	1		1
Разом	500	11	6	6	3

Таблиця 1.5 – Викиди в аглодоменному виробництві з мартенівською піччю

Процес	CO ₂	CO	Пил	SO ₂	NO _x
Аглодоменне виробництво					
Аглофабрика					
Процес спікання агломерату	300	15	30	40	10
Доменний процес					
Спалювання коксу	1650	30	20	20	5
Випуск чавуну та шлаку	55	10			
Колошниковий газ	50	10			
Мартенівський переділ					
Спалювання палива	300	10	10	10	5
Окислення домішок	35	5	5		
Разом	2390 кг/т	80 кг/т	65 кг/т	70 кг/т	20 кг/т

Аналіз показує, що існуюча система моніторингу викидів на ПАТ "Запоріжсталь" дозволяє ефективно контролювати та управляти викидами в межах чинних нормативів. Однак, з урахуванням введення вуглецевого податку СВМ та посилення екологічних вимог в ЄС, традиційні методи виробництва сталі,

ймовірно, не зможуть забезпечити дотримання нових стандартів. Це ставить під загрозу конкурентоспроможність української металургії на європейському ринку. Бенчмаркінг з технологією Midrex + ЕДСП наведений на рис. 1.5 дозволить всебічно оцінити потенціал зниження викидів на ПАТ "Запоріжсталь" та розробити детальну стратегію поетапної модернізації виробництва з урахуванням економічних та екологічних аспектів. Результати дослідження допоможуть обґрунтувати інвестиції в природоохоронні заходи, демонструючи їх економічну ефективність та позитивний вплив на навколишнє середовище, що сприятиме підвищенню екологічної відповідальності підприємства. Впровадження сучасної системи моніторингу та реалізація стратегії модернізації на основі отриманих результатів дослідження сприятимуть підвищенню екологічної відповідальності підприємства [22]. Це позитивно вплине на її репутацію, дозволить залучити нові інвестиції та забезпечить сталий розвиток у довгостроковій перспективі.



Рисунок 1.5 – Бенчмаркінг застарілого процесу з новітнім процесом

Технологія Midrex + ЕДСП демонструє суттєве зниження викидів CO₂ (до 70%) порівняно з традиційним аглодоменним виробництвом [23]. Це пов'язано з відсутністю необхідності в коксохімічному виробництві та доменній печі, які є

основними джерелами CO₂.

Ігнорування вимог СВAM дійсно несе значні фінансові ризики для українських металургів підприємств. Вуглецевий податок може обчислюватися десятками мільйонів євро щорічно для великих виробників. Це суттєво вплине на рентабельність експорту металопродукції до ЄС.

Висновки. У статті комплексно досліджено актуальну проблему реінжинірингу металургійної промисловості України в контексті переходу до зеленої сталі та сталого розвитку. Проаналізовано основні проблеми традиційної металургії, пов'язані з високим рівнем викидів CO₂ та забруднюючих речовин. Запропоновано ключові напрямки реінжинірингу, що включають технологічну модернізацію (заміна доменних печей на електродугові, впровадження технології DRI, використання відновлюваних джерел енергії та систем CCS), цифровізацію (застосування ШІ, IoT, цифрових двійників), розвиток циркулярної економіки (ефективна переробка металобрухту та відходів) та активну співпрацю між учасниками ринку. На основі аналізу фактичних даних ПАТ "Запоріжсталь" та порівняння з передовими технологіями (Midrex, ЕДСП) продемонстровано суттєвий потенціал зниження викидів CO₂ (до 70%) та інших забруднювачів при переході на зелені технології. Загалом, дослідження підтверджує, що реінжиніринг металургійної промисловості України на основі принципів зеленої металургії є не лише необхідним кроком для досягнення екологічних цілей, а й економічно вигідним рішенням.

1.3 Розробка математичних моделей змін концентрації емульсій та вмісту механічних домішок у технологічних рідинах з використанням пакету Matlab для обробки експериментальних даних

Постановка проблеми. Розробка ефективних методів контролю та моделювання параметрів технологічних процесів є одним із ключових напрямів

сучасних досліджень у матеріалознавстві та промисловій хімії. Зокрема, вибір і аналіз відповідних математичних моделей дають змогу точніше прогнозувати поведінку складних систем і вдосконалювати управління процесами. Однією з актуальних задач у цих сферах є моделювання змін концентрації та механічних домішок у динаміці з використанням різних типів математичних моделей. Це завдання було досліджено на прикладі проблеми накопичення механічних домішок під час застосування емульсолів різних марок у процесі холодної прокатки в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Якість холоднокатаного прокату значною мірою залежить від складу прокатної емульсії, що впливає на чистоту поверхні, наявність на ній таких забруднень, як сажа, залишки емульсії та плями [24]. Для зменшення коефіцієнта тертя, оптимізації енергоспоживання, підвищення чистоти поверхні та мінімізації дефектів на комбінаті «Запоріжсталь» здійснюють випробування різних емульсолів [25, 26]. У цеху холодного прокату ПАТ «Запоріжсталь» емульсол використовується для змащування травленого гарячекатаного підкату (наноситься під час змотування рулону за допомогою машини електростатичного промаслювання), а також на станах холодної прокатки, де він розчиняється у демінералізованій або технічній воді з концентрацією 1,5–3,0 %.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Кожне виробництво потребує особливого підбору емульсолу з урахуванням обладнання та умов процесу, що включає лабораторні дослідження, виробничі випробування та контроль технологічних і якісних параметрів прокату [27–30]. Деякі властивості емульсолу, такі як схильність до утворення дефектів, здатність забезпечувати якість поверхні та зносостійкість, можна остаточно оцінити тільки у виробничих умовах. Основною вимогою до емульсолів для холодного прокату є висока охолоджувальна здатність і повне вигорання олії під час відпалу при температурі 500 °С. Жодна емульсія повністю не зникає під час відпалу, завжди залишаючи певний рівень коксових залишків [31].

Крім вибору типу емульсолу, важливо також забезпечити ретельне видалення емульсії з поверхні штаби, що виходить з останньої кліти стану, а також дотримуватися оптимальних параметрів її використання, таких як концентрація, вміст механічних домішок та гідравлічних масел [32–35]. Встановлено, що концентрація масла в емульсії є основним фактором, який впливає на чистоту поверхні прокату. Дослідники [36] рекомендують підтримувати концентрацію емульсолу на рівні 2–2,5 %, що дозволяє знизити забруднення поверхні. Крім того, застосування високоефективних емульсолів з високим числом омилення може дозволити зниження концентрації без погіршення якості прокату [37].

Збільшення концентрації механічних домішок в емульсії негативно впливає на якість поверхні прокату, знижуючи його відбивну здатність та чистоту. Частинки заліза, що накопичуються в процесі прокатки, погіршують умови роботи валків, спричиняючи їх інтенсивне зношування та утворення нових домішок у емульсії. Це призводить до накопичення забруднень на поверхні прокату, які знижують його естетичні та функціональні властивості [38–40]. Надмірна концентрація цих домішок особливо шкідлива при подальшому відпалі холоднокатаних рулонів, оскільки сприяє утворенню дефектів типу «сажа». Це вимагає ретельного контролю за рівнем механічних домішок у емульсії, а також регулярної фільтрації або заміни, щоб забезпечити стабільність технологічного процесу та якість кінцевого продукту.

Застосування математичних методів обробки експериментальних даних дозволяє підвищити точність оцінки ефективності емульсолів, оптимізувати технологічні параметри їх використання та створити математичні моделі, що враховують взаємозв'язок між концентрацією, рівнем механічних домішок та якістю прокату. Побудова таких моделей сприяє прогнозуванню результатів у виробничих умовах, що дозволяє значно зменшити кількість експериментальних випробувань і забезпечити оптимальні умови для досягнення високої якості продукції.

Метою даної роботи є розробка методики випробувань емульсолів у виробничих умовах із використанням математичних методів аналізу експериментальних даних, що дозволить визначити оптимальні математичні моделі для опису експериментальних залежностей між концентрацією та механічними домішками в середовищі змінного часу та сформулювати основні технологічні прийоми використання емульсолів.

Виклад основного матеріалу. Методика дослідження ґрунтується на оцінці моделей за коефіцієнтом детермінації, який відображає точність апроксимації експериментальних даних. Для реалізації методики було обрано пакет прикладних програм для числового аналізу MATLAB, що забезпечує високу точність чисельних розрахунків і автоматизувати процес обробки даних. Вихідними даними дослідження були графіки, отриманих за результатами випробувані емульсолів різних марок «LUBRO DL ZPS», «ROLLUB 988-AR», «ОПТИМАЛ-ПРО» та «TRENOIL S 740» у процесі холодної прокатки в умовах ПАТ «Запоріжсталь» на реверсивному стані 1680 і на безперервному 4-клітьовому стані «Тандем».

Вибір оптимальної математичної моделі для опису експериментальних даних концентрації емульсії від часу $C(t) = f_C(t)$ та концентрації механічних домішок від часу $M(t) = f_M(t)$ проводили з використанням лінійної, квадратичної та експоненційної апроксимації. Найкращу модель обирали за найбільшим значенням коефіцієнта детермінації:

$$R^2 = 1 - RSS/TSS, \quad (1.1)$$

де RSS – сума квадратів залишків; TSS – загальна сума квадратів;

$$RSS = \Sigma(Y_i - \hat{Y}_i)^2, \quad (1.2)$$

де Y_i – реальне значення змінної при i -му спостереженні; \hat{Y}_i – модельне

значення змінної при i -му спостереженні;

$$TSS = \Sigma(Y_i - \bar{Y})^2 \cdot R^2, \quad (1.3)$$

де \bar{Y} – середнє значення змінної при спостереженні.

Для отримання залежності швидкості від часу $V_i(T_i)$ для ряду $Y_i(t_i)$ з нерівномірними часовими проміжками використовували формулу:

$$V_i = \Delta V / \Delta t = (Y_{i+1} - Y_i) / (t_{i+1} - t_i). \quad (1.4)$$

За відповідний момент часу для швидкості обирали середину інтервалу:

$$T_i = (t_{i+1} + t_i) / 2. \quad (1.5)$$

Знаходження показника швидкості може бути отримана також шляхом диференціювання за часом моделей $C(t) = f_C(t)$ та $M(t) = f_M(t)$:

$$dC(t) = df_C(t), \quad dM(t) = df_M(t). \quad (1.6)$$

Для автоматизації обробки даних використовували середовище програмування MATLAB (версія MATLAB R2022b) і відповідну високорівневу мову, яка базується на матричному представленні даних. MATLAB забезпечує широкий набір функцій, інтегроване середовище розробки, підтримку об'єктно-орієнтованого програмування та можливість інтеграції з іншими мовами програмування. Зчитування даних із файлів MS Excel здійснювалося у форматі «Таблиця» за допомогою вбудованої функції `readtable` (рис. 1.6).

```

% Завантаження даних із файлу в таблицю
data = readtable('data.xlsx');
time = data.Time; % часові мітки в стовпці 'Time'
concentration = data.Concentration; % дані в стовпці 'Concentration'

```

Рисунок 1.6 – Фрагмент коду для зчитування даних із файлів MS Excel

При моделюванні використовували вбудовану функцію `fit`, яка дозволяє отримувати апроксимації у вигляді багатьох алгебраїчних функцій. Приклад апроксимації квадратичної функції із розрахунком відповідного коефіцієнту детермінації, а також визначення коефіцієнтів отриманої квадратичної функції $Y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c$ наведено на рис. 1.7.

```

% Квадратична модель
quadraticModel = fit(time, concentration, 'poly2');
quadraticPred = quadraticModel(time); % Прогнозовані значення
quadraticR2 = 1 - sum((concentration - quadraticPred).^2) / sum((concentration - mean(concentration)).^2);
a = quadraticModel.p1;
b = quadraticModel.p2;
c = quadraticModel.p3;

```

Рисунок 1.7 – Фрагмент коду для побудови квадратичної апроксимації та визначення коефіцієнтів отриманої моделі

Вибір найкращої апроксимації за максимальним значенням коефіцієнту детермінації реалізовували у блоці `switch-case`, як це наведено на рис. 1.8.

Отримані результати були візуалізовані в MATLAB з використання функції `plot` (рис. 1.9). Побудовано графіки залежностей концентрації емульсії від часу та вмісту механічних домішок від часу для усіх трьох моделей із зазначенням розрахованих значень R^2 . Для оптимальної моделі з максимальним значенням коефіцієнта детермінації додатково було відображення відповідне рівняння апроксимації.

```

% Визначення найкращої моделі за R^2
[~, bestModelIndex] = max([linearR2, quadraticR2, expR2]);
bestModelName = "";
bestModelPred = [];

switch bestModelIndex
case 1
    a = linearModel.p1;
    b = linearModel.p2;
    bestModelName = sprintf('Linear Model: y = %.6f * x + %.6f\n', a, b');
    bestModelPred = linearPred;
case 2
    a = quadraticModel.p1;
    b = quadraticModel.p2;
    c = quadraticModel.p3;
    bestModelName = sprintf('Quadratic Model: y = %.6f * x^2 + %.6f * x + %.6f\n', a, b, c);
    bestModelPred = quadraticPred;
case 3
    a = expModel.a;
    b = expModel.b;
    bestModelName = sprintf('Exponential Model: y = %.6f * exp(%.6f * x)\n', a, b);
    bestModelPred = expPred;
end

```

Рисунок 1.8 – Фрагмент коду для визначення найкращої моделі за коефіцієнтом детермінації

```

% Побудова графіка даних і всіх трьох моделей з R^2 на графіку
figure;
plot(time, concentration, 'ko', 'MarkerFaceColor', 'k'); % Дані
hold on;
% Моделі
plot(time, linearPred, 'r-');
plot(time, quadraticPred, 'b-');
plot(time, expPred, 'g-');
% Макет графіка: осі, надписи, легенда
xlabel('Time, h');
ylabel('Concentration, %');
title('Concentration of Rolling Emulsion: Data and Trend Models');
legend('Data', sprintf('Linear Model (R^2 = %.6f)', linearR2), ...
    sprintf('Quadratic Model (R^2 = %.6f)', quadraticR2), ...
    sprintf('Exponential Model (R^2 = %.6f)', expR2));
grid on;
hold off;

```

Рисунок 1.9 – Фрагмент коду для побудови графіки залежностей концентрації емульсії від часу та вмісту механічних домішок від часу для трьох моделей з зазначенням коефіцієнта детермінації

Розглянемо приклад обробки експериментальних даних для емульсолу «LUBRO DL ZPS», отримані у виробничих умовах реверсивного стану 1680 результатами.

Моделі залежності концентрації емульсолу та вмісту механічних домішок від часу. За результатами апроксимації було отримано по три моделі (лінійну, квадратичну та експоненційну) для залежності концентрації емульсолу від часу $C(t)$ (рис. 1.10а) та залежності вмісту механічних домішок від часу $M(t)$ (рис. 1.10б).

Оптимальну модель для кожного випадку було визначено за максимальним коефіцієнтом детермінації:

– залежність концентрації емульсолу (C , %) від часу (t , год.) (квадратичне рівняння, рис. 10в):

$$C(t) = 0,0001t^2 - 0,023736t + 2,910641; (R^2 = 0,58); \quad (1.7)$$

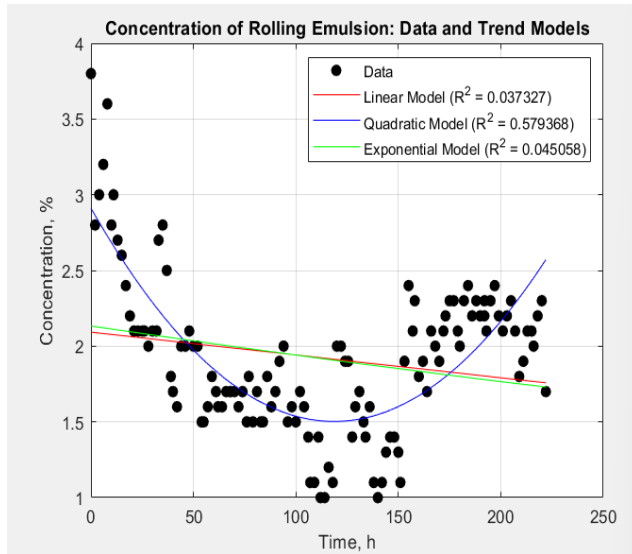
– залежність вмісту механічних домішок (M) від часу (t) (квадратичне рівняння, рис. 10г):

$$M(t) = 0,000001t^2 - 0,000010t + 0,007139; (R^2 = 0,886). \quad (1.8)$$

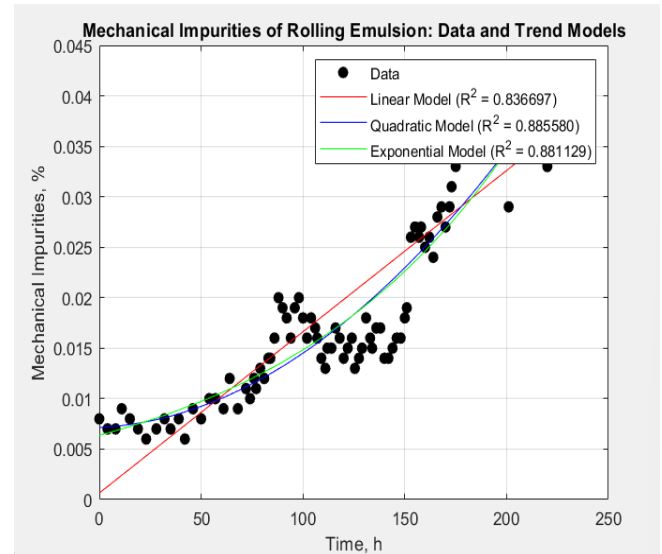
Моделі залежності швидкості зміни концентрації емульсолу та вмісту механічних домішок від часу. Усі моделі залежності швидкості зміни концентрації емульсолу від часу $CV(t)$ (рис. 11а) та залежності швидкості зміни вмісту механічних домішок від часу $MV(t)$ (рис. 11б), отримані за результатами апроксимації, характеризувалися низьким значенням R^2 , тому оптимальні моделі для кожного випадку було знайдено як першу похідну від залежностей (1.7) та (1.8) відповідно (рис. 11в та 11г):

$$CV(t) = dC(t)/dt = 0,000200t - 0,023736; \quad (1.9)$$

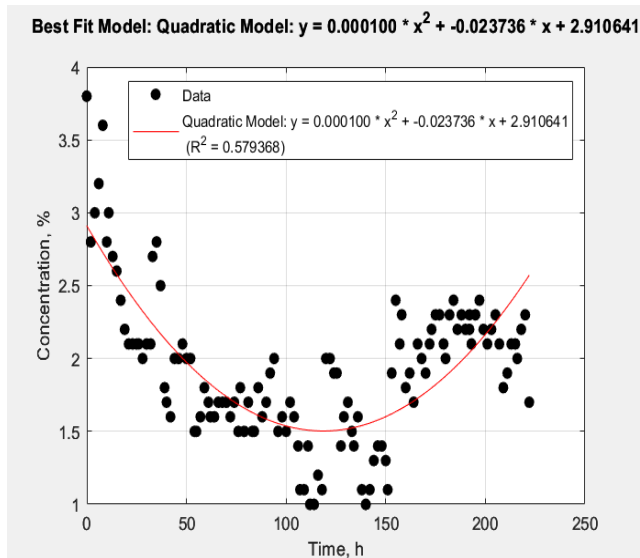
$$MV(t) = dM(t)/dt = 0,000002t - 0,00001. \quad (1.10)$$



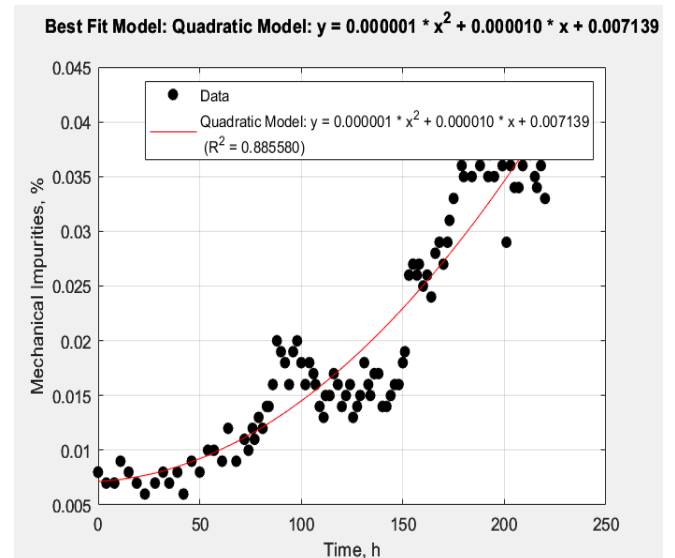
(a)



(б)

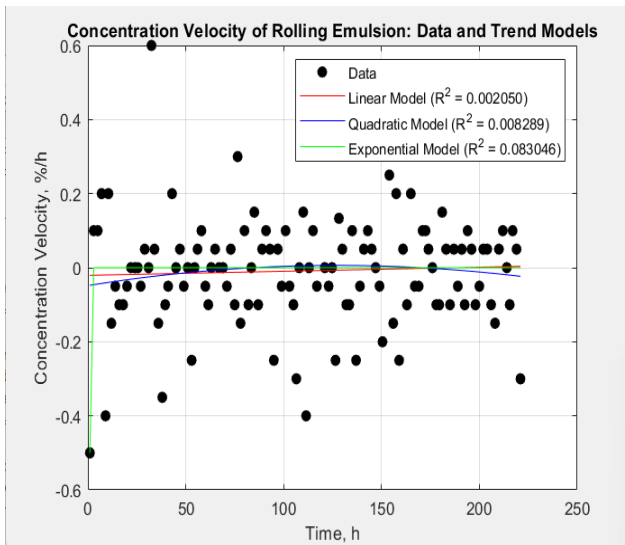


(в)

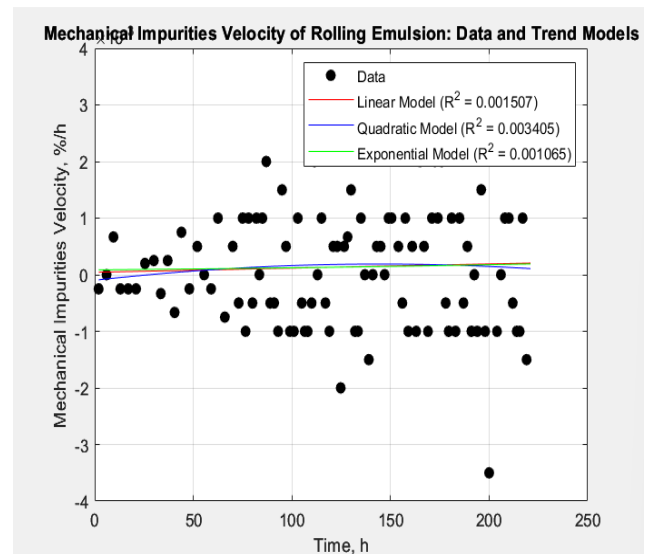


(г)

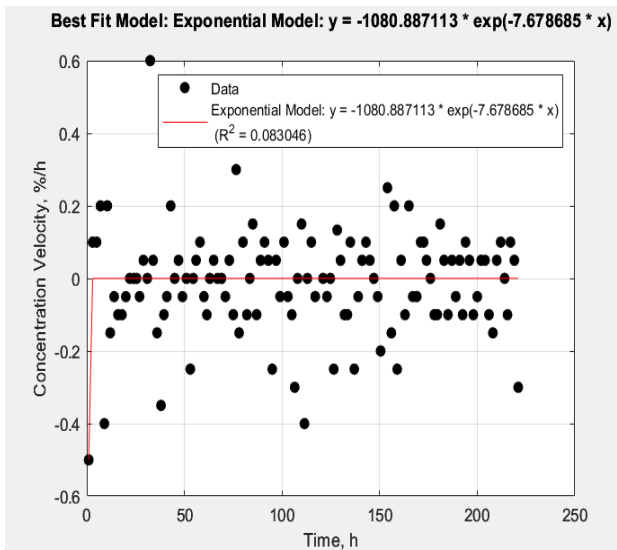
Рисунок 1.10 – Залежність концентрації емульсії від часу (а) та залежність вмісту механічних домішок від часу (б) за трьома моделями; найкраща модель залежності концентрації емульсії від часу (в); найкраща модель залежності вмісту механічних домішок від часу (г)



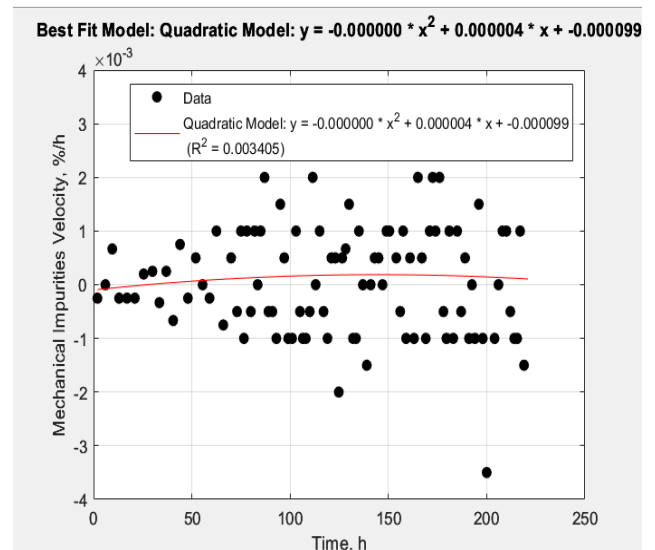
(a)



(б)



(в)

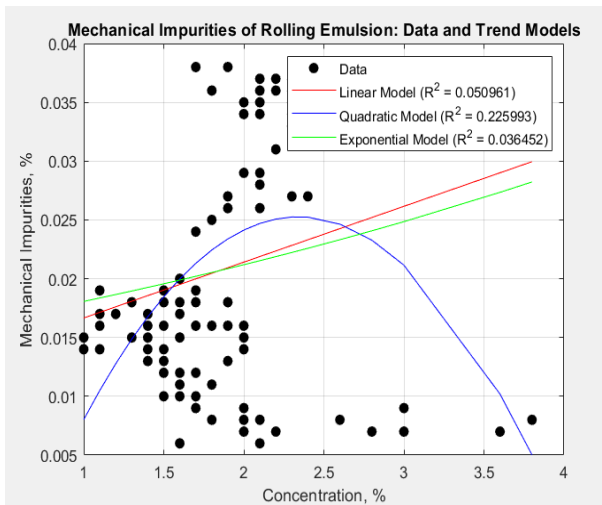


(г)

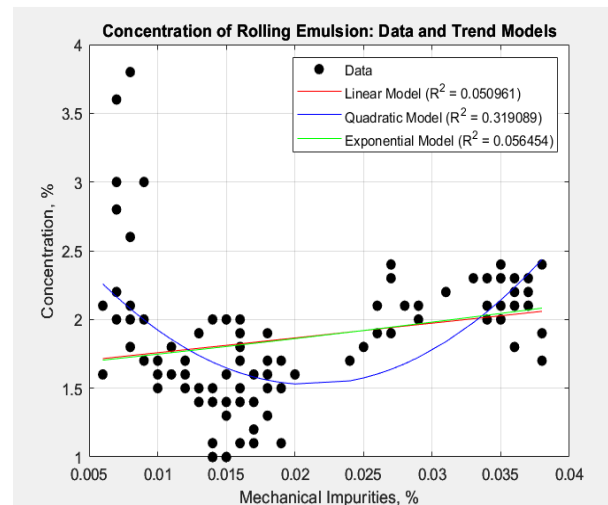
Рисунок 1.11 – Залежність швидкості зміни концентрації емульсії від часу (а) та залежність швидкості зміни вмісту механічних домішок від часу (б) за трьома моделями; найкраща модель залежності швидкості зміни концентрації емульсії від часу (в); найкраща модель залежності швидкості зміни вмісту механічних домішок від часу (г)

Моделі залежності вмісту механічних домішок від концентрації емульсолу та залежності концентрації емульсолу від вмісту механічних

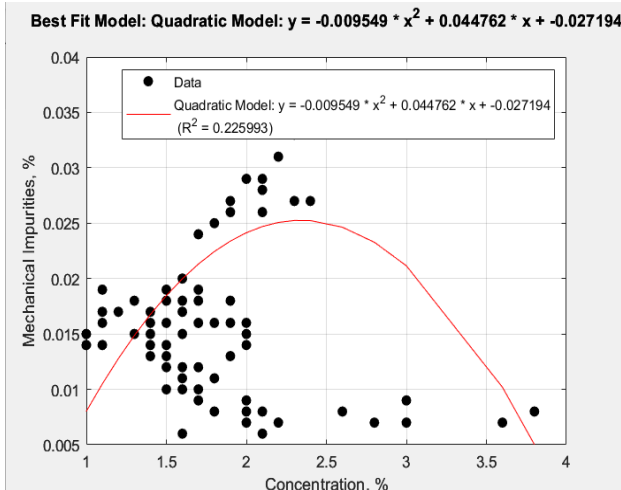
домішок. Моделювання залежності вмісту механічних домішок від концентрації емульсії та зворотної залежності проводили також на основі отриманих даних спостережень за трьома моделями (рис. 1.12а та 1.12б), після чого визначали оптимальні моделі для кожного випадку (рис. 1.12в та 1.12г).



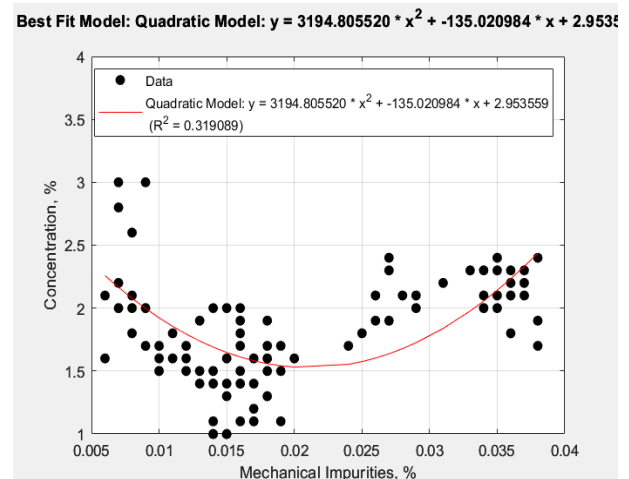
(а)



(б)



(в)



(г)

Рисунок 1.12 – Залежність вмісту механічних домішок від концентрації емульсії (а) та залежність концентрації емульсії від вмісту механічних домішок (б) за трьома моделями; найкраща модель залежності вмісту механічних домішок від концентрації емульсії (в); найкраща модель залежності концентрації емульсії від вмісту механічних домішок (г)

Особливістю зчитування даних при цьому є необхідність виключення рядків, де відсутні значення за домішками та сортування матриць за зростанням концентрації. Далі моделювання проводили аналогічно обробці часових рядів.

У результаті отримано залежність вмісту механічних домішок (M) від концентрації емульсії (C):

$$M(C) = -0,009549C^2 + 0,044762C - 0,027194; (R^2 = 0,225993). \quad (1.11)$$

Точку екстремуму (для максимуму домішок) визначено з рівняння (11):

$$C_0 = -b/2a = -0,044762/(2 \cdot (-0,009549)) \approx 2,3438 \%. \quad (1.12)$$

Підставляючи значення (1.12) у рівняння (1.11), отримали максимальну концентрацію механічних домішок, яка виявилася менше критичного значення ($M_{cr} = 0,05\%$):

$$M_{\max} = M(C_0) = -0,052456 + 0,104913 - 0,027194 = 0,025 \%. \quad (1.13)$$

Аналогічно отримано залежність концентрації емульсії (C) від механічних домішок (M):

$$C(M) = 3194,805520M^2 - 135,020984M + 2,953559; (R^2 = 0,319089). \quad (1.14)$$

Точку екстремуму (мінімум концентрації) визначено з рівняння (1.14):

$$M_0 = -b/2a = (-135,020984)/(2 \cdot 3194,805520) \approx 0,021 \%. \quad (1.15)$$

Для критичного значення $M_{cr} = 0,05\%$ знаходили критичне значення концентрації, при цьому критичне значення концентрації значно більше за спостережені значення:

$$C_{cr} = C(M_{cr}) = 7,987014 - 6,751049 + 2,953559 = 4,19 \%. \quad (1.16)$$

Висновки. Таким чином, за результатами проведених досліджень було обрано оптимальну математичну модель для опису експериментальних залежностей між концентрацією емульсії та вмістом механічних домішок. Відповідно до запропонованої методики було проаналізовано лінійну, квадратичну та експоненційну апроксимації, оцінюючи їх за коефіцієнтом детермінації. Визначено швидкість зміни концентрації емульсії та механічних домішок у часі, а також отримано відповідні математичні вирази шляхом диференціювання моделей. Проведено аналіз взаємозв'язку між концентрацією емульсії та механічних домішок, встановлено точки екстремуму та визначено критичні значення концентрацій для забезпечення ефективності процесів змащування і контролю технологічних параметрів.

1.4 Висновки до розділу 1

1. Малогабаритні доменні печі (Micro та Mini Blast Furnaces) демонструють значний потенціал для інтегрованої переробки відходів металургії та вуглезбагачення, особливо в умовах післявоєнного відновлення та ресурсних обмежень.

2. Технологія безобпалювальних вуглецевмісних окатишів, виготовлених із шламів, забезпечує економічне виробництво передільного чавуну з мінімальним споживанням енергоносіїв, води та коксу, одночасно вирішуючи проблему утилізації промислових відходів.

3. Комплексна енергоощадна інфраструктура з генерацією власної електроенергії, замкнутим циклом водопостачання та відмовою від природного газу демонструє високий рівень технологічної автономності та екологічної ефективності.

4. Зелений перехід у металургії, згідно з аналізом сценаріїв на прикладі ПАТ «Запоріжсталь», вимагає поетапної модернізації технологій: заміни доменних печей на ЕДСП, впровадження DRI-процесів (напр. Midrex), цифровізації та інтеграції відновлюваних джерел енергії.

5. Порівняльний аналіз викидів засвідчив, що традиційне аглодоменне виробництво викидає в 4–5 разів більше CO₂ та пилу, ніж сучасні комбіновані технології Midrex+ЕДСП, що критично важливо в умовах впровадження СВМ та інших екологічних регламентів.

6. Автоматизовані системи моніторингу викидів (АСУ) з високоточними датчиками (Durag, Sintrol) забезпечують оперативний екологічний контроль і дають змогу проводити бенчмаркінг з передовими технологіями, що є основою для прийняття інвестиційних рішень.

7. Математичне моделювання та аналіз емульсій у процесі холодної прокатки дозволяє оптимізувати параметри змащування, прогнозувати забруднення поверхні та запобігати дефектам, підвищуючи якість продукції при зниженні витрат на охолоджувальні рідини.

8. Поєднання фізико-хімічного, екологічного та цифрового підходів є критично важливим для трансформації металургійного виробництва України у напрямі сталого розвитку, конкурентоспроможності та відповідності новим ринковим викликам.

РОЗДІЛ 2

УПРАВЛІННЯ ТРАНСФОРМАЦІЄЮ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ГАЛУЗІ: ВПРОВАДЖЕННЯ BUSINESS PERFORMANCE MANAGEMENT ТА КЛАСТЕРНИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВІ ВОДНЕВИХ ТЕХНОЛОГІЙ

2.1 Впровадження Business Performance Management у чорній металургії: концепція, бар'єри, цифрова інтеграція та приклад Групи Metinvest

Вступ. У сучасних умовах глобальної трансформації промисловості, зокрема в секторі чорної металургії, підприємства стикаються з необхідністю постійної адаптації до змінного ринкового, технологічного та регуляторного середовища. Водночас процеси організаційних змін часто супроводжуються високим рівнем невизначеності, опором персоналу та нестачею ефективних механізмів моніторингу досягнення цілей. У цьому контексті особливого значення набуває впровадження підходів Business Performance Management (BPM), які дозволяють системно управляти змінами, фокусуючись на досягненні стратегічних результатів через вимірювання, аналіз та оптимізацію ключових показників ефективності.

Business Performance Management — це комплексний підхід до управління організацією, який поєднує стратегічне планування, управлінський контроль, інформаційну аналітику та зворотний зв'язок для досягнення цілей. У сфері чорної металургії, яка характеризується високою капіталомісткістю та складністю виробничо-організаційних структур, застосування BPM сприяє не лише підвищенню ефективності управлінських рішень, а й формуванню адаптивної моделі організації, здатної гнучко реагувати на зміни зовнішнього середовища.

Методологія та результати досліджень. Результати проведених досліджень були зосереджені на виявленні методологічних засад, інструментів та практичних підходів до впровадження BPM у металургійних підприємствах. Основну увагу приділено визначенню чинників успішного впровадження організаційних змін,

аналізу бар'єрів на рівні управлінських практик, а також розробці моделей управління, адаптованих до специфіки галузі.

Управління організаційними змінами в підприємствах чорної металургії потребує особливого підходу, який дозволяє не лише реагувати на зовнішні виклики, а й проактивно формувати внутрішню адаптивність. У цьому контексті Business Performance Management (BPM) виступає не просто як інструмент аналітики, а як комплексна управлінська концепція, що забезпечує узгоджене функціонування всіх рівнів організації — від стратегічного до операційного.

Застосування BPM є особливо актуальним з огляду на складність виробничо-організаційної структури металургійних підприємств, високу капіталомісткість галузі, потребу в ефективному управлінні ресурсами та необхідність постійного моніторингу ключових показників ефективності. Як засвідчують результати проведених досліджень:

1. Впровадження BPM дозволяє структурувати цілі, показники та відповідальність в умовах багаторівневої ієрархії управління [41];
2. Визначено низку проблем впровадження BPM на металургійних підприємствах, зокрема недостатню інтеграцію даних, відсутність єдиних KPI на рівні підрозділів і управлінську фрагментацію [42];
3. Обґрунтовано доцільність застосування BPM як інструменту оптимізації управлінських рішень на основі аналітики, включно з розробкою практичної моделі системи показників ефективності [43];
4. Запропоновано інтеграційну модель BPM у структуру управління підприємством, що дозволяє формалізувати процеси змін і підвищити гнучкість реагування [44];
5. Продемонстровано можливості використання BPM для формування зворотного зв'язку та динамічного контролю в системі управління [45];
6. Розкрито значення цифрових технологій у підтримці BPM-рішень, особливо в умовах обмежених ресурсів та високих вимог до адаптивності [46].

Практична реалізація підходів Business Performance Management у сфері чорної металургії ґрунтується на трьох ключових складових: вимірювальних системах, аналітичній обробці даних і системному прийнятті управлінських рішень. Саме ця структура дозволяє синхронізувати стратегічні та операційні цілі підприємства, забезпечити прозорість процесів та створити механізми зворотного зв'язку для оперативного реагування на відхилення.

1. Вимірювальні системи. Успішне впровадження BPM вимагає наявності чітко визначених ключових показників ефективності (KPI), що відповідають стратегічним завданням компанії. Вони мають охоплювати не лише фінансові результати, а й виробничі, логістичні, інноваційні, соціальні та екологічні аспекти діяльності. Важливо, щоб система KPI була багаторівневою: від рівня топ-менеджменту — до конкретного підрозділу або навіть окремого працівника. У випадку металургійних підприємств, це дозволяє враховувати складну структуру виробництва, взаємозв'язки між технологічними переділами та циклічність процесів.

2. Аналітична інтерпретація. Другим критично важливим компонентом BPM є систематична обробка та інтерпретація зібраних даних. Це передбачає не лише облік фактичних результатів, а й їх порівняння з плановими показниками, аналіз причин відхилень, а також виявлення трендів і аномалій. На прикладі українських активів холдингу «Метінвест» продемонстровано, як цифрові платформи аналітики були інтегровані у виробничі та фінансові підрозділи для моніторингу продуктивності. Завдяки цьому менеджмент зміг своєчасно виявляти слабкі ланки в ланцюгу створення вартості та адаптувати оперативні плани до динаміки внутрішніх і зовнішніх змін [43].

3. Управлінські рішення. Третім компонентом є прийняття управлінських рішень, що базуються на достовірних даних і орієнтовані на досягнення конкретних результатів. Саме BPM створює умови для переходу від інтуїтивного до обґрунтованого управління — через постійне оновлення інформації, гнучке

планування та можливість швидкої адаптації. У кейсі «Метінвесту» з цією метою було запроваджено єдину систему звітності для різних бізнес-напрямів, яка дозволила скоротити час на ухвалення рішень, покращити координацію між підрозділами та сформувати культуру відповідальності за результати.

Варто підкреслити, що ефективність застосування BPM значною мірою залежить від здатності підприємства налаштувати єдину логіку цілей, показників, контролю та стимулювання на всіх рівнях. У випадку металургійних компаній це означає потребу в адаптації загальних підходів BPM до специфіки галузі: високої технологічної складності, сезонності попиту, енергоємності виробництва та великої кількості зовнішніх регуляторів.

Досвід впровадження Business Performance Management на прикладі компанії «Метінвест» підтверджує, що цей підхід може бути ефективним інструментом підвищення якості управлінських рішень, прозорості внутрішніх процесів та адаптивності підприємства до стратегічних змін.

Однак ефективність системи Business Performance Management залежить не лише від наявності показників та аналітичних інструментів, а насамперед — від глибини інтеграції BPM у виробничо-організаційні процеси підприємства. Для металургійних компаній, де функціонування підприємства є результатом взаємодії складних технологічних циклів і численних управлінських рівнів, критично важливо, щоб BPM не існував ізольовано як додатковий інструмент, а був вбудований у саму логіку операційної та стратегічної діяльності.

У цьому контексті ключовим є підхід до побудови інтеграційної моделі BPM, що охоплює не лише функціональні напрями (виробництво, фінанси, логістика), але й просторово-структурні рівні управління: корпоративний, регіональний і цеховий. Інтеграція BPM доцільна у формі матричної моделі, де кожна підсистема (наприклад, технологічна, економічна, кадрова) має свою систему цілей, показників і відповідальних осіб, але всі вони пов'язані спільною логікою цільових орієнтирів та циклів управління [44].

Особливу увагу слід приділити зв'язку між індикаторами виробничої ефективності та корпоративними КРІ, що дозволяє забезпечити вертикальну інтеграцію цілей і рішень. Такий підхід не лише усуває дублювання функцій, а й сприяє оперативній комунікації між підрозділами, скороченню затримок у прийнятті рішень і підвищенню відповідальності виконавців.

Також у запропонованій моделі пропонується поетапний алгоритм інтеграції ВРМ, який складається з етапів, зображених на рис. 2.1.

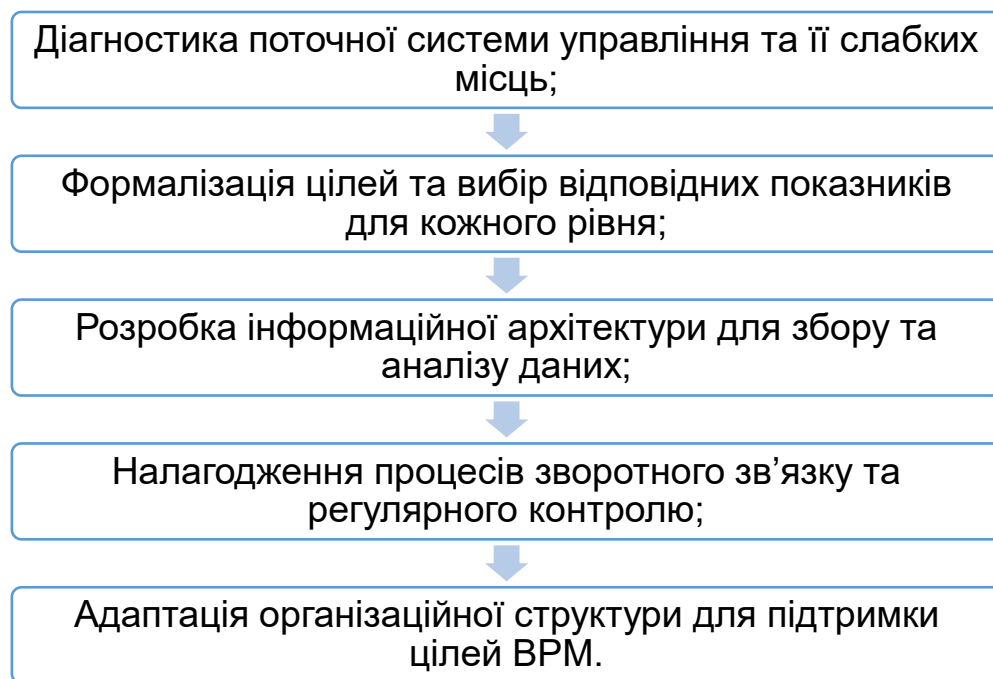


Рисунок 2.1 – Алгоритм інтеграції ВРМ

Важливо зазначити, що така інтеграційна модель враховує особливості металургійного виробництва: циклічність процесів, високу енергоємність, техногенну небезпеку та потребу в постійному балансуванні між якістю, обсягами та витратами. У цьому контексті ВРМ виконує не лише управлінську, але й координаційну функцію, дозволяючи знизити фрагментацію рішень і забезпечити стратегічну єдність усіх ланок управління. Інтеграція ВРМ у виробничо-організаційну модель підприємства є необхідною умовою для досягнення реального

ефекту від його впровадження — як у вигляді зростання продуктивності, так і у вигляді підвищення гнучкості реагування на внутрішні та зовнішні зміни. Це відкриває можливості для побудови динамічної, адаптивної, цифрово підкріпленої системи управління, яка відповідає сучасним викликам галузі.

Попри потенційні переваги інтеграції Business Performance Management у виробничо-організаційні процеси підприємств чорної металургії, реальна практика його впровадження стикається з низкою суттєвих бар'єрів, які гальмують ефективну реалізацію управлінських змін. Ідентифікація цих проблем є необхідною передумовою для розробки адекватних управлінських рішень і коригування впроваджуваних моделей BPM.

Як свідчить проведений у дослідженні аналіз, більшість бар'єрів умовно можна поділити на організаційно-поведінкові, інформаційно-комунікаційні та системні (процедурні) [42].

Найбільш суттєвими серед них виявились:

1. Опір змінам серед персоналу (людський чинник). Цей чинник проявляється у формі пасивної або відкритої протидії впровадженню нових підходів, зокрема — цифрових платформ збору й аналізу показників, автоматизації управлінських рішень, оновлення структури відповідальності. Багато працівників на середньому та нижчому рівнях управління сприймають BPM як загрозу своїй звичній ролі або навіть зайнятості. Це спричиняє уповільнення процесів впровадження, ігнорування нових процедур, формальне виконання регламентів без залучення до суті змін. Бар'єр опору змінам особливо посилюється в умовах слабкої корпоративної культури, недостатньої комунікації з боку керівництва та відсутності програм внутрішнього навчання, без попереднього аналізу готовності персоналу до змін BPM-моделі не досягають практичного ефекту.

2. Інформаційна асиметрія. Одним із найменш помітних, але стратегічно небезпечних бар'єрів є нерівномірний розподіл інформації між рівнями управління. На багатьох підприємствах відсутні чіткі регламенти передачі даних, а також існує

вибірковість у поданні звітності, що унеможлиблює своєчасне та об'єктивне прийняття рішень. Це призводить до викривлення реальної картини стану справ на виробництві та знижує ефективність BPM як системи, що базується на фактичних даних. Менеджери середньої ланки часто утримують критичну інформацію, оскільки бояться санкцій або втрати контролю над ситуацією. В результаті верхній рівень управління приймає рішення на основі неповної чи застарілої інформації, що нівелює переваги системного підходу.

3. Недосконалість моніторингу KPI. Хоча формальна наявність KPI задекларована на багатьох підприємствах, у реальності система моніторингу часто носить формальний або фрагментарний характер. Основні проблеми тут полягають у:

- невідповідності показників реальним процесам (наприклад, занадто загальні або непридатні до вимірювання);
- відсутності відповідальності за невиконання KPI або їх штучне завищення;
- дублюванні звітності, що призводить до перевантаження управлінців рутинною звітною роботою.

Частою проблемою є те, що показники не оновлюються в динаміці, а використовуються як «статичні» контрольні цифри, що втрачають актуальність в умовах швидких змін ринкової ситуації або внутрішніх трансформацій.

Усунення виявлених бар'єрів та запровадження ефективної системи Business Performance Management потребує впровадження практичних інструментів, орієнтованих на досягнення вимірюваних результатів. Одним із ключових елементів такої системи є чітке визначення цільових показників ефективності (KPI) або ключових результатів (OKR), які слугують основою для оцінки досягнення стратегічних, тактичних і оперативних цілей на всіх рівнях управління.

У практиці українських металургійних підприємств, зокрема в активах групи «Метінвест», було застосовано методологічну модель поетапного формування системи KPI, адаптовану до специфіки галузі. Така модель передбачає:

1. Встановлення стратегічних цілей на корпоративному рівні, зокрема — зростання EBITDA, зменшення витрат на одиницю продукції, підвищення продуктивності та зниження втрат часу через простої. На цьому етапі формулюються цільові орієнтири для всієї організації, які потім декомпонуються на нижчі рівні.

2. Розподіл цілей за функціональними напрямками: виробництво, логістика, закупівлі, збут, фінанси, охорона праці, інновації тощо. Наприклад, для виробничих підрозділів «Метінвесту» було визначено такі KPI, як коефіцієнт використання доменних печей, витрати коксу на тонну чавуну, обсяг металу з позаплановими дефектами тощо.

3. Формування цілей та показників на рівні конкретних підрозділів та працівників. Це дозволяє забезпечити горизонтальну і вертикальну узгодженість — кожен підрозділ бачить власну відповідальність у досягненні загального результату. Саме така логіка дозволила підприємству запровадити прозору систему моніторингу, де результат кожного виконавця прямо пов'язаний із фінальними бізнес-цілями [43].

Методологічний підхід до визначення вагомості окремих KPI враховує не лише їх значущість, а й вплив на інші показники. Наприклад, зменшення витрат на сировину може бути досягнуто лише за умови стабільної якості продукції, тому відповідні KPI поєднуються в систему взаємозалежних індикаторів. Такий підхід знижує ризик досягнення показника за рахунок погіршення суміжних процесів, що є розповсюдженою помилкою при фрагментарному впровадженні контролю.

Особливістю підходу, реалізованого на підприємствах групи «Метінвест», є також впровадження системи OKR для середньої та вищої управлінської ланки. Це дозволяє формулювати цілі не у вигляді жорстких показників, а як прагнення до амбітних результатів, які можуть змінюватися залежно від динаміки ринку. Наприклад, в одному з виробничих департаментів було визначено OKR щодо зниження кількості інцидентів, пов'язаних із дефіцитом виробничих запасів на 40%

упродовж кварталу — з гнучким переліком заходів, які могли змінюватися за ситуацією [43].

Система KPI/OKR у BPM-концепції виконує не лише функцію контролю, а й функцію узгодження, мотивації та постійного розвитку. Успішний досвід впровадження таких систем підтверджує, що їхнє ефективне застосування можливе лише за умов:

- попередньої діагностики поточної системи управління;
- поступового впровадження — від стратегічного до операційного рівня;
- відкритої комунікації та прозорої логіки оцінки результатів;
- технологічної підтримки — через цифрові платформи збору й візуалізації даних.

Однією з визначальних умов ефективності Business Performance Management є наявність дієвих механізмів зворотного зв'язку, які забезпечують не лише контроль досягнення встановлених показників, а й своєчасне виявлення відхилень, причин їх виникнення та адаптивне коригування управлінських рішень. Зворотний зв'язок у BPM не зводиться до формальної звітності — він стає інструментом динамічного управління й основою для самонавчальної організації.

Оперативність, системність та аналітична якість зворотного зв'язку визначають здатність підприємства своєчасно реагувати на зміни внутрішнього й зовнішнього середовища. На прикладі діяльності металургійного підприємства виявлено, що цикли управлінського реагування до впровадження BPM тривають 30–45 днів, тоді як після впровадження цифрової моделі збору даних і щоденного моніторингу ключових KPI — скорочуються до 3–7 днів. Це дозволяє оперативно виявляти ризики, пов'язані з перевищенням нормативів енергоспоживання, зниженням продуктивності обладнання або відставанням від графіків поставок [45].

Особливої уваги потребує питання характеру зворотного зв'язку, коли не лише топ-менеджмент отримує звіти від підрозділів, а й середня та операційна

ланка отримує візуалізовані дані про результати власної діяльності. Упроваджені цифрові панелі управління (дашборди), що оновлюються в реальному часі, дозволяють працівникам бачити вплив своєї роботи на загальні цілі, тим самим підвищуючи залученість персоналу до процесів управління.

У досвіді металургійних підприємств також реалізовано функцію "коригувального контролю" — спеціальні щотижневі наради з участю лінійних менеджерів, на яких обговорюються причини відхилень від цільових показників, а також приймаються локальні управлінські рішення без затягування у довгі погоджувальні цикли. Такий механізм забезпечує гнучкість управління, особливо в умовах обмежень або змін ринкової кон'юнктури (наприклад, тимчасове зменшення обсягів випуску продукції, перегляд логістичних маршрутів).

Слід підкреслити важливість зворотного зв'язку не лише як пост-фактум аналізу, а як передумови прогнозного управління. Через впровадження алгоритмів прогнозування за допомогою аналітичних платформ підприємство має змогу завчасно виявляти ймовірні «вузькі місця» в циклі виробництва або порушення у постачанні ресурсів, що дозволяє перебудовувати операційні плани без втрат у фінансових результатах.

Сучасні механізми зворотного зв'язку у BPM-системі повинні відповідати низці вимог: бути постійними, цифрово підтриманими, візуалізованими, інтегрованими з системою мотивації та орієнтованими на коригування, а не покарання. Впровадження таких механізмів у практиці металургійного виробництва доводить, що BPM здатен трансформувати культуру управління від реактивної до проактивної, підвищуючи стабільність, контрольованість і адаптивність організації.

Суттєвим каталізатором ефективного впровадження Business Performance Management на підприємствах чорної металургії виступає цифрова трансформація, яка охоплює використання ІТ-платформ, спеціалізованого програмного забезпечення та аналітичних модулів. У сучасних умовах, коли обсяги даних

постійно зростають, а вимоги до швидкості реагування посилюються, BPM без цифрової підтримки втрачає гнучкість, точність і актуальність.

Доречним буде приділити увагу моделі цифрової інтеграції BPM, яка базується на впровадженні наскрізної IT-архітектури — від збору первинних даних у виробничих зонах до аналітичної обробки й візуалізації для керівництва. Концепція “Data-Driven BPM”, відповідно до якої ключові управлінські рішення приймаються на основі об’єктивних, актуальних і автоматично оновлюваних показників є обгрутованим вибором. Це дає змогу не лише здійснювати моніторинг у реальному часі, але й виявляти закономірності, прогнозувати ризики та формувати сценарії дій заздалегідь.

Інтеграційна модель цифрової підтримки BPM передбачає такі функціональні модулі:

1. Систему збору даних з виробничого обладнання (датчики, SCADA, MES);
2. Модулі попередньої обробки та валідації даних, які дозволяють очищати та структурувати інформацію;
3. Аналітичне ядро на базі BI-платформ (Business Intelligence), що забезпечує побудову дашбордів, KPI-панелей, графіків відхилень;
4. Систему підтримки прийняття рішень (Decision Support Systems, DSS), яка генерує управлінські рекомендації на основі трендів і відхилень;
5. Комунікаційно-мотиваційний блок, що пов’язує результати аналітики з інструментами оцінювання персоналу та його стимулювання.

Особливістю моделі є її адаптованість до багаторівневої організаційної структури металургійного підприємства. Вона дозволяє керівникам різних рівнів (від цехів до дирекцій) працювати з єдиною інформаційною базою, але мати доступ лише до релевантних їм індикаторів. Це мінімізує дублювання звітності, усуває ручне втручання в розрахунки та значно підвищує прозорість управлінської інформації.

Крім того, цифрові рішення виступають інфраструктурним підґрунтям для розвитку адаптивного управління, оскільки забезпечують постійну актуалізацію планів, порівняння очікувань із результатами та миттєве коригування дій. Наприклад, системи ВІ дозволяють менеджерам оперативно реагувати на критичне зростання витрат на електроенергію або відхилення в якості продукції, що раніше виявлялося із затримкою в кілька тижнів.

Роль цифрових платформ в системі ВРМ є визначальною: без інформаційно-аналітичної підтримки ВРМ втрачає свою керованість, швидкодію та адаптивність. Використання ІТ-рішень дозволяє не лише автоматизувати функції контролю, а й зробити управління проактивним, орієнтованим на попередження, а не на виправлення. Для підприємств чорної металургії, що функціонують у висококонкурентному, енергоємному та динамічному середовищі, це створює стратегічну перевагу та основу для стійкого розвитку.

Виходячи з проведеного аналізу теоретичних підходів, емпіричних досліджень та практичних прикладів, впровадження Business Performance Management на підприємствах чорної металургії доцільно здійснювати за ступеневою моделлю, яка забезпечує системність, послідовність і адаптивність трансформаційних процесів. Така модель враховує як організаційні, так і технологічні аспекти впровадження та дозволяє поступово формувати стійку та ефективну систему управління змінами.

1. Аналіз готовності підприємства до впровадження ВРМ. На початковому етапі доцільно провести комплексну діагностику поточної системи управління: структури відповідальності, якості управлінських рішень, рівня цифрової зрілості, стану КРІ-системи, а також психологічної готовності персоналу до змін. Особливу увагу слід приділити виявленню опорних змін, інформаційним розривам та фрагментарності процесів прийняття рішень, які є типовими бар'єрами на шляху впровадження ВРМ [42].

2. Впровадження базових елементів BPM. Після оцінки готовності доцільно розпочати з формування системи цілей і показників (KPI/OKR), децентралізації управлінської відповідальності та впровадження механізмів цифрового збору й обробки даних. Як показав досвід компаній групи «Метінвест», навіть базове узгодження KPI між підрозділами та корпоративним центром дозволяє досягти зростання ефективності за рахунок прозорості та цільової орієнтації [43].

3. Налагодження системи моніторингу та зворотного зв'язку. На цьому етапі важливо забезпечити безперервний моніторинг ключових показників, швидкий обіг інформації та регулярні управлінські інтервенції. Цифрові панелі управління та регулярні аналізи відхилень дозволяють оперативно коригувати плани та забезпечують адаптивність системи до змін зовнішнього середовища [5].

4. Коригування моделі з урахуванням реальних результатів. З огляду на динаміку ринку, нестабільність ресурсного забезпечення та технологічні збої, BPM має бути гнучким. На цьому етапі доцільно внести зміни до логіки взаємодії між ланками управління, оптимізувати структуру KPI, актуалізувати цілі та адаптувати моделі прийняття рішень. Слід наголосити на важливості постійного оновлення моделі управління відповідно до стратегічних змін [44].

5. Масштабування BPM-системи на всі рівні підприємства. Заключним етапом має стати інтеграція BPM як повноцінної управлінської парадигми у всі ключові процеси: виробництво, логістику, фінанси, маркетинг, людські ресурси. Цей етап передбачає не лише технічне розширення системи, а й зміну управлінської культури: перехід від формального управління до управління через цілі, результати та зворотний зв'язок. Саме поетапне масштабування з урахуванням локальної специфіки дозволяє сформувати життєздатну та гнучку систему BPM [47, 48, 49].

Впровадження BPM доцільно розглядати не як разову ініціативу, а як довгострокову трансформаційну програму, що охоплює всі сфери управлінської діяльності та базується на принципах прозорості, адаптивності, орієнтації на результат і цифрової підтримки.

Зважаючи на результати аналізу та особливості виробничо-організаційного середовища підприємств чорної металургії, доцільно виокремити низку практичних інструментів, які можуть бути ефективно використані для забезпечення повноцінного функціонування системи Business Performance Management у цій галузі. Ці інструменти не лише відображають загальні принципи BPM, а й адаптовані до умов високої капіталомісткості, енергоємності, технологічної складності та багаторівневої структури управління, притаманних металургійному виробництву.

Перш за все, важливо впровадити інтегровану цифрову панель показників ефективності (KPI Dashboard), яка дозволяє в реальному часі відстежувати ключові параметри: витрати на одиницю продукції, коефіцієнт використання основного устаткування, обсяги браку, споживання енергоресурсів, рентабельність по підрозділах тощо. Використання такої візуалізованої системи забезпечує як прозорість контролю, так і мотивацію середньої ланки менеджменту через чітке розуміння впливу поточних результатів на загальні цілі підприємства.

Другим важливим інструментом є система автоматизованого аналізу відхилень із вбудованими тригерами для управлінських інтервенцій. Така система повинна виявляти критичні відхилення від цільових параметрів і ініціювати коригувальні дії без втрати часу на багатоетапне погодження [45].

Наступним адаптивним інструментом виступає індикативна система OKR для керівників середньої ланки, яка дозволяє запроваджувати цільове управління з урахуванням динаміки ринкової кон'юнктури та зміни внутрішніх умов. Поєднання жорсткої системи KPI для виробництва з гнучкою системою OKR для функціональних і підтримувальних підрозділів дозволяє підвищити гнучкість без втрати контрольованості [43].

Окрему роль у BPM відіграє внутрішньокорпоративна система навчання та розвитку управлінських компетенцій. Її впровадження є відповіддю на виявлений опір змінам з боку персоналу, зумовлений страхом втрати контролю або

невизначеністю у новій системі. Через модулі тренінгів, симуляцій, наставництва та KPI-гейміфікації можливо сформувати культуру відповідальності та проактивного управління, що є базою для сталого функціонування BPM [42].

Крім того, важливо забезпечити інтеграцію IT-рішень у загальний інформаційний контур підприємства — зокрема, поєднання BI-платформ (Power BI, Tableau тощо) із виробничими системами (SCADA, MES) та ERP. Це дозволить реалізувати принцип «єдиного цифрового джерела правди», де кожен показник має чітке походження, методику розрахунку та зберігається в єдиній інформаційній системі. Такий підхід був успішно реалізований у ряді міжнародних кейсів [47, 48, 49].

Висновки. Управління організаційними змінами на підприємствах чорної металургії потребує принципово нового підходу, здатного поєднувати стратегічну орієнтацію, оперативну ефективність та адаптивність до динамічного середовища. У цьому контексті концепція Business Performance Management (BPM) виступає не лише як інструмент, а як управлінська парадигма, що дозволяє здійснювати цілісне перетворення системи управління, орієнтоване на досягнення вимірюваних результатів.

В ході проведеного дослідження виявлено основні передумови впровадження BPM, типові бар'єри, інструменти та механізми цифрової трансформації. Особливу увагу приділено кейсу Групи «Метінвест» як одному з найрепрезентативніших прикладів масштабного запровадження BPM у галузі чорної металургії.

Ключовим підсумком дослідження є розробка адаптованої моделі впровадження BPM, що може слугувати дорожньою картою для підприємств галузі. Вона сформована на основі синтезу методологічних підходів. Застосування цієї моделі дозволяє не лише вирішити типові проблеми впровадження змін, такі як опір персоналу чи інформаційна асиметрія, але й сформувати систему управління нового покоління — відкриту до інновацій, орієнтовану на результат і стійку до зовнішніх викликів.

2.2 Організаційні засади впровадження металургійних кластерів та відновлення промислового потенціалу України на основі розвитку водневих технологій

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. В сучасних умовах вагомим значення набувають проблеми пошуку альтернативних, найбільш безпечних, технологій в металургійній промисловості. Це пов'язано із вектором розвитку світової економіки на екологізацію виробництв, світовими тенденціями впровадження «зелених» технологій тощо.

В промислових зонах, портах та містах, активно створюються водневі кластери, зокрема у металургії, де вони сприяють інтеграції виробництва та споживання, скорочуючи витрати на транспортування та інфраструктуру. Оскільки головною проблемою водневої економіки залишається висока собівартість водню [50], кластеризація виробництва, включаючи водневі долини (hydrogen valleys) та хаби (hydrogen hubs), дозволяє знизити витрати завдяки ефекту масштабу, централізованій логістиці та спільному використанню ресурсів. Крім того, такий підхід підвищує інвестиційну привабливість водневих проєктів і сприяє їх фінансуванню, що пришвидшує впровадження технологій у важкій промисловості, включаючи металургійний сектор.

Отже, можна констатувати, доцільність впровадження кластерного підходу на основі використання водневих технологій у чорну металургію України з метою нарощення її конкурентоспроможності. З урахуванням зазначеного, напрям даного дослідження можна вважати актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз досліджень і публікацій з окресленої проблематики показав, що напрям даного дослідження виступає предметом наукових дискусій [51-54], а також ґрунтовних теоретичних досліджень [55-59]. В той же час, доречно підкреслити, наявність вагомих аналітичних

здобутків. Так, дослідження в *European Cluster Panorama 2021* [60] аналізує роль кластерів у сприянні економічній стійкості, зеленому та цифровому переходу в Європі, використовуючи такі методології, як статистичне картографування кластерів, типологізацію регіонів і оцінку конкурентоспроможності. Основні результати показують, що кластери відіграють ключову роль у підтримці інновацій, міжнародного співробітництва та адаптації до нових екологічних і цифрових стандартів, особливо для малих і середніх підприємств. Близько 70% членів кластерів – це малі та середні підприємства, які отримують доступ до нових ринків і технологій.

Основні результати, описані у *EcoCluP Booklet* [61, 62], демонструють успішний розвиток міжнародної співпраці екологічних кластерів у Європі. Проект об'єднав понад 30 кластерних організацій, створив понад 500 партнерських зв'язків між компаніями та дослідницькими установами та сприяв інтернаціоналізації понад 300 малих і середніх підприємств у сфері екологічних інновацій. Також було впроваджено інструменти для підтримки інновацій, проведено серію тренінгів із залучення інвестицій та створено міжнародні бізнес-стратегії для кластерів-учасників.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується дослідження. Незважаючи на значну кількість досліджень, присвячених питанням підвищення конкурентоспроможності металургійних кластерів на основі розвитку водневих технологій, все ж таки, зазначену проблематику не можна вважати остаточно вирішеною. Таке зауваження ґрунтується на тому, що в існуючих дослідженнях майже відсутня прикладна доказовість та наочне відображення перспектив впровадження водневих технологій в металургійну промисловість.

Формулювання цілей дослідження. Метою статті є визначення стратегічних підходів до впровадження водневих технологій у металургійну галузь України. Дослідження спрямоване на розробку моделей створення водневих кластерів,

оцінку їх економічної доцільності та впливу на екологічну стійкість виробництва. Також ставиться завдання окреслити ключові виклики та можливості для реалізації водневих проєктів у контексті військових ризиків та міжнародних тенденцій.

Виклад основного матеріалу. За останніми даними, частка металургійної продукції у структурі експорту України знижувалась з 35,3% у 2019 році до 14,6% у 2023 році [63] (джерело [64] каже, навіть, про 7,42%). Не дивлячись на це металургійна промисловість України залишається стратегічно важливою галуззю економіки, яка суттєво впливає на експортний потенціал. Основними центрами металургійного виробництва є Запоріжжя, Кам'янське, Кривий Ріг, де зосереджені виробничі потужності Групи Метінвест — найбільшого гравця у цій галузі. Група Метінвест є вертикально інтегрованою компанією, яка об'єднує видобуток руди, виробництво металу та його подальшу реалізацію. Основні активи компанії розташовані у Кривому Розі (гірничозбагачувальні підприємства) та Запоріжжі і Кам'янському (виробництво сталі). З огляду на стратегічне розташування активів та наявність розвиненої логістичної інфраструктури, Метінвест має всі передумови для впровадження водневих технологій у виробництво сталі, а тому саме на базі підприємств Метінвесту пропонується впроваджувати розроблені напрями удосконалення.

При цьому пропозиції щодо відновлення промислового потенціалу України та забезпечення конкурентоспроможності металургійних кластерів на основі розвитку водневих технологій можуть бути систематизовані за наступними, сформульованими нижче, групами [65-67].

Підходи до створення та оптимізації металургійного кластеру. Запропонований кластерний підхід передбачає комплексну модернізацію металургійної галузі через інтеграцію водневих технологій. Дослідження технічного стану виробничих потужностей металургійних підприємств у Запорізькій та Дніпропетровській областях дозволило визначити можливості їх модернізації, зокрема заміну застарілих коксових технологій на водневі процеси

виробництва сталі, що сприятиме значному зниженню викидів CO₂ та підвищенню екологічної ефективності виробництва.

Виробництво зеленого водню. Аналіз регіональних енергетичних ресурсів показав, що найбільш доцільним є виробництво водню методом електролізу з використанням відновлюваної енергії (сонячної та вітрової), що робить південні та південно-східні регіони України оптимальними для розміщення водневих установок. Це відкриває перспективи для створення повноцінної інфраструктури "зеленої" металургії та інтеграції українських підприємств у глобальні низьковуглецеві виробничі ланцюги.

Створення водневої логістичної мережі. Створення водневої логістичної мережі передбачає будівництво спеціалізованих трубопроводів для транспортування водню від локального місця виробництва до основних металургійних центрів (Кривий Ріг, Запоріжжя), що дозволить знизити витрати порівняно з використанням авто- та залізничного транспорту.

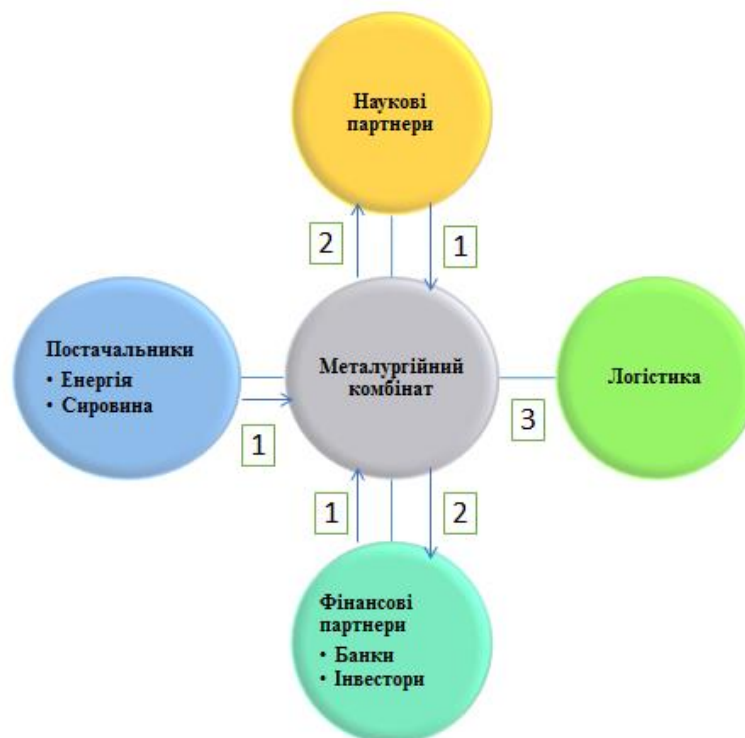
Модернізація виробничих потужностей металургійних підприємств. Модернізація виробничих потужностей передбачає перехід від традиційних технологій на базі коксового вугілля до використання водню як відновлювального агента, що значно зменшить викиди CO₂ та підвищить екологічну ефективність виробництва.

Створення науково-дослідних центрів на базі провідних університетів України з включенням ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» для розробки нових технологій та підготовки кваліфікованих кадрів для роботи у водневій промисловості. Це дозволить підвищити рівень кваліфікації працівників та забезпечити галузь висококваліфікованими спеціалістами.

Залучення іноземних інвестицій та кооперація з міжнародними партнерами для спільного розвитку водневої інфраструктури та впровадження передових

технологій. Це зменшить фінансове навантаження на українські підприємства та сприятиме швидшому впровадженню нових рішень.

Географічний аналіз розташування активів та їхньої доступності до джерел енергії й транспортної інфраструктури дозволив визначити основні географічні переваги та обмеження території. Дослідження просторового розміщення економічних ресурсів, інфраструктури та виробничих потужностей дало змогу оцінити вплив регіональних факторів на ефективність розміщення підприємств і можливості їхньої інтеграції у виробничі ланцюги. Виявлено, що наявність природних ресурсів, розвинена транспортна мережа та близькість до ринків збуту є ключовими чинниками для формування кластерів. Це забезпечило систематичну оцінку територіальних умов, необхідних для економічного розвитку регіону та стратегічного планування промислових об'єктів (рис. 2.2).



1 – вхідний потік; 2 – вихідний потік; 3 – сталий зв'язок

Рисунок 2.2 – Кластер металургійного комбінату

Розроблено три сценарії розвитку кластеру з урахуванням різних рівнів інвестицій та технологічної модернізації (рис. 2.3):




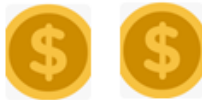





Сценарій	Рівень інвестицій	Модернізація	Орієнтація
Базовий	Мінімальні 	тільки критичних ділянок виробництва 	на локальний ринок з поступовим переходом на часткове використання водню 
Оптимальний	Середні 	основних виробничих потужностей, створення інфраструктури для виробництва та транспортування водню 	на розширення експортних можливостей за рахунок зниження викидів CO ₂ 
Інноваційний	Максимальні 	створення водневих кластерів з інтеграцією новітніх технологій 	на міжнародні стандарти екологічної сталості та вихід на нові ринки з конкурентоспроможною продукцією 

Рисунок 2.3 – Інфографіка можливих сценаріїв

- **Базовий сценарій:** мінімальні інвестиції, модернізація тільки критичних ділянок виробництва. Орієнтація на локальний ринок з поступовим переходом на часткове використання водню.

- **Оптимальний сценарій:** середній рівень інвестицій, модернізація основних виробничих потужностей, створення інфраструктури для виробництва та транспортування водню. Орієнтація на розширення експортних можливостей за рахунок зниження викидів CO₂.

- **Інноваційний сценарій:** максимальні інвестиції в повну модернізацію підприємств, створення водневих кластерів з інтеграцією новітніх технологій. Орієнтація на міжнародні стандарти екологічної сталості та вихід на нові ринки з конкурентоспроможною продукцією.

Метод моделювання сценаріїв передбачає створення кількох можливих варіантів розвитку подій для прогнозування наслідків певних управлінських рішень та стратегій. Він дозволяє оцінити ризики, ефективність інвестицій та технологічні перспективи для кожного сценарію, враховуючи різні рівні фінансування та модернізації. Використання цього методу допомагає адаптувати стратегії під конкретні умови ринку та зробити найбільш обґрунтований вибір варіанту впровадження кластерного підходу в металургійній галузі.

Економічна оцінка та фінансова ефективність. Розраховано вартість створення водневого кластеру для металургійних підприємств Групи Метінвест у межах 2,0–2,5 млрд євро. Вартість одного електролізера потужністю 100 МВт становить близько 100 млн євро, а загальний термін окупності проекту прогнозується у 8-10 років за умови зростання попиту на "зелену" сталь. Аналіз фінансових ризиків включає оцінку впливу вартості електроенергії, сировини та змін ринкових умов на економічну ефективність проекту. Важливим чинником стало залучення іноземних інвестицій та кооперація з міжнародними партнерами, що зменшить фінансове навантаження на українські підприємства та сприятиме швидшому впровадженню передових технологій.

Результати сценарного моделювання дозволили сформулювати організаційні засади впровадження водневого кластеру з використанням активів Групи Метінвест, представлені у вигляді програми, розрахованої на 10 років (рис. 2.4).

Перший етап (1-2-й роки):

- Проведення детального техніко-економічного обґрунтування проекту.
- Розробка проєктної документації.
- Пошук та залучення інвестиційних ресурсів.
- Вибір місця для будівництва водневих виробничих потужностей.

Другий етап (3-4-й роки):

- Будівництво водневих електролізерів.
- Створення мережі для транспортування водню.

- Підготовка кадрів та проведення навчальних програм для співробітників.

Третій етап (5-6-й роки):

- Запуск виробничих потужностей з випуску зеленої сталі.
- Оптимізація логістичних процесів постачання водню.
- Впровадження резервних систем зберігання водню та забезпечення безпеки об'єктів.

Четвертий етап (7-10-й роки):

- Підключення кластеру до міжнародних ринків та налагодження експорту продукції.
- Оцінка ефективності роботи кластеру та розробка рекомендацій для подальшого розвитку.

Етап	Роки									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Проведення детального техніко-економічного обґрунтування проєкту	■	■								
Розробка проєктної документації	■	■								
Пошук та залучення інвестиційних ресурсів	■	■								
Вибір місця для будівництва водневих виробничих потужностей	■	■								
Будівництво водневих електролізерів			■	■						
Створення мережі для транспортування водню			■	■						
Підготовка кадрів та проведення навчальних програм для співробітників			■	■						
Запуск виробничих потужностей з випуску зеленої сталі					■	■				
Оптимізація логістичних процесів постачання водню					■	■				
Впровадження резервних систем зберігання водню та забезпечення безпеки об'єктів					■	■				
Підключення кластеру до міжнародних ринків та налагодження експорту продукції							■	■	■	■
Оцінка ефективності роботи кластеру та розробка рекомендацій для подальшого розвитку							■	■	■	■

Рисунок 2.4 – Діаграма Ганта впровадження водневого кластеру в умови підприємства Групи Метінвест

Запропонований підхід поєднує технологічні, економічні та інфраструктурні аспекти створення водневого кластеру, що сприятиме зниженню викидів CO₂, покращенню конкурентоспроможності української металургії та її інтеграції у світову низьковуглецеву економіку.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Отже, за результатами проведеного дослідження можна зробити наступні висновки:

1. Створення водневих кластерів на основі активів Групи Метінвест є перспективним напрямом розвитку зеленої металургії в Україні, що дозволяє скоротити викиди CO₂, зменшити енерговитрати та підвищити конкурентоспроможність на світових ринках.

2. Запровадження водневих технологій сприятиме зниженню залежності від традиційних викопних енергоносіїв, таких як вугілля та природний газ, що особливо важливо в умовах геополітичної нестабільності.

3. Інтеграція водневих кластерів у металургійну галузь України сприятиме збільшенню виробництва зеленої сталі, яка користується попитом на ринках Європи та США, що позитивно вплине на експортний потенціал країни.

4. Реалізація проєкту водневого кластеру передбачає значні інвестиції в створення водневої інфраструктури, включаючи виробничі потужності, транспортні мережі та системи зберігання. Проте, згідно з розрахунками, повна окупність може бути досягнута через 8-10 років.

5. Військові ризики та небезпеки в умовах збройної агресії потребують додаткових заходів з безпеки, включаючи створення резервних систем постачання водню, використання підземних сховищ для зберігання та розробку захисних споруд для водневих виробничих об'єктів.

6. Наукова новизна дослідження полягає в комплексному підході до організації водневого кластеру для металургійної галузі України з урахуванням воєнних умов та потенційних ризиків військової агресії. Запропоновано модель, що

поєднує використання відновлюваних джерел енергії для виробництва водню та його подальше використання у виробництві сталі.

7. Результати роботи можуть бути використані для розробки стратегічних планів модернізації металургійних підприємств України, а також для створення державної програми підтримки водневої енергетики. Рекомендації з економічної оцінки можуть бути корисними для інвесторів при оцінці потенціалу водневих проєктів.

8. Результати дослідження свідчать про необхідність розробки нових технологічних рішень для ефективного транспортування та зберігання водню. Умови воєнного часу створюють додаткові ризики, що вимагають підвищеної уваги до безпеки інфраструктури та її захисту.

2.3 Висновки до розділу 2

1. Business Performance Management (BPM) є ефективною управлінською парадигмою для підвищення прозорості, результативності та адаптивності металургійних підприємств, зокрема в умовах високої капіталомісткості та багаторівневої структури галузі.

2. Цифрова інтеграція BPM дозволяє формувати єдиний інформаційний контур управління, скорочувати цикл прийняття рішень у 5–10 разів, підвищуючи гнучкість реагування на внутрішні та зовнішні зміни.

3. Бар'єри впровадження BPM (опір змінам, інформаційна асиметрія, формальний моніторинг KPI) потребують системної діагностики, кадрового навчання та поступового розгортання моделей KPI/OKR на всіх рівнях управління.

4. Кластерний підхід на основі водневої інтеграції є перспективним механізмом відновлення промислового потенціалу України, зокрема у регіонах Запоріжжя, Кам'янського та Кривого Рогу, де зосереджені активи Групи Метінвест.

5. Інфраструктура водневого кластеру, що включає електролізери, водневу логістику та модернізовані потужності з виробництва «зеленої сталі», здатна забезпечити декарбонізацію галузі з прогнозованою окупністю проєкту 8–10 років.

6. Розроблена поетапна програма впровадження водневого кластеру, яка охоплює техніко-економічне обґрунтування, будівництво, запуск, масштабування та експорт, може стати основою державної стратегії розвитку водневої металургії в Україні.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. У межах дослідження вирішено актуальну науково-практичну проблему підвищення екологічної, енергетичної та ресурсної ефективності металургійного виробництва в умовах післявоєнної відбудови України. Шляхом інтеграції малогабаритних доменних печей, цифрових систем моніторингу, технологій безвідходної переробки та інструментів ВРМ забезпечено комплексну модернізацію виробничих процесів зі зниженням викидів, витрат та підвищенням гнучкості управління. Результати можуть бути безпосередньо впроваджені на підприємствах металургійного кластеру для досягнення декарбонізаційних цілей і відповідності європейським вимогам СВМ.

2. Встановлено, що малогабаритні доменні печі об'ємом до 1000 м³, зокрема типу MBF і Micro BF, є ефективним інструментом для комплексної утилізації шламів і відходів металургії та вуглезбагачення. У рамках дослідження підтверджено технічну та економічну доцільність експлуатації комплексу з піччю об'ємом 70 м³, який забезпечує виробництво до 100 тис. т передільного чавуну на рік за питомих витрат: 2,01 т вуглецевмісних окатишів, 0,35 т коксу та 31 кВт·год електроенергії на 1 т чавуну.

3. Показано, що використання технології безобпалювальних вуглецевмісних окатишів дозволяє утилізувати до 80% металургійних і до 20% вуглезбагачувальних шламів із коефіцієнтом використання об'єму печі на рівні 0,3. Це сприяє зниженню споживання природного газу, коксу, технічної води (до 0,23 м³/т) та забезпечує замкнутий цикл водопостачання і власну генерацію електроенергії (1,5 МВт).

4. Встановлено, що традиційне аглодоменне виробництво з мартенівським переділом утворює до 2390 кг/т CO₂, 80 кг/т CO, 65 кг/т пилу, 70 кг/т SO₂ і 20 кг/т NO_x, тоді як технологія Midrex + ЕДСП — відповідно лише 500, 11, 6, 6 і 3 кг/т, тобто зменшує основні викиди у 4–5 разів. Це критично важливо в контексті дії СВМ і глобального переходу до декарбонізованої сталі.

5. Доведено, що впровадження автоматизованих систем моніторингу викидів (АСУ) на підприємствах (на прикладі ПАТ «Запоріжсталь») дозволяє щоденно контролювати параметри викидів у реальному часі, використовуючи датчики Durag D-R 808 та Sintrol S304. Це забезпечує об'єктивність екологічного контролю, підвищує ефективність управлінських рішень та дозволяє здійснювати бенчмаркінг із сучасними технологіями.

6. Розроблено математичні моделі зміни концентрації емульсолу та вмісту механічних домішок у процесі холодної прокатки на базі MATLAB. Найточніші моделі — квадратичні залежності з R^2 до 0,886. Встановлено, що критичне значення вмісту домішок (0,05%) не перевищується при концентрації емульсолу близько 2,34–4,19%, що дозволяє знизити ймовірність утворення дефектів на поверхні прокату.

7. Виконано комплексну оцінку впровадження Business Performance Management (BPM) у чорній металургії. На прикладі активів Групи Метінвест встановлено, що застосування KPI/OKR, цифрових дашбордів і інтегрованих систем дозволяє скоротити цикл ухвалення рішень із 30–45 до 3–7 днів, забезпечити оперативне реагування, зниження втрат і формування культури відповідальності за результат.

8. Обґрунтовано, що формування водневого кластеру з використанням активів Групи Метінвест у Запоріжжі, Кам'янському та Кривому Розі дозволяє досягти скорочення викидів CO₂ до 70%, зниження енерговитрат і підвищення експортного потенціалу української «зеленої» сталі. Орієнтовна вартість проєкту — 2,0–2,5 млрд євро, термін окупності — 8–10 років. Розроблено чотириетапну програму кластеризації з урахуванням геополітичних ризиків та інфраструктурних обмежень.

9. Результати науково-дослідної роботи опубліковані також у роботах [68-111]. Основні результати впроваджено у навчальний процес ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» у 2024-2025 навчальному році (див. Додаток).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Смірнов О. М., Семенко А. Ю., Скоробагатько Ю. П., Горюк М. С. Основи металургії: виробництво чавуну. Одеса: Олді+, 2023. 192 с.
2. Naito M., Takeda K., Matsui Y. Ironmaking technology for the last 100 years: deployment to advanced technologies from introduction of technological know-how, and evolution to next-generation process. *ISIJ International*. 2015. Vol. 55 No. 1. P. 7–35. DOI: 10.2355/isijinternational.55.7
3. Engel E., van Straaten V., Vaynshteyn R. Modern mini and compact blast furnaces: operations-based design considerations. *Proceedings of the Ironmaking, Iron Ore and Agglomeration Seminars: 45° Ironmaking, 16° Iron Ore, 3° Agglomeration*. 2015. Vol. 45 No. 45. P. 237–245. DOI: 10.5151/4444-4444-26401
4. Adilson de Castro J., Medeiros G. A. d., Oliveira E. M. d., de Campos M. F., Nogami H. The mini blast furnace process: an efficient reactor for green pig iron production using charcoal and hydrogen-rich gas: a study of cases. *Metals*. 2020. Vol. 10 No. 11. P. 1501. DOI: 10.3390/met10111501
5. Yanping B., Shiqi L. Steelmaking. In: Kuangdi X. (ed.) *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Singapore: Springer 2024. P. 2038–2043. DOI: 10.1007/978-981-99-2086-0_995
6. What is steel and how is steel made? 2020. EUROFER [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.eurofer.eu/about-steel/learn-about-steel/what-is-steel-and-how-is-steel-made>
7. Satyendra. Use of direct reduced iron in electric arc furnace. IspatGuru [Електронний ресурс]. 2013. Режим доступу: <https://www.ispatguru.com/use-of-direct-reduced-iron-in-electric-arc-furnace>
8. Reufer F., Gantenberg M., Bertling R., Schieber G. Compact blast furnace as a modern alternative for iron-making also in minimills. *Stahl und Eisen*. 1999. Vol. 119. No. 11. P. 45–50

9. Engel E. Modern mini and compact blast furnaces: operations-based design considerations. *Associacao Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineracao* [Електронний ресурс]. 2017. 9 р. Режим доступу: <https://onemine.org/documents/modern-mini-and-compact-blast-furnaces-operations-based-design-considerations>
10. Satyendra. Mini blast furnace and iron making. IspatGuru [Електронний ресурс]. 2016. Режим доступу: <https://www.ispatguru.com/mini-blast-furnace-and-iron-making>
11. Кияшко В. Т., Салій І. В., Яковенко Л. О., Малиновський Ю. О. Перспективні напрями утилізації відходів гірничо-збагачувального виробництва. *Екологічні науки*. 2020. № 4(31). С. 103–106. DOI: 10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.15
12. Ожогін В. В., Ковалевський І. А., Тарасюк Л. І., Семакова В. Б. Спосіб і установка для переробки залізовмісних відходів металургійного виробництва. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2020. Вип. 39. С. 18–26. DOI: 10.31498/2225-6733.39.2019.20103
13. Yongyi Y., Hegui D., Keng W., Jianliang Z., Kuangdi X. Blast furnace ironmaking. In: Xu K. (ed.) *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. Singapore: Springer 2023. P. 1–8. DOI: 10.1007/978-981-19-0740-1_1006-1
14. Kardys G. Ironmaking 101 – from ore to iron with blast furnaces. *GlobalSpec* [Електронний ресурс]. 2017. Режим доступу: <https://insights.globalspec.com/article/6746/ironmaking-101-from-ore-to-iron-with-blast-furnaces>
15. Gu H., Huang A., Zou Y., Yang S., Fu L. Thermodynamic analysis and experimental verification of the direct reduction of iron ores with hydrogen at elevated temperature. *Journal of Materials Science*. 2022. Vol. 57. P. 20419–20434. DOI: 10.1007/s10853-022-07855-9
16. Cavaliere P. Blast furnace: most efficient technologies for greenhouse

emissions abatement. In: Cavaliere P. (ed.) *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes*. Cham: Springer 2019. P. 167–273. DOI: 10.1007/978-3-030-21209-4_4

17. Маланчук З. Р., Маланчук Є. З., Корнієнко В. Я. Спеціальні технології видобутку корисних копалин: навч. посіб. Рівне: Нац. ун-т вод. госп-ва та природокористування, 2023. 266 с.

18. Чайка О. Л., Корнілов Б. В., Москалина А. О., Лебідь В. В., Ізюмський М. М., Джигота М. Г. Аналіз скорочення викидів діоксиду вуглецю з доменної печі в умовах використання перспективних та існуючих технологій доменної плавки. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 158–174. DOI: 10.52150/2522-9117-2023-37-158-174

19. Тубольцев Л. Г., Чайка О. Л., Бабаченко О. І. Перспективи розвитку металургійного виробництва в Україні за рахунок використання нових технологій. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2023. Вип. 37. С. 4–25. DOI: 10.52150/2522-9117-2023-37-4-25

20. Sidhartha S., Rahul B., Gour G. R., Prodip K. S. Modeling MIDREX based process configurations for energy and emission analysis. *Steel Research International*. 2018. Vol. 89 No. 2. P. 1–60. DOI: 10.1002/srin.201700248

21. Cecilia B., Lionel F. EU in search of a Carbon Border Adjustment Mechanism. *Energy Economics*. 2023. T. 1 No. 1. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.eneco.2023.106673

22. Jishkariani G., Jandieri G., Sakhvadze D., Tavadze G., Zakharov G., Onishvili G., Aslamazishvili Z. Ecological Problems Related to Mining-Metallurgical Industries and Innovatory, Energy-Efficient Ways of Solving Them. *Engineering*. 2012. Vol. 4 No. 2. P. 83–89. DOI: 10.4236/eng.2012.42011

23. Zhang H. Ecological Restoration and Key Technologies in High-Diving Mining Areas. *International Journal of Natural Resources and Environmental Studies*. 2025. Vol. 5. No. 2. P. 41–50. DOI: 10.62051/ijnres.v5n2.05

24. Kukhar V., Malii Kh., Spichak O. Influence of emulsols type on energy-power consumption and surface contamination at DC01 steel cold rolling on the continuous four-

stand mill. *Problems of Tribology*. 2022. Vol. 27 No. 4/106-2022. P. 19–26. DOI: 10.31891/2079-1372-2022-106-4-19-26

25. Kukhar V., Korenko M., St'opin V., Karmazina I., Elchaninov A., Hurkovska S., Prysiashnyi A., Zubrytskyi V. Operation Modes of Electric Motors of Reversing Cold Rolling Mill 1680 while Rolling with Emulsions. *2019 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine: Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, September 23–25, 2019. P. 46–49. DOI: 10.1109/MEES.2019.8896465

26. Kukhar V., Spichak O., Karmazina I., Malii K., Gribkov E., Dobronosov Y. Synthesis Analysis of Energy Intensity Dependence for Tandem Mills Thin-Plate Rolling on Various Grade Emulsols Rheological Properties. *2023 IEEE 5th International Conference on Modern Electrical and Energy System (MEES)*. Kremenchuk, Ukraine, 2023. P. 1–4. DOI: 10.1109/MEES61502.2023.10402500

27. Antonicelli M., Liuzzo U., Palumbo G. Evaluation of the Effect of a Natural-Based Emulsion on the Cold Rolling Process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. 2023. Vol. 7, Issue 4. P. 121. DOI: 10.3390/jmmp7040121

28. Shirizly A., Lenard J. G. Emulsions Versus Neat Oils in the Cold Rolling of Carbon Steel Strips. *Journal of Tribology*. 2000. Vol. 122, Issue 3. P. 550–556. DOI: 10.1115/1.555400

29. Wang J., Wan S., Yi G., Yu X., Shan Y. Microstructural Evolution of Emulsion-Lubricated Cold-Rolled Steel Interface. *ACS Applied Engineering Materials*. 2024. Vol. 2, Issue 8. P. 2201–2218. DOI: 10.1021/acsaenm.4c00374

30. Tieu A., Kosasih P. Experimental and numerical study of O/W emulsion lubricated strip rolling in mixed film regime. *Tribology Letters*. 2007. Vol. 25. P. 23–32. DOI: 10.1007/s11249-006-9131-7

31. Николаев В.А. Трение и технологические смазки при прокатке. Запорожье : РИО ЗГИА, 2002. 114 с.

32. Smeulders B., Zhu B., Song Z., Zhang D., Melsen J., Schellingerhout P. Friction

and surface microstructure in steel cold rolling investigated in pilot mill trials. *Iron & Steel Technology*. 2018. Vol. 15, No. 2. P. 60–68

33. Taheri R. Cold rolling lubrication efficacy and anti-coalescence stability of composite TiO₂-SiO₂ nanoparticle-stabilised soybean oil-in-water emulsions: a thesis submitted in fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy from the University of Wollongong: March 2021. Wollongong. 214 p.

34. Krimpelstätter K., Bergmann M., Pröll C. Primetals' lubrication expertise boosts new innovation in hot and cold rolling. *10th International Rolling Conference and 7th European Rolling Conference*, Graz, Austria, June 6–9, 2016. P. 35–39

35. Krimpelstätter K., Flaxa A. Minimum Quantity Roll-Gap Lubrication System — Field of Large Potential to Reduce Your OPEX. *The Iron and Steel Technology Conference and Exposition: AISTech 2013 Proceedings*, Pittsburgh, 5–9 May, 2013. P. 1655–1662

36. Капланов В.І., Лепорська Н.В., Шемякін А.В., Капанова Є.В. Дослідження мінімально можливої концентрації водних емульсій при холодній прокатці тонких смуг. *Вісник Приазовського державного технічного університету*. Маріуполь, 2004. № 14. С. 1–6

37. Василев Я. Д., Замогильний Р. О., Самокиш Д. М. Інженерна методика визначення антифрикційної ефективності емульсолів для холодної прокатки по їх фізико-хімічним властивостям. *Теорія і практика металургії*. 2018. № 6. С. 15–21

38. Mekicha M. A. Wear particles formation in cold rolling. PhD Thesis – University of Twente. Enschede: University of Twente, 2021. 143 p.

39. Sun J.L., Zhang B.T., Dong C. Effects of ferrous powders on tribological performances of emulsion for cold rolling strips. *Wear*. 2017. Vol. 376–377, Part A. P. 869–875. DOI: 10.1016/j.wear.2016.12.012

40. Jin Sh., Li X., Gao H., Wang P., Zhang D. Analysis and Prospects of Lubrication and Friction Characteristics in Cold Strip Rolling: A Review. *Steel Research International*. 2024. DOI: 10.1002/srin.202400258

41. Shkrabak I., Kharchenko O., Oslopova M., Kalchenko M., Kosenko Y., Matvienko V. Integration of informatics with organizational design and marketing strategies to enhance the effectiveness of managing economic potential and sales in modern enterprises. *Library Progress International*. 2024. Vol. 44. No. 3. P. 11391–11405. URL: <https://bpasjournals.com/library-science/index.php/journal/article/view/2448/1599>

42. Шкрабак І. В., Харченко О. С. Шляхи пом'якшення криз при зміні організацією стадій життєвого циклу. *Інтелект XXI*. 2024. № 3. С. 44–49. URL: http://www.intellect21.nuft.org.ua/journal/2024/2024_3/8.pdf

43. Шкрабак І. В. Організаційно-управлінська реструктуризація металургійних підприємств при переході до проектного управління забезпеченням їх стратегічного розвитку. *Сталий розвиток економіки*. 2024. № 4(51). С. 349–354. DOI: 10.32782/2308-1988/2024-51-49

44. Харченко О. С. Адаптація маркетингових стратегій до нових споживацьких реалій України. *Інтелект XXI*. 2024. № 4. С. 66–71. DOI: 10.32782/2415-8801/2024-4.10

45. Шкрабак І. В. Підвищення ефективності організаційно-управлінської реструктуризації підприємства шляхом збільшення залученості персоналу. *Інтелект XXI*. 2024. № 4. С. 120–124. DOI: 10.32782/2415-8801/2024-4.18

46. Харченко О. С. Стратегії брендингу закладів вищої освіти в Україні в умовах демографічної кризи. *Сталий розвиток економіки*. 2025. № 3(54). DOI: 10.32782/2308-1988/2025-54-55

47. Шкрабак І. В. Підвищення ефективності перепроєктування робіт в організації на основі залученості персоналу. *Research in Science, Technology and Economics: Collection of Scientific Papers "International Scientific Unity" with Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference*. March 5–7, 2025. Luxembourg, Luxembourg. P. 237–239. URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2025/03/Luxembourg_Luxembourg_05.02.25.pdf

48. Харченко О. С. Етичні аспекти персоналізації та використання даних у маркетингових комунікаціях. *Modern Science, Economy and Digital Innovation: Collection of Scientific Papers "International Scientific Unity" with Proceedings of the 2nd International Scientific and Practical Conference*. March 12–14, 2025. Bucharest, Romania. P. 145–147. URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2025/03/Bucharest_Romania_12.03.25.pdf

49. Харченко О. С. Зелене відмивання в маркетингу: сучасні виклики та проблеми регулювання. *Modern Trends in the Development of Economy, Technology and Industry*. 2025. 09 April. URL: https://isu-conference.com/wp-content/uploads/2025/04/Toronto_Canada_09.04.25.pdf

50. Кудря С. О., Іванченко І. В., Петренко К. В., Кармазін О. О., Антон А. О., Репкін О. О. Вартість виробництва водню за допомогою електролізу. *Матеріали XXII міжнар. наук.-практ. конф. «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті»*. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2023. С. 329–336

51. Kharytonov M., Bensehoub A., Kryvakovska R., Klimkina I., Bouhedja A., Bouabdallah S., Chaabia R., Vasylyeva T. Risk assessment of aerotechnogenic pollution generated by industrial enterprises in Algeria and Ukraine. *Studia Universitatis "Vasile Goldiș", Seria Științele Vieții*. 2017. No. 27(2). P. 99–104. URL: <https://www.studiauniversitatis.ro/2014/11/17/risk-assessment-of-aerotechnogenic-pollution-generated-by-industrial-enterprises-in-algeria-and-ukraine/>

52. Alimbaev T., Mazhitova Z., Beksultanova C., Tentigulkyzy N. Activities of mining and metallurgical industry enterprises of the Republic of Kazakhstan: Environmental problems and possible solutions. *E3S Web of Conferences*. 2020. No. 175. Article 14019. DOI: 10.1051/e3sconf/202017514019

53. Zou C., Li J., Zhang X., Jin X., Xiong B., Yu H., Liu X., Wang S., Li Y., Zhang L., Miao S., Zheng D., Zhou H., Song J., Pan S. Industrial status, technological progress,

challenges, and prospects of hydrogen energy. *Natural Gas Industry B*. 2022. No. 9(5). P. 427–447. DOI: 10.1016/j.ngib.2022.04.006

54. Rodríguez Diez J., Tomé-Torquemada S., Vicente A., Reyes J., Orcajo G. A. Decarbonization pathways, strategies, and use cases to achieve net-zero CO₂ emissions in the steelmaking industry. *Energies*. 2023. No. 16(21). Article 7360. DOI: 10.3390/en16217360

55. Wan F., Li J., Han Y., Yao X. Research of the impact of hydrogen metallurgy technology on the reduction of the Chinese steel industry's carbon dioxide emissions. *Sustainability*. 2024. No. 16(5). Article 1814. DOI: 10.3390/su16051814

56. Trofymenko O., Voitko S., Mokiy A., Ilyash O., Kuzminska N. Cluster analysis of decarbonisation of the regional economy in the context of the potential of united territorial communities. *SHS Web of Conferences*. 2021. No. 129. Article 08020. DOI: 10.1051/shsconf/202112908020

57. Al Qahtani H., Sankar J. P. The cluster analysis in the aluminium industry with K-means method: an application for Bahrain. *Cogent Business & Management*. 2024. No. 11(1). Article 2361475. DOI: 10.1080/23311975.2024.2361475

58. Rattle I., Taylor P. G. Factors driving the decarbonisation of industrial clusters: A rapid evidence assessment of international experience. *Energy Research & Social Science*. 2023. No. 105. Article 103265. DOI: 10.1016/j.erss.2023.103265

59. Schneider C. Steel manufacturing clusters in a hydrogen economy – Simulation of changes in location and vertical integration of steel production in Northwestern Europe. *Journal of Cleaner Production*. 2022. No. 341. Article 130913. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130913

60. European Clusters Panorama 2021: Towards a Resilient Economy. *European Commission*. 2021. 38 c. URL: https://eisma.ec.europa.eu/news/european-clusters-panorama-2021-towards-resilient-economy-2021-12-16_en

61. Eco-Clusters for a Green Economy. *Greenovate! Europe*. Brussels: Greenovate! Europe, 2020. 28 p. URL: https://greenovate-europe.eu/wp-content/uploads/2020/08/Ecoclup_booklet.pdf

62. International Renewable Energy Agency (IRENA). *Green hydrogen: A guide to policy making*. Abu Dhabi: IRENA, 2020. 52 p. URL: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Nov/IRENA_Green_hydrogen_policy_2020.pdf

63. Тарасенко А. Внесок ГМК до ВВП України склав 5,7% у 2023 році. URL: <https://gmk.center/ua/news/vnesok-gmk-do-vvp-ukraini-sklav-5-7-u-2023-roci/>

64. Експорт чорних металів з України зріс на 17% у 2024 році. URL: <https://minprom.ua/news/319540.html>

65. Bararzadeh Ledari M., Khajehpour H., Akbarnavasi H., Edalati S. Greening steel industry by hydrogen: Lessons learned for the developing world. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2023. Vol. 48 No. 94. P. 36623–36649. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2023.06.058.

66. Ram M., Bogdanov D., Aghahosseini A., Gulagi A., Oyewo A. S., Child M., Caldera U., Sadovskaia K., Farfan J., Barbosa L. S. N. S., Fasihi M., Khalili S., Dalheimer B., Gruber G., Traber T., De Caluwe F., Fell H.-J., Breyer C. Global energy system based on 100% renewable energy – power, heat, transport and desalination sectors. *Study by Lappeenranta University of Technology and Energy Watch Group*. Lappeenranta, Berlin, March 2019. 321 p. URL: https://energywatchgroup.org/wp-content/uploads/EWG_LUT_100RE_All_Sectors_Global_Report_2019.pdf

67. Vogl V., Åhman M., Nilsson L. J. Assessment of hydrogen direct reduction for fossil-free steelmaking. *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 203. P. 736–745. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.08.279

68. Курпе О. Г., Кухар В. В. Модернізація виробництв та кращі практики термомеханічної прокатки плоскої металопродукції : монографія. ТОВ «Технічний

університет «Метінвест Політехніка». Одеса : Олді+, 2025. 358 с. ISBN 978-966-289-959-7.

69. Shapoval O., Kulynych V., Markov O., Kukhar V., Savchenko I. The principles of manufacturing complex carbide compounds based on titanium. *Discover Materials: Res. Squire*. 05 June 2024. PREPRINT (Version 1) available at Research Square. [Online]. DOI: 10.21203/rs.3.rs-4420724/v1

70. Smirnov O., Fikssen V., Kukhar V., Goryuk M., Hrushko O., Rud O., Lomakin V. Thin-walled aluminium waste remelting in circulation circuit with magnetodynamic pump. *Journal of Materials Science*. 2024. Process-Structure-Property Relationship of Lightweight Metallic Materials. P. 1–24. DOI: 10.1007/s10853-024-10062-3

71. Спичак О. Ю., Шестопапов О. В., Кухар В. В., Малій Х. В. Удосконалення системи очищення прокатної емульсії у процесі холодної прокатки з технологічними мастилами. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки*. Серія: Технічні науки. 2024. № 2. С. 20–27. DOI: 10.32782/3041-2080/2024-2-3

72. Тимошенко Д. О., Кухар В. В., Воловненко І. В. Порівняння енергоспоживання при виробництві сталі застарілими аглодоменним та мартенівським переділами із сучасною технологією прямого відновлення заліза Midrex H2 та виплавою в дуговій сталеплавильній печі. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки*. Серія: Технічні науки. 2024. № 2. С. 49–54. DOI: 10.32782/3041-2080/2024-2-8

73. Смірнов О., Кухар В. Інтегрована переробка відходів металургійного та вуглезбагачувального виробництва з використанням малогабаритних доменних печей. *Вісник Хмельницького національного університету*. Серія: Технічні науки. 2024. Том 337, № 3 (2). С. 409–414. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-337-3-62

74. Швець Є., Григор'єв Ю., Луценко С., Кухар В., Фесенко Е. Дослідження впливу гранулометричного складу підірваної маси на ефективність процесу екскавації при розробці будівельних гірських порід. *Вісник Хмельницького*

національного університету. Серія: Технічні науки. 2024. Том 339, № 4. С. 429–435. DOI: 10.31891/2307-5732-2024-339-4-64

75. Кухар В. В., Тимошенко Д. О., Кононюк Д. В., Малій Х. В., Навольнєв І. Ю. Доменні печі в епоху декарбонізації: пошук альтернатив коксу. *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. Тематичний випуск "До 95 річчя кафедри металургії ім. професора В.І. Логінова Дніпровського державного технічного університету". 2024. № 3. С. 36–43. DOI: 10.31319/2519-2884.tm.2024.3

76. Кухар В. В., Спичак О. Ю., Пашинський В. В., Малій Х. В. Випробування емульсолів для холодної прокатки на сажоутворення при відпалі рулонів. *Обробка матеріалів тиском : зб. наук. пр. / ДДМА*. Краматорськ – Тернопіль : ДДМА. 2024. № 1 (53). С. 116–128. DOI: 10.37142/2076-2151/2024-1(53)116

77. Кухар В. В., Спичак О. Ю., Балалаєва О. Ю., Марченко І. Ф. Розробка математичних моделей змін концентрації емульсій та вмісту механічних домішок у технологічних рідинах з використанням пакету MATLAB для обробки експериментальних даних. *Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. пр. / ДВНЗ «ПДТУ»*. Дніпро. 2024. Серія: Технічні науки. Вип. 49. Т. 1. С. 100–109. DOI: 10.31498/2225-6733.49.1.2024.321216

78. Kukhar V. V., Malii K. V., Kustikov V. V. Methods for improving the durability of the lining of induction crucible melting furnaces and monitoring its condition. *Metall and casting of Ukraine = Метал та лиття України*. 2024. Vol. 32. No. 3-4 (338-339), pp. 32–40. DOI: 10.15407/steelcast2024.03-04.004

79. Тимошенко Д. О., Кухар В. В., Шаульська Л. В., Кононюк Д. В. Порівняльний аналіз екологічної ефективності металургійних технологій виробництва сталі в контексті “зеленого” переходу. *Фундаментальні та прикладні проблеми чорної металургії*. 2024. Вип. 38. С. 282–291. DOI: 10.52150/2522-9117-2024-38-282-291

80. Kurpe O., Kukhar V. Development and Substantiation of Proposals for Modernization of Plate Rolling Mill. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. (In: Tonkonogyi, V., Ivanov, V., Trojanowska, J., Oborskyi, G. (eds), *Advanced Manufacturing Processes VI*, InterPartner 2024). Springer, Cham. 2025. P. 535–544. DOI: 10.1007/978-3-031-82746-4_47

81. Кухар В., Шкрабак І., Шаульська Л., Юзефович О., Боженко Д. Глобальний розвиток водневих кластерів для декарбонізації металургії в контексті управління конкурентоспроможністю підприємств галузі. *Development Service Industry Management*. 2025. № 1. С. 94–101. DOI: 10.31891/dsim-2025-9(12)

82. Кухар В., Шкрабак І., Шаульська Л., Чуб Н., Приходков А. Організаційні засади впровадження металургійних кластерів та відновлення промислового потенціалу України на основі розвитку водневих технологій. *Modeling the Development of the Economic Systems*. 2025. № 1. С. 101–107. DOI: 10.31891/mdes/2025-15-14

83. Спічак О. Ю., Кухар В. В., Широкобоков В. В. Промислові випробування прокатних емульсолів в умовах ПАТ «Запоріжсталь» для вибору оптимального продукту та вдосконалення технологічних прийомів роботи з прокатною емульсією. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 135–143. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-3-17

84. Tymoshenko D. O., Kukhar V. V., Volkova V. Ye., Chub N. S., Kyrychenko I. H. Comparing the Environmental Performance of Steelmaking Technologies. *Науковий журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки*. 2025. № 3. С. 177–182. DOI: 10.32782/3041-2080/2025-3-23

85. Кухар В., Грибков Е., Малій Х., Крюков Р., Тимошенко Д. Управління викидами в металургійній галузі України в умовах декарбонізації, шляхи досягнення вуглецевої нейтральності та застосування інструментів менеджменту. *Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського*. 2025. Вип. 1 (150). С. 65–73. DOI: 10.32782/1995-0519.2025.1.8

86. Kurpe O., Kukhar V. Development and Substantiation of Proposals for Modernization of Plate Rolling Mill. *Advanced Manufacturing Process : Book of Abstracts of the 6th Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Process*, Odessa, Ukraine, September 10–13, 2024 / Volodymyr Tonkonogyi, Vitalii Ivanov (Eds.). Sumy : IATDI, 2024. P. 78

87. Горчинська Ю.В., Кухар В.В., Балалаєва О.Ю. Платформа Kortext як інструмент цифрової трансформації освіти: приклад «Метінвест Політехніки». *Актуальні питання розвитку інформаційних технологій: тези доповідей VI Всеукраїнської конференції молодих учених* (Дніпро, 20 листопада 2024 р.) / ДВНЗ «ПДТУ». Дніпро: ПДТУ, 2024. С. 15–17.

88. Кухар В. В., Спічак О. Ю., Балалаєва О. Ю. Моделювання змін концентрації та вмісту механічних домішок у технологічних рідинах. *Актуальні питання розвитку інформаційних технологій: тези доповідей VI Всеукраїнської конференції молодих учених* (Дніпро, 20 листопада 2024 р.) / ДВНЗ «ПДТУ». Дніпро: ПДТУ, 2024. С. 32–34

89. Kukhar, V., Spichak, O., Pashynskiy, V., Malii, K. Testing and selection of lubricant emulsions for reduction of unwanted soot marks during annealing of cold-rolled steel coils. In: *Book of Theses from the 2nd International Scientific and Theoretical Conference on Modeling and Computer Engineering in Mechanical Engineering (MCEME-2024)*, June 18-21, 2024, Lviv, Ukraine, Lviv: SPOLOM, 2024, P. 22

90. Тимошенко Д. О., Кухар В. В. Реінжиніринг металургійного виробництва: перехід до “зеленої” сталі. *International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings* (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 98–101. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-34

91. Спічак О. Ю., Кухар В. В., Широкобоков В. В. Вплив параметрів відпалу у ковпакових печах на чистоту поверхні холоднокатаного прокату. *International*

scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 186–189. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-65

92. Навольнев І. Ю., Кухар В. В., Чупринов Є. В.. Використання поверхнево-активних речовин при виробництві DRI-продукту. *Литво. Металургія. 2025: Матеріали XXI Міжнародної науково-практичної конференції (27-29 травня 2025 р., м. Харків-м. Київ) / Під заг. ред. д.т.н., проф. Пономаренко О.І. Харків, НТУ «ХП», 2025. С. 412–416*

93. Navolniev Ig. Yu., Kukhar V. V., Chekhuta O. V., Yefimova V. G. Review of the potential applications of surfactants in metallurgy: from ore beneficiation to finished product processing. *The 11th International scientific and practical conference “Current trends in scientific research development”* (June 5-7, 2025). BoScience Publisher, Boston, USA. 2025. Pp. 237–245

94. Кухар В. В., Бутенко Е. О. Комплексний аналіз причин деградації цинкового покриття на гнутих сталевих профілях для будівельних конструкцій. *IV Міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку машинобудування та транспорту – 2025”* (м. Вінниця, 03–05 червня 2025 р.). Вінниця : ВНТУ, 2025. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/prmt/pmrt2025/paper/view/24822>

95. Пат. 158454 (UA, Україна), МПК (2023.01) C02F 1/40, B01D 17/02, B01D 35/06. Пристрій очищення стічної емульсії та водоемульсійних рідин / Спічак О. Ю., Шестопапов О. В., Кухар В. В., Пашинський В. В., Малій Х. В.; Заявник та патентовласник ТОВ "ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА". № u202401378; заявл. 15.03.2024; опубл. 12.02.2025, Бюл. № 7. 5 с.

96. Грибков Е. П., Малигін С. О., Бережна О. В. Математичне моделювання напружено-деформованого стану під час волочіння порошкового дроту з металевим

сердечником. *Обробка матеріалів тиском*. 2024. № 1(53). С. 34–42.
DOI: 10.37142/2076-2151/2024-1(53)34

97. Грибков Е. П., Кассов В. Д., Васильєва Л. В. Математичне моделювання технологічних режимів правки листів та плит на пресі. *Обробка матеріалів тиском*. 2024. № 1(53). С. 129–136. DOI: 10.37142/2076-2151/2024-1(53)129

98. Пожидаєв А. В., Грибков Е. П., Бережна О. В. Моделювання напружено-деформованого стану під час правки листів на листоправильних машинах з натяжінням. *Обробка матеріалів тиском*. 2024. № 1(53). С. 137–142. DOI: 10.37142/2076-2151/2024-1(53)137

99. Штода М. М., Штода І. І. Пружна деформація чистових клітей ТЗС 900/750. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки*. Серія: Технічні науки. №2. 2024. С. 55–60. DOI: 10.32782/3041-2080/2024-2-9

100. Суботін О. В., Мінаєнко О. Г., Штода М. М. Інформаційно-вимірювальна система правильної машини для контролю зазора робочих роликів. *Науковий Журнал Метінвест Політехніки*. Серія: Технічні науки. № 2. 2024. С. 86–91. DOI: 10.32782/3041-2080/2024-2-13

101. Грибков Е. П., Ліпатов К. В., Каленков О. Ф. Удосконалення технологічних режимів прокатки в еджерних валках. *International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings* (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 36–39. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-9

102. Грибков Е. П., Крюков Р. Є. Автоматизоване проектування складу обладнання прокатного стану. *International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings* (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 39–41. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-10

103. Навольнєв І. Ю. Шляхи розвитку металургійного комплексу України в сучасних умовах. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 67–70. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-21

104. Федоров Р. Ф., Стоянов О. М. Аналіз технологій глибокого розкислення сталі алюмінієм. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 104–108. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-36

105. Волжин Д. О., Кустіков В. В., Стоянов О. М., Малій Х. В. Джерела надходження азоту в метал. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 31–33. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-7

106. Волох С. В., Стоянов О. М. Розчинення азоту в сталі. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 33–35. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-8

107. Лапшин Є. В., Припуляк Є. В., Стоянов О. М., Малій Х. В. Види руйнації основних периклазовуглецевих вогнетривів. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the

Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 53–55. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-15

108. Нізяєв К. Г., Гусак М. Г., Синегін Є.В. Застосування варіативних конструкцій кисневих фурм на протязі кампанії конвертора. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 71–72. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-22

109. Нізяєв К. Г., Зелений Ю. А., Синегін Є. В. Дослідження впливу «передуву» металу в конвертері на технологічні показники роботи конвертора. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 72–73. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-23

110. Нізяєв К. Г., Синегін Є. В., Трибушной В. О., Гусак М. Г. Оцінка величини теплових втрат кисневого конвертера через його футерівку. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 74–75. DOI: 10.30525/978-9934-26-506-8-24

111. Синегін Є. В., Нізяєв К. Г., Торін А. І., Зелений Ю. А. Удосконалення технології позапічної обробки сталей трубних марок. International scientific conference “MININGMETALTECH 2024 – The mining and metals sector: integration of business, technology and education” : conference proceedings (November 28–29, 2024. Riga, the Republic of Latvia). Riga, Latvia : “Baltija Publishing”, 2024. Vol. 1. С. 92–93. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-506-8-31>

ВІДОМОСТІ ПРО ВПРОВАДЖЕННЯ



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор — проректор з
навчальної роботи
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Наталія РЕКОВА

«30» червня 2025 року

ДОВІДКА ПРО ВИКОРИСТАННЯ

Результати виконання науково-дослідної роботи «Розвиток наукових та методологічних засад удосконалення металургійних процесів, устаткування та методів управління їх ефективністю» (№ держреєстрації 0123U102947), що містять:

- рекомендації з удосконалення технологій позапічної десульфурзації сталі;
- методики розрахунку витрат електроенергії та викидів парникових газів при виробництві сталі по схемах «аглодоменне виробництво мартенівський перепплав» та «пряме відновлення заліза MIDREX + електродугосталеплавильні печі», адаптовані до підприємств гірничо-металургійного комплексу України;
- рекомендації по удосконаленню системи очищення водоемульсійних олив в технологіях холодної прокату;
- адаптовані методики оцінки зносу валкового інструменту, а також методика ефективності та вибору прокатних емульсолів для мінімізації утворення поверхневих дефектів після відпалу;
- рекомендації з проектування процесів, удосконалення конструкцій агрегатів та інструменту для правки листового, сортового і трубного прокату;
- удосконалені математичні моделі процесів правки прокату;
- рекомендації з вибору режимів деформації та удосконалення системи контролю якості при виробництві та обробці листової, сортової та довгомірної сталевий металопродукції;
- рекомендації з подовження терміну служби та контролю зношування футерівки тигельних індукційних сталеплавильних печей;
- рекомендації з вибору комплексу мікролегування та режимів термомеханічної обробки при гарячій прокатці сталей підвищених категорій міцності;
- рекомендації з підвищення безпеки праці на підприємствах гірничо-металургійного комплексу, а саме безпеки праці при роботі на висоті;
- рекомендації з оптимізації організаційної структури та розподілу повноважень і функціональних обов'язків на підприємствах гірничо-металургійного бізнесу та у проєктах модернізації у сфері металургії,

використовуються в навчальному процесі на кафедрі металургії та організації виробництва ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА» при викладанні:

- **ОПП «Металургія чорних металів»** при викладанні освітніх компонентів: «Основи металургійних технологій», «Підготовка металургійної сировини», «Шихтові та вогнетривкі матеріали металургійного виробництва», «Металургійні агрегати та обладнання», «Металургія чавуну», «Металургія сталі», «Електрометалургія сталі», «Проектування металургійних цехів», «Енерго- та ресурсозберігальні технології в промисловості»; «Інноваційні процеси металургійного виробництва», «Прокатне виробництво у чорній

металургії»;

- **ОПП «Металургія сталі»:** «Проектний менеджмент», «Рециклінгові технології та підвищення енергоефективності виробництва сталі», «Диджиталізація металургійного виробництва», «Дослідження у проєктах підвищення операційної ефективності», «Наукові основи поєднання процесів лиття та прокатки», «Технологія сортопрокатного та листопрокатного виробництва», «Теоретичні основи водневої металургії і напрямки декарбонізації сталеплавильного виробництва»;

- **ОПП «Аглодоменне виробництво»:** «Ресурсозаощаджувальні технології та рециклінг в аглодоменному виробництві», «Проектний менеджмент», «Перспективи розвитку металургії та позадоменне отримання заліза», «Сучасні технології формування структури та властивостей матеріалів та продукції»;

- **ОПП «Сучасні технології прокатного виробництва»:** «Сучасні техніко-технологічні аспекти прокатного виробництва», «Дослідження у проєктах підвищення операційної ефективності», «Теорія та практика прокатного виробництва», «Моделювання та комп'ютерні технології в прокатному виробництві», «Сучасні технології формування структури та властивостей матеріалів та продукції», «Управління проєктами розвитку прокатного виробництва», «Спеціальні прокатні стани»;

- Міждисциплінарна освітньо-наукова **програма (ОНП) 136+073 «Управління модернізацією металургії»:** «R&D в управлінні металургійними проєктами», «Перспективні технології та кращі практики модернізації металургії», «Управління комунікаціями в проєктах модернізації металургії», «Проектування модернізованих металургійних виробництв», «Економічний та управлінський аналіз і реінжиніринг бізнес-процесів металургійних підприємств», «Інфраструктура металургії», «Наукові основи розвитку кластерів чорної металургії та операційне вдосконалення виробництв», «Стратегічний розвиток та проєктний менеджмент», «Вартісне управління бізнесом: дослідження та практика»;

- **ОПП «Проектне управління змінами у гірничо-металургійному бізнесі»:** «R&D проєкт», «Стратегічний менеджмент», «Управління операційною ефективністю промислових корпоративних структур», «Проектний менеджмент», «Управління змінами в гірничо-металургійному бізнесі»;

- **ОПП «Вартісне управління бізнесом»:** «Прийняття управлінських рішень», «Операційний менеджмент», «Міждисциплінарний дослідницький проєкт», «Оцінка вартості та управління ефективністю бізнесу», «Управління конкурентоспроможністю», «Управління потенціалом підприємства»;

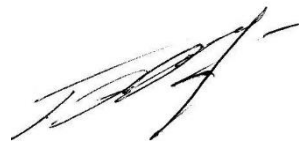
- **Освітньо-наукова програма третього рівня вищої освіти за спеціальністю 136 «Металургія» для здобуття ступеня доктора філософії:** «Концептуальні основи наукового світогляду та методологія наукових досліджень», «Управління науково-дослідними та інноваційними проєктами», «Стратегічні напрямки досліджень та кращі практики в металургії», «Експериментальні дослідження фізико-хімічних процесів в металургії», «Математичне та комп'ютерне моделювання в металургії».

а також при підготовці кваліфікаційних робіт освітнього рівня «Бакалавр» та «Магістр» за спеціальностей 136/G10 «Металургія» та 073/D3 Менеджмент.

Завідуючий кафедрою металургії

та організації виробництва,

д.т.н., проф.



Едуард ГРИБКОВ