
ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА І ПРОЦЕСИ ЛИТТЯ МЕТАЛІВ ТА СПЛАВІВ TECHNOLOGIES AND PROCESSES OF CASTING METALS AND ALLOYS

ISSN 2077-1304. Met. lit'e Ukr., vol. 34, 2026, № 1 (344), 33-45

<https://doi.org/10.15407/steelcast2026.01.033>

УДК 669:658.7:005.334:005.52

А.П. Мішалкін, канд. техн. наук, доц., e-mail: meshalkin@ukr.net

В.О. Петренко, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри інтелектуальної власності та управління проєктами,
e-mail: petrenko_v@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

Л.В. Камкіна, д-р техн. наук, проф., зав. кафедри теоретичних основ металургійних процесів,
e-mail: lydmila.kamkina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8329-0917>

Т.А. Фонарьова, канд. екон. наук, доц., доцент кафедри інтелектуальної власності та управління проєктами,
e-mail: fonarevat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7726-6999>

Український державний університет науки і технологій (Дніпро, Україна)

Комплаєнс-забезпечення ефективності логістичних маршрутів ресурсів сировини та енергії, як фактор стійкого розвитку металургійного виробництва

Металургійні виробництва функціонують у складному середовищі, що характеризується високою ресурсоемісністю виробничих процесів, зростанням вимог до енергоефективності виробництва та жорстким регуляторним контролем у сфері його сталого розвитку. Одним із ключових чинників стабільної роботи металургійних систем виступає забезпечення надійних, безпечних і економічно обґрунтованих логістичних маршрутів постачання мінеральної сировини, енергоресурсів та допоміжних матеріалів. Умови глобальної конкуренції, непередбачуваність транспортних та зовнішньоекономічних ризиків, військові загрози та висока волатильність ринків енергоносіїв зумовлюють необхідність формування ефективної системи комплаєнс-забезпечення логістичних ланцюгів, які включають моніторинг, управління ризиками, стандартизацію процесів і продукції з обов'язковим дотриманням як міжнародних норм відповідності, так і правил, технічних умов внутрішнього походження. Обґрунтовано, що комплаєнс у сфері ресурсного та енергетичного забезпечення металургійного виробництва виконує подвійне функціональне навантаження. З одного боку, він забезпечує юридичну, технічну та екологічну відповідність підприємства внутрішнім політикам, галузевим регламентам та міжнародним стандартам якості. З іншого — створює інструментарій контролю, який мінімізує логістичні, технологічні та фінансові ризики, що виникають у процесі транспортування, зберігання та використання корисних властивостей сировини й енергоресурсів при реалізації відповідних етапів комплексної технології виробництва сталі. Особливого значення ця система набуває за умов інтеграції України до європейського економічного простору, де дотримання вимог ESG (три ключові критерії для оцінки стійкості та етичності бізнесу: Екологія (Environmental), Соціальна відповідальність (Social) та Управління (Governance)), CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism, Механізм вуглецевого коригування імпорту), ISO (Міжнародна організація зі стандартизації) 37301 та ISO 14001 стає необхідною умовою збереження конкурентоспроможності на міжнародних ринках металопродукції. **Метою дослідження** є наукове обґрунтування принципів, інституційних механізмів та структурних елементів комплаєнс-забезпечення логістики мінеральної сировини та енергоресурсів як інтегрального фактора стійкого розвитку металургійного виробництва. **Методика дослідження.** Об'єктом дослідження є структурні елементи комплаєнс-забезпечення логістики мінеральної сировини та енергоресурсів як інтегрального фактора стійкого розвитку металургійного виробництва. В дослідженні застосовано такі наукові методи: системний аналіз — для комплексної оцінки логістичних, технологічних та регуляторних факторів; метод ризик-орієнтованого комплаєнсу (Risk-Based Compliance) — для ідентифікації та оцінки загроз у логістичних ланцюгах; основні положення гармонізованої методології щодо розробки раціональної за витратами сировини та палива, енергоефективної замкнутої схеми відповідних технологічних маршрутів як основи для створення узгодженої системи технологічних процесів чорної металургії. Використання підходів такої методології за-

безпечить раціональне використання ресурсів, мінімальні втрати енергії та зниження техногенного навантаження на довкілля; порівняльний аналіз — для порівняння міжнародних підходів до управління логістичними ризиками у металургійній галузі; методи технологічного аналізу, які мають фізико-хімічну спрямованість, для дослідження впливу якості сировини та енергоресурсів на формування корисних властивостей металургійних систем, що є об'єктами дослідження. **Наукова новизна** результатів дослідження полягає у: розширенні положень концепції інтегрованого комплаєнс-забезпечення логістики сировини та енергії, положеннями, які об'єднують правові, технічні, екологічні та технологічні аспекти управління ризиками у металургійному виробництві; визначенні зв'язку між стабільністю постачання ресурсів та ефективністю основних металургійних процесів (доменне виробництво, сталеплавильні процеси, позапічна обробка); розробленні принципів оцінювання безпеки логістичних маршрутів, що враховують технологічні чинники та фізико-хімічні властивості ресурсів металургійного виробництва, специфіку, умови та вірогідні ризики їх транспортування; введенні ризик-орієнтованої системи контролю постачання/забезпечення ресурсами, що дозволяє об'єктивно оцінювати вплив логістичних збоїв на енергоефективність і ресурсомісткість виробництва, екологію та якість металопродукції. **Результати дослідження.** Функціональна діяльність металургійного комплаєнс-забезпечення стосується забезпечення виробництва мінеральною сировиною, енергоресурсами/паливом, надійності логістичних маршрутів їх постачання, якості продукції та сталого інноваційного розвитку виробництва. Комплаєнс-забезпечення ресурсами виступає ключовим механізмом раціонального використання сировини та енергії в металургійному виробництві, сприяє підвищенню ефективності технологічних процесів, зниженню витрат і екологічних ризиків, а також створює фундамент для сталого розвитку підприємства в умовах нестабільності ринкових і ресурсних факторів. Його застосування доводить високу результативність як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі, формуючи системний підхід до керування ресурсною безпекою та виробничою надійністю. **Практична цінність** впливає з отриманих теоретичних результатів зі зниження технологічних ризиків за рахунок оптимізації логістичних маршрутів ресурсів сировини та енергії.

Ключові слова: сталий розвиток, економічна та технологічна безпека, металургійне виробництво, загрози, ризики, управління, комплаєнс-забезпечення, логістичні маршрути сировини та енергії.

Вступ. Сучасні металургійні підприємства функціонують у складному середовищі, що характеризується високою ресурсоемністю виробничих процесів, зростанням вимог до енергоефективності виробництва та жорстким регуляторним контролем у сфері його сталого розвитку. Одним із ключових чинників стабільної роботи металургійних систем виступає забезпечення надійних, безпечних і економічно обґрунтованих логістичних маршрутів постачання мінеральної сировини, енергоресурсів та допоміжних матеріалів. Умови глобальної конкуренції, непередбачуваність транспортних та зовнішньоекономічних ризиків, військові загрози та висока волатильність ринків енергоносіїв зумовлюють необхідність формування ефективної системи комплаєнс-забезпечення логістичних ланцюгів, які включають моніторинг, управління ризиками, стандартизацію процесів і продукції з обов'язковим дотриманням як міжнародних норм відповідності, так і правил, технічних умов внутрішнього походження.

Комплаєнс у сфері ресурсного та енергетичного забезпечення металургійного виробництва виконує подвійне функціональне навантаження. З одного боку, він забезпечує юридичну, технічну та екологічну відповідність підприємства внутрішнім політикам, галузевим регламентам та міжнародним стандартам якості. З іншого — створює інструментарій контролю, який мінімізує логістичні, технологічні та фінансові ризики, що виникають у процесі транспортування, зберігання та використання корисних властивостей сировини й енергоресурсів при реалізації відповідних етапів комплексної технології виробництва сталі. Особливого значення ця система набуває за умов інтеграції України до європейського економічного простору, де дотримання вимог ESG (три ключові критерії для оцінки стійкості та етичності бізнесу:

Екологія (Environmental), Соціальна відповідальність (Social) та Управління (Governance)), CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism, Механізм вуглецевого коригування імпорту), ISO (Міжнародна організація зі стандартизації) 37301 та ISO 14001 стає необхідною умовою збереження конкурентоспроможності на міжнародних ринках металопродукції.

Ефективні логістичні маршрути визначають не лише своєчасність постачання та безперервність роботи доменних, сталеплавильних і прокатних агрегатів, але й безпосередньо впливають на енерговитрати, теплову ефективність, якість кінцевої металопродукції та економічну стійкість виробничої системи. Формування інтегрованої моделі комплаєнс-забезпечення логістики ресурсів розглядається як один із ключових факторів раціонального використання фізико-хімічного потенціалу металургійних процесів і підвищення ефективності функціонування підприємства у довгостроковій перспективі.

Саме тому, обґрунтування принципів і структурних елементів комплаєнс-забезпечення логістичної системи металургійного виробництва ресурсами, визначення її впливу на стабільність постачання, технологічну ефективність, якість продукції, екологічну безпеку, а також формування теоретико-практичних підходів до побудови стійких логістичних маршрутів сировини та енергії, є важливими завданнями металургійного комплаєнсу в умовах сучасних ринкових та геополітичних викликів.

Актуальність дослідження обумовлена наступними ключовими факторами:

1. Геополітичні ризики та руйнування традиційних логістичних маршрутів вимагає формування оновлених схем постачання сировини та енергії, здатних забезпечити безперервність металургійних процесів і

відповідну якість металопродукції.

2. Зростання вимог міжнародних ринків до екологічності та вуглецевого сліду існуючих технологій (металопродукції) на пряму залежить від ефективності витрат, характеристик, джерел енергоресурсів та логістики.

3. Необхідність управління якістю мінеральної сировини, адже її коливання впливають на тепловий баланс, хімічний склад, споживчі властивості металу та ресурсоемність виробництва.

4. Потреба у комплаєнс-забезпеченні систем задля відповідності виробництва CBAM, ESG, ISO та галузевим регламентам, що особливо важливо, в умовах євроінтеграції.

5. Висока залежність металургійних підприємств від стабільних поставок енергоресурсів, в умовах коливання цін, дефіциту виробничих потужностей та обмежень на ринку електроенергії й газу.

Таким чином, формування комплексної системи комплаєнс-забезпечення логістичних маршрутів виробничих ресурсів стає ключовою передумовою стійкого розвитку металургійного виробництва в умовах невизначеності.

Постановка проблеми (задачі). Задачами дослідження, від вирішення яких залежить досягнення поставленої мети, є наступні:

1. Аналіз сучасних підходів до комплаєнс-забезпечення у промисловій логістиці.

2. Ідентифікація ключових ризиків, що впливають на надійність логістичних маршрутів постачання сировини та енергії.

3. Визначення впливу стабільності постачання на енергоефективність, ресурсозбереження та якість металургійної продукції.

4. Оцінювання ролі міжнародних стандартів (ISO, ESG, CBAM, AML/KYC (KYC (Know Your Customer — Знай свого клієнта) та AML (Anti-Money Laundering — Протидія відмиванню грошей)) у формуванні комплексної системи комплаєнс-забезпечення, використання якої забезпечує стабільність постачання ресурсів мінеральної сировини, палива, електроенергії та інших нерудних матеріалів.

5. Визначення основних положень моделі інтегрованого комплаєнс-забезпечення логістики, яка орієнтована на мінімізацію ризиків і довгострокову стійкість металургійного виробництва.

6. Розробка практичних рекомендацій щодо оптимізації логістичних ланцюгів у металургії з урахуванням техніко-технологічних, економічних та регуляторних аспектів виробництва.

Мета роботи. Метою дослідження є наукове обґрунтування принципів, інституційних механізмів та структурних елементів комплаєнс-забезпечення логістики мінеральної сировини та енергоресурсів як інтегрального фактора стійкого розвитку металургійного виробництва.

Об'єкт та методика дослідження. Об'єктом дослідження є структурні елементи комплаєнс-забезпечення логістики мінеральної сировини та енергоресурсів як інтегрального фактора стійкого розвитку металургійного виробництва.

В дослідженні застосовано такі наукові методи:

— системний аналіз — для комплексної оцінки логістичних, технологічних та регуляторних факторів;

— метод ризик-орієнтованого комплаєнсу (Risk-Based Compliance) — для ідентифікації та оцінки загроз у логістичних ланцюгах;

— основні положення гармонізованої методології щодо розробки раціональної за витратами сировини та палива, енергоефективної замкнутої схеми відповідних технологічних маршрутів як основи для створення узгодженої системи технологічних процесів чорної металургії. Використання підходів такої методології забезпечить раціональне використання ресурсів, мінімальні втрати енергії та зниження техногенного навантаження на довкілля;

— порівняльний аналіз — для порівняння міжнародних підходів до управління логістичними ризиками у металургійній галузі;

— методи технологічного аналізу, які мають фізико-хімічну спрямованість, для дослідження впливу якості сировини та енергоресурсів на формування корисних властивостей металургійних систем, що є об'єктами дослідження.

Наукова новизна результатів дослідження полягає у:

— розширенні положень концепції інтегрованого комплаєнс-забезпечення логістики сировини та енергії, положеннями, які об'єднують правові, технічні, екологічні та технологічні аспекти управління ризиками у металургійному виробництві;

— визначенні зв'язку між стабільністю постачання ресурсів та ефективністю основних металургійних процесів (доменне виробництво, сталеплавильні процеси, позапічна обробка);

— розробленні принципів оцінювання безпеки логістичних маршрутів, що враховують технологічні чинники та фізико-хімічні властивості ресурсів металургійного виробництва, специфіку, умови та вірогідні ризики їх транспортування;

— введенні ризик-орієнтованої системи контролю постачання/забезпечення ресурсами, що дозволяє об'єктивно оцінювати вплив логістичних збоїв на енергоефективність і ресурсомісткість виробництва, екологію та якість металопродукції.

Результати дослідження. Функціональна діяльність металургійного комплаєнс-забезпечення стосується забезпечення виробництва мінеральною сировиною, енергоресурсами/паливом, надійності логістичних маршрутів їх постачання, якості продукції та сталого інноваційного розвитку виробництва.

До основних напрямів діяльності К-3, як об'єктів дослідження, відносяться: корпоративне управління, політика й нормативна відповідність; гарантія постачання мінеральної сировини (якість та надійність зовнішніх джерел їх постачання); енергетична та паливна безпека (доступність, якість, альтернативні (резервні) варіанти постачання енергоресурсів); надійні довгострокові логістичні маршрути і ланцюги постачання на підприємство; система забезпечення контролю якості продукції (випробування, сертифікація); екологічна, промислово-технологічна

безпека комплексних технологій сучасного виробництва сталі та сплавів; стійкий інноваційний розвиток виробництва (розробка та використання інноваційних технологій та матеріалів); ризик-менеджмент, аудит і прозорість внутрішнього контролю; ІТ-інфраструктура, цифрові моделі, штучний інтелект з відстеженням результатів їх застосування; управління договорами з постачальниками, стейкхолдерами та відповідність міжнародним ланцюгам (включаючи ESG/СВАМ ризики).

Ґрунтуючись на потребах металургійного виробництва, проведемо системний аналіз основних складових К-3, які наведено нижче у табл. 1.

В цих умовах, заходом, що забезпечить стійкість металургійного виробництва України, доцільним є укладення довгострокових контрактів на основі визначення альтернативних джерел ресурсів та логістичних маршрутів їх постачання. Важливим заходом при зміні умов функціонування підприємств вбачається узгодження комплаєнс-забезпечення із

нормативами, включаючи вимоги до хімічного складу та фізичних властивостей сировини і палива.

Автори дослідження [11] стверджують, що «механізм вуглецевого коригування стане серйозним викликом для України». В умовах кризового стану гірничо-металургійного комплексу України, вуглецеве мито СВАМ, на практиці може перетворитися на інструмент економічного тиску, наслідки чого можуть призвести до значних втрат і стати загрозою для економічної інтеграції з ЄС. Також, необхідно, визначити, що введення в дію для вітчизняного металургійного виробництва СВАМ, стане джерелом виникнення трансформаційних ризиків, що пов'язані з переходом до низьковуглецевої економіки: змінами в законодавстві, технологіях та споживчих перевагах металопродукції.

Звикористанням даних про складові К-3, розглянуті в дослідженні вище, визначено як першочерговий, практичний крок для його впровадження в умовах невизначеності загроз і ризиків, оновлення та узгод-

Таблиця 1

Системний аналіз основних складових комплаєнс-забезпечення потреб металургійного виробництва*

Назва складової комплаєнс-забезпечення	Аналіз структурних зв'язків системи комплаєнс-забезпечення
1. Корпоративне управління, політики й нормативна відповідність	Система внутрішніх політик (корпоративний комплаєнс: законодавство, ліцензії, екологічні стандарти, митні вимоги, вимоги до безпеки) — базова умова, щоб операційні рішення (закупівлі руди, вибір палива, технологічні режими) були легітимні й узгоджені з ризик-менеджментом і екологічними обмеженнями. Це впливає на вибір технологічних маршрутів з урахуванням допустимих викидів, умов утилізації відходів та дозволів на зміну режимів плавлення [1].
2. Стабільність гарантованого постачання мінеральної сировини при забезпеченні її якості та надійності джерела постачання	Досягається контрактами на надійні й довгострокові поставки руди, флюсів, палива та інших компонентів шихти відповідних металургійних процесів; обґрунтованими вимогами до їх хімічного та фракційного складу, вологості та домішок; лабораторним контролем фізичних властивостей та якості при їх прийманні; забезпеченням стабільності сировинно-паливної бази, що дозволяє раціонально керувати кінетичними параметрами процесів (температурними умовами (фазовими перетвореннями, інтенсивністю окислювально-відновлювальних процесів та інших процесів рафінування металу), що знижує енерговитрати і підвищує вихід бажаних фаз/сплавів. Професійний контроль сировини слід визначати як ключ до прогнозованої поведінки шихти в печі [2].
3. Енергетична безпека (доступність, якість, альтернативні джерела електроенергії та палива)	Забезпечується: договорами на постачання енергоносіїв, диверсифікацією джерел (електрики, газу, коксу, альтернативних видів сировини та палива); моніторингом якості палива (за складом золи, вихідної вологості, вмістом сірки) та інших матеріалів; якістю палива, енергії та мінеральної сировини як показників, що прямо впливають на процесні температури, формування газо-шлако-металевих фаз та кінетику реакцій. Так неконформне паливо змінює режим плавки, знижує якість металу, тому, при розробці енергоефективних технологій, забезпечення відповідної до визначеного сучасними технологіями якості ресурсів, є частиною комплаєнсу та стратегії декарбонізації металургійного виробництва [3].
4. Надійні довгострокові логістичні маршрути і ланцюги постачання	Досягаються за рахунок: оцінювання ризиків ланцюга (політичні-інфраструктурні-кліматичні ризики), запасних маршрутів, страхування перевезень, відстеження відвантажень, SLA (Service Level Agreement, Угода про рівень обслуговування) [4]. SLA угода, яку підприємство укладає з логістичним оператором-перевізником, у логістиці металургійного виробництва є одним із ключових інструментів комплаєнс-забезпечення стабільності постачання. Дозволяє підприємству: забезпечити стабільні логістичні маршрути сировини та енергії; зменшити ризики простоїв основного металургійного обладнання (конверторів, ДСП, МБЛЗ); підвищити економічну та енергетичну ефективність виробництва; уникнути втрат якості сировини під час перевезення; мінімізувати екологічні та безпекові інциденти; впровадити прозорий контроль перевізників; мати юридично зафіксовані механізми відповідальності [2]; логістична стабільність, в свою чергу, гарантує своєчасне надходження контрольованої сировини і палива, мінімізує зміну складу шихти в часі та дозволяє зберігати сталі технологічні режими й параметри якості продукції. Резильєнтні логістичні рішення, за даними, що наведено в [5], знижують операційні збої й ризики вірогідних невідповідностей.

5. Система забезпечення якості продукції	Включає такі заходи як: контроль технології, випробування та сертифікація. Важливим інструментом забезпечення якості продукції є ISO 9001 та галузеві стандартні випробувальні методики (внутрішній лабораторний контроль, відстеження походження партій (traceability), управлінням невідповідними продуктами) [6]. Основним завданням контролю хімічного складу, механічних властивостей і мікроструктури металопродукції є гарантування відповідності вимогам замовника. Його застосування дозволяє найбільш оптимально використовувати вихідний фізико-хімічний потенціал металургійних систем, а при встановленні відхилень від технічних умов, вимог сертифікатів на продукцію, швидко реагувати шляхом корекції компонентного складу шихти, зміни температурного, шлакового, дуттєвого режимів та інших параметрів відповідних металургійних процесів [5]. Систематизований огляд методів оцінки ризиків у хімічній та промисловій індустрії охоплює актуальні підходи до безпеки [7].
6. Екологічна, промислова та технологічно-операційна безпека	Відповідає та створюється на основі: впровадження екологічних стандартів (ISO 14001) і практик щодо аналізу ризиків та сценаріїв вірогідних аварій на виробництві [8]; вимог EHS (комплексна система управління, що охоплює Environment — Охорону Навколишнього Середовища, Health — Охорону Здоров'я та Safety — Безпеку на робочих місцях), які визначають обмеження за режимами ведення процесів, вибором реагентів і технологій з метою мінімізування викидів SOx,NOx, пилу) [19], що впливає на кінетику й термодинаміку процесів. Комплаєнс із цими вимогами захищає підприємство від санкцій і дозволяє проводити інновації в межах дозволених екологічних рамок [9].
7. Стійкий інноваційний розвиток, дослідження та розробка (R&D — Research and Development) технологічних інновацій	Забезпечується за рахунок: інвестицій в енергоефективні металургійні технології DRI-EAF (Direct Reduced Iron — Electric Arc Furnace), утилізацію відходів, підходи до їх рециркуляції та ін. технологічні рішення, що забезпечують підвищення їх енергоефективності; інновацій, які дозволяють змінювати операційні параметри для кращого використання корисних властивостей вихідного фізико-хімічного потенціалу металургійних систем, підтримуючи конкурентоспроможність і відповідність новим екологічним вимогам [3].
8. Ризик-менеджмент, аудит і прозорість	Реалізуються шляхом контролю та включають регулярні внутрішні та зовнішні аудити. Система KPI як методичний інструмент, що оцінює діяльність щодо якості сировини, енергоефективності процесів, рівня шкідливих викидів, логістичної надійності, визначає успішність досягнення стратегічних цілей підприємства, підрозділу чи окремого співробітника. Вона допомагає зрозуміти, наскільки ефективно виконуються завдання, і досягається успіх, а також дає можливість приймати обґрунтовані управлінські рішення в разі виникнення конкретних та вірогідних за виникненням невідповідностей [10]. Приведені заходи комплаєнс контролю стають ефективними, якщо технічні рішення базуються на перевірених даних, що зменшує випадкові відхилення у процесах, що мають фізико-хімічну спрямованість і дають підстави для корекції режимів металургійних процесів у реальному часі.
9. IT-інфраструктура, цифрові моделі та відстеження (traceability, LIMS, MES)	Управління договорами, стейкхолдерами та відповідність міжнародним ланцюгам (включаючи ESG/СВАМ ризики) [11]. Ризики, пов'язані з ESG, включають трансформаційні ризики (перехід до низьковуглецевої економіки) та фізичні ризики (зміна клімату). Механізм коригування цін на викиди вуглецю (СВАМ) [12] додає до цих ризиків регуляторні та економічні ризики для підприємств, що виробляють сталь, алюміній, цемент у вигляді додаткових витрат на вуглецеві сертифікати та потребує надавання звітів з точними даними про викиди виробництв, що пов'язані зі значними викидами парникових газів.

*(систематизовано та складено авторами)

ження політики комплаєнс із нормативами, включаючи вимоги до хімічного складу та фізичних властивостей сировини і палива, що узгоджується з результатами дослідження. [1]. Як мету діяльності комплаєнсу, автори визначають сприяння економічному зростанню, покращенню соціально-економічних умов та розвитку міжнародної торгівлі країн з ринковою економікою та демократичними принципами для співпраці та координації економічної політики. Системний огляд практик оптимізації логістики та зниження вуглецевого сліду проведено в дослідженні [5].

На важливість впровадження LIMS/MES (інтеграція двох ключових систем для цифрового виробництва: LIMS (Laboratory Information Management System — лабораторна інформаційно-керуюча система управління якістю та аналізом зразків) та MES (Manufacturing Execution System — система управління виробничими процесами, координація та контроль виробництва в реальному часі), що за-

безпечить швидкий моніторинг основних показників партій відповідних матеріалів і режимів їх постачання, вказують автори [13]. Так, MES є центральною ланкою між виробничими процесами і корпоративними системами задля збору, контролю і аналізу даних у режимі реального часу. Авторка [14] описує досвід застосування LIMS на промислових підприємствах, підкреслює переваги автоматизації лабораторних процесів та підвищення контролю якості.

Наступним, ефективним підходом до управління технологічною безпекою на підприємствах, які працюють з потенційно небезпечними процесами або матеріалами (високі температури, гази, розплави, реагенти тощо), вбачається PSM (Process Safety Management) [15]. В дослідженні показано, що це системний підхід, що базується на сукупності таких елементів як: ідентифікація небезпек, аналіз ризиків, операційні процедури, технічна цілісність, управління змінами, підготовка персоналу, готовність до аварій,

аудит і безперервне вдосконалення. Визначено, що невідповідність PSM – це стан, коли підприємство не контролює ключові технологічні ризики, що може призвести до аварій, екологічних інцидентів, втрат продуктивності та зупинки виробництва.

Обговорення результатів. Структурований і стислий перелік проблем безпеки, які можуть виникати при забезпеченні металургійного підприємства

мінеральною сировиною та енергоресурсами, а також джерела ризиків і загроз стійкому функціонуванню, наведено нижче в табл. 2.

Як видно з табл. 2, основні проблемні питання сформовані відповідно до блоків безпеки, що дає можливість розглядати цілісну систему взаємопов'язаних елементів, з метою вирішення проблем і прийняття відповідних рішень.

Таблиця 2

Проблеми безпеки, джерела ризиків та загроз у забезпеченні металургійного підприємства ресурсами сировини та енергії

№	Блок безпеки / напрям	Основні проблеми безпеки	Джерела ризиків та загроз
1	Мінеральна сировина: - рудні матеріали (залізорудний концентрат, окатиші, агломерат); - нерудні матеріали — флюси (вапно, вапняк та ін.)	- нестабільність постачання та коливання якості сировини; - змішування сировини з неконтрольованими домішками; - низька відстежуваність складу (хімічного, гранулометрії) та якості партій; - порушення вимог безпечного зберігання (пил, горючість, самозаймання окремих концентратів).	- геополітична нестабільність постачальників; - ненадійність постачальника або монополізація ринку руди, концентратів, флюсів; - падіння якості сировини через порушення умов транспортування; - корупційні ризики в закупівлях; - аварії при транспортуванні сировини.
2	Ресурси енергії (газ, електроенергія, коксівне вугілля, компоненти екзотермічних сумішей)	- перебої з постачанням енергоресурсів; - перевантаження внутрішніх електромереж; - нестабільність основних параметрів енергії (напруга, тиск газу); - ризик аварій у системах транспортування енергоресурсів.	- зношеність енергетичної інфраструктури; - зовнішні атаки на енергомережі (військові, кібератаки); - коливання ринкових цін; - дефіцит енергоносіїв; - пожежні та вибухові ризики газових систем (CH ₄ , H ₂ , компонентів синтетичних шлаків, та ін.).
3	Логістика та інфраструктура постачання	- аварійність транспортних маршрутів; - розриви ланцюгів постачання ресурсів; - непередбачувані затримки вантажів; - недостатня захищеність критичної логістичної інфраструктури.	- військові ризики (руйнування доріг, портів, залізниці); - відсутність альтернативних безпекових маршрутів; - погодні фактори (морські шторми, стихії, ожеледиця); - кібер-ризики транспортних систем; - зношена інфраструктура складів і причалів.
4	Енергоефективність виробництва	- перевитрати енергії — невідповідність енергобалансу технологічним нормативам; - низька ефективність діючих агрегатів та обладнання.	- застарілі агрегати (конвертери, домни, ДРП, МБЛЗ, печі) для обпалу вапняку та ін.); - порушення режимів роботи печей та компресорних станцій; - недостатній моніторинг у реальному часі (відсутність LIMS/MES) [14, 15]; - витіки, нерациональне використання газу й електроенергії.
5	Ресурсозбереження та раціональне використання ресурсів	- підвищені питомі витрати руди, агломерату, окатишів, коксу, флюсів, феросплавів; - втрати під час транспортування та складування; - неефективне використання доменних та сталеплавильних шлаків.	- низька культура зберігання сировини; - неякісна автоматизація шихтоприготування; - відсутність контролю втрат при зважуванні та подачі; - недостатній контроль якості вторинних ресурсів та рівень розвитку технологій утилізації.
6	Якість металопродукції	- нестабільність хімічного та фракційного складу сировини, невідповідність ТУ та стандартам; - надвисокий вміст в металі неметалевих включень; - відхилення за механічними властивостями; - порушення технологічних режимів плавки.	- нестабільність вмісту домішок у концентратах, окатишах, брутті; - недостатній вхідний контроль (без LIMS); - відсутність належного контролю за якістю сировини в деяких партіях; - помилки оператора, людський фактор; - зношене або некаліброване обладнання.

7	Екологічна безпека	<ul style="list-style-type: none"> - зростання маси шламів поточного виробництва, викидів пилу, NO_x, SO₂; - неконтрольовані скиди шкідливих речовин у воду; - перевищення норм шуму, вібрації; - пожежна небезпека від зберігання вугілля та концентратів з відхиленнями від норм і правил. 	<ul style="list-style-type: none"> - порушення правил поводження з відходами; - аварії в системі газоочищення; - несправність обладнання для вловлювання пилу; - старі фільтри та системи очищення газу від пилу; - неконтрольовані понаднормові утворення шламу та шлаків.
8	Технологічна та промислова безпека	<ul style="list-style-type: none"> - вибухи пилу; - перегрів або руйнування футерування печей; - аварії газового господарства; - ризики при роботі з розплавами (розливи, бризки). 	<ul style="list-style-type: none"> - недостатній PSM (Process Safety Management / Управління безпекою процесів). Підприємство не контролює ключові технологічні ризики, що може призвести до аварій, екологічних інцидентів, втрат продуктивності та зупинки виробництва [18]; - слабкий технічний огляд обладнання; - відсутність резервних систем промислового захисту; - нещільність газопроводів; - вібраційні руйнування агрегатів.
9	Організаційні та управлінські ризики	<ul style="list-style-type: none"> - нестача інструкцій та процедур із запобігання виникненню ризиків; - відсутність системи комплаєнс-контролю ресурсних потоків; - непрозорість закупівель; - низький рівень цифровізації виробництва. 	<ul style="list-style-type: none"> - людський фактор; - корупційні ризики; - відсутність аудитів та моніторингу; - нехтування стандартами ISO 9001 / 14001 / PSM [19].

Розглянемо більш детально технологічні та промислові ризики, які структуровані за основними категоріями та проявами/наслідками у разі відсутності або невідповідності PSM (див. табл. 3).

Структуризація ризиків, яка показана в табл. 3, дає можливість розробляти програми мінімізації ризиків із врахуванням імовірності настання та мас-

штабу наслідків.

З погляду на стан металургійного виробництва, зупинимось на розгляді та узагальненні загроз та ризиків сучасних металургійних виробництв іншого походження.

Такими являються загрози зниження конкурентоспроможності та прибутковості, порушен-

Таблиця 3

Ризики металургійного підприємства у разі відсутності або невідповідності PSM (Process Safety Management / Управління безпекою процесів)

№	Категорія ризику	Прояви / Наслідки
1	Вибухи і спалахи	Газопроводи доменних/кокскових газів, пилові вибухи, ЛЗР (бензин, ацетон, метанол, етанол, розчинники)
2	Токсичні викиди	CO, SO ₂ , NO _x техногенного походження, феноли, аміак, H ₂ S
3	Аварії з розплавленим металом	Переливи, викиди, гідравлічні прориви, потрапляння вологи у розплав — при порушенні технології
4	Руйнування обладнання	Доменні повітрянагрівачі, система газоочищення, ковші, трубопроводи
5	Втрати енергоефективності	Неконтрольовані параметри, перегрів, аварійні зупинки
6	Забруднення довкілля	Неконтрольовані викиди пилу, стічних вод, шлаку, шламу
7	Перерви у постачанні сировини/енергії	Через аварії транспортерів, ДРП, теплових агрегатів, газових мереж
8	Ризики для персоналу	Опіки, травми, отруєння, смертельні випадки

ня інвестиційних програм. Без аналізу об'єктивності причин їх виникнення, вони стають джерелами ризиків, що впливають на енергоефективність і ресурсозбереження виробництва.

Їх причинами стає зношене або морально застаріле обладнання, що, в свою чергу, призводить до зниження коефіцієнта корисної дії (ККД) печей, агрегатів, систем газоочищення, компресорів, насосів; витоків тепла, газу та енергії; втрати стабільності процесів

(неможливість точно контролювати температуру, рівень окислення металу, параметрів продування та інших технологічних операцій та режимів).

На металургійних підприємствах системи LIMS/MES працюють разом: LIMS передає фактичний хімічний аналіз у MES, а MES коригує технологічні операції (режими продування металеві ванни, шлакоутворення, температурний, додавання феросплавів та ін.). В результаті їх взаємодії (ефектів синергії)

вирішуються проблеми оперативного управління якістю та ресурсами сировини та енергії при повній простежуваності маршруту «руда → чавун → сталь → продукція».

В узагальненому вигляді ризику, що виникають при функціонуванні металургійних підприємств, доцільно визначити як:

1. Сировинні ризики: дефіцит, нестабільна якість, логістичні затримки.

2. Енергетичні ризики: перебої в електропостачанні, дефіцит газу, волатильність цін.

3. Технологічні ризики: аварії обладнання, нестабільність технологічно-операційних параметрів відповідних процесів.

4. Екологічні та регуляторні ризики: невідповідність нормам, санкції, СВAM.

5. Фінансові ризики: зростання собівартості, зниження конкурентоздатності.

6. Соціально-кадрові ризики: дефіцит кваліфікованого персоналу, помилки операторів.

7. Кібер- та інформаційні ризики: дезінформація в логістиці, маніпуляції контрактною документацією та ін., ще не визначені як реальні.

В якості основного інструменту підвищення ефективності забезпечення металургійного підприємства ресурсами мінеральної сировини, енергії та вартості використано концепцію раціонального використання фізико-хімічного потенціалу металургійних систем [17]. Використання її положень має створити умови забезпечення удосконалення існуючих та створення інноваційних технологій виробництва металів та сплавів.

Результатом проведеного системного аналізу є стратегічний синтез, який полягає в покроковому алгоритмі впровадження комплаєнс-забезпечення в умовах металургійного виробництва. Сутність алгоритму наведена нижче.

1. В стислі строки послідовно оновити та узгодити політику комплаєнс із нормативами, включаючи вимоги до хімічного складу матеріалів сировинних ресурсів, що містять залізо (руда, концентрат, агломерат, окатиші, чавун), феросплавів, металургійного вапна та палива/відновника (коксу, ПВП, ПГ) (їх теплотворну та відновлювальну здатність) та з визначенням впливу на екологію.

2. Впровадити LIMS/MES для швидкого моніторингу вихідного складу партій сировини та поведінки в реальних умовах їх використання. Суть заходу, згідно з [2] — інтеграція лабораторної інформаційної системи (LIMS) та системи управління виробництвом (MES), для забезпечення оперативного збору, аналізу і передачі даних про якість сировини, параметри процесів і стан агрегатів у режимі реального часу. Такий захід дозволяє швидко реагувати на відхилення параметрів від норми, скорочує час прийняття рішень, мінімізує технологічні ризики та забезпечує безперервний контроль ресурсів і продукції на всіх етапах металургійного виробництва.

3. Укласти довгострокові контракти з валідацією якості та планами запасів конкретних ресурсів; розробити альтернативні логістичні маршрути [5].

4. Сертифікація відповідно до ISO 9001 і ISO 14001. Згідно з [20], впровадження «Process Safety Audit» як фактор моніторингу, включає перевірку технічного стану обладнання, складу та поточної доцільності технологічних операцій та організаційних процедур з метою виявлення вірогідності виникнення ризиків аварій, вибухів, пожеж і викидів небезпечних для екології речовин. Захід забезпечує контроль дотримання вимог безпеки процесів, підвищує надійність виробництва, попереджає техногенні інциденти та мінімізує вплив людського фактора.

5. Розробити план інновацій: проекти енергоефективності, використання альтернативних видів палива, цифрові моделі для оптимізації шихти, згідно з рішеннями, викладеними як результати дослідження в [3].

Висновки та перспективи дослідження

Раціональна система забезпечення металургійного виробництва ресурсами сировини та енергії ґрунтується на принципах комплексного комплаєнс-підходу, який поєднує вимоги екологічної, енергетичної, логістичної, технологічної та фінансово-економічної відповідності. Аналіз показує, що запровадження комплаєнс-забезпечення створює стійку інфраструктуру контролю ресурсних потоків, зменшує технологічні ризики та мінімізує втрати, що виникають через нестабільність постачань, зовнішні фактори впливу ринкового середовища та внутрішні організаційні, що визначаються розбалансуванням виробництва.

В результаті проведеного дослідження були виконані завдання:

1. Здійснено системний аналіз сучасних підходів до комплаєнс-забезпечення у промисловій логістиці, який дозволяє оптимізувати структуру ресурсного забезпечення завдяки раціональному плануванню потреб у сировині, паливі та електроенергії, а також завчасному виявленню відхилень від нормативів чи контрактних зобов'язань в їх якості та постачанні.

2. Проведено ідентифікацію ключових ризиків, що впливають на надійність логістичних маршрутів постачання сировини та енергії, яка показала, що підвищити ефективність логістичних маршрутів і мінімізувати витрати можливо з постачанням і перерозподілом ресурсів між виробничими підрозділами, шляхом застосування ризик-орієнтованих алгоритмів контролю.

3. Визначено вплив стабільності постачання на енергоефективність, ресурсозбереження та якість металургійної продукції. Доведено, що стабільність металургійних технологічних процесів, надійність і передбачуваність ресурсних потоків напряду впливають на якість металопродукції, енергоефективність та ритмічність роботи агрегатів.

4. Доведено роль та значення міжнародних стандартів (ISO, ESG, СВAM, AML/KYC, LIMS/MES, PSM). Показано, що зменшити екологічне навантаження можливо за рахунок контролю відповідності технологій нормам використання енергії,

енергозберігаючих практик, впровадження у виробництво вторинних і відновлюваних ресурсів.

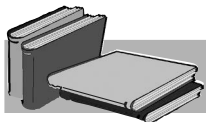
5. Досліджено основні положення моделі інтегрованого комплаєнс-забезпечення логістики, яка дозволить підвищити стійкість виробництва до кризових та форс-мажорних ситуацій, оскільки комплаєнс містить елементи превентивного аналізу, антикризового планування та диверсифікації джерел постачання.

6. Розроблено практичні рекомендації щодо оптимізації логістичних ланцюгів у металургії з урахуванням техніко-технологічних, економічних та регуляторних аспектів виробництва на основі прозорості і керованості ресурсних потоків, що формує довгострокову конкурентоспроможність підприємства та покращує взаємодію з державними регуляторними органами, партнерами і міжнародними інституціями.

Умови війни різко підвищують значимість комплаєнс-забезпечення логістичних маршрутів постачання мінеральної сировини, палива та електроенергії. Військові ризики, такі як руйнування інфраструктури, перебої транспорту, блокування коридорів, кібератаки та енергетичні загрози, по-

требують від керівників металургійних підприємств посиленних механізмів контролю, верифікації та прогнозування. Комплаєнс стає не лише інструментом відповідності, а й фактором виживання: він забезпечує стійкість маршрутів, швидке переключення на альтернативні джерела, мінімізацію втрат та підтримання безперервності виробництва. У таких умовах ефективне комплаєнс-забезпечення у логістиці перетворюється на ключовий елемент стратегічної безпеки та економічної стабільності металургійного підприємства.

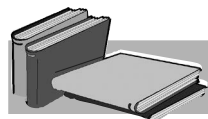
Таким чином, комплаєнс-забезпечення ресурсами виступає ключовим механізмом раціонального використання сировини та енергії в металургійному виробництві, сприяє підвищенню ефективності технологічних процесів, зниженню витрат і екологічних ризиків, а також створює фундамент для сталого розвитку підприємства в умовах нестабільності ринкових і ресурсних факторів. Його застосування доводить високу результативність як у короткостроковій, так і в довгостроковій перспективі, формуючи системний підхід до керування ресурсною безпекою та виробничою надійністю.



ЛІТЕРАТУРА

1. Ensuring Environmental Compliance: Trends and Good Practices. OECD. 2009. 210 p. URL: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2009/05/ensuring-environmental-compliance_g1gha7ea/9789264059597-en.pdf?utm_source (дата звернення: 01.12.2025).
2. Rosenqvist T. Principles of Extractive Metallurgy. Tapir Academic Press. 2004. 506 p. URL: https://books.google.com.ua/books?id=I2mg2ine4AEC&printsec=frontcover&hl=uk&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false (дата звернення: 01.12.2025).
3. Lahri V., Virmani N., Jagtap S. Sustainability framework for manufacturing in the steel industry: emphasis on eco-centric and sociocentric dimensions. *Discover Sustainability*. 2025. Vol. 6. No. 743. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01564-4>
4. Service-Level Agreement Template. Use this free Service Level Agreement Template for Word to manage your projects better. According to the website «ProjectManager». URL: https://www.projectmanager.com/templates/service-level-agreement-template?utm_source (дата звернення: 01.12.2025).
5. Alshaye M.S., AlAmoudi R. Transforming the steel industry supply chain: strategies for optimization, sustainability and resilience. *International Journal of Basic and Applied Science*. 2025. Vol. 14. No. 1. P. 422—434. <https://doi.org/10.14419/61zbgk64>
6. Національний стандарт України. ДСТУ ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT). Системи управління якістю. Вимоги. Видання офіційне. Київ: ДП «УкрНДНЦ». 2016. 30 с. URL: https://education.profitteh.kiev.ua/pluginfile.php/267/mod_page/content/132/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3%20ISO%209001_2015.pdf (дата звернення: 01.12.2025).
7. Rahim M.S.A., Reniers G., Yang M., Bajpai S. Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2024. Vol. 88. 105274. P. 1—17. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274>
8. Національний стандарт України. ДСТУ ISO 14001:2015 (ДСТУ ISO 14001:2015). Системи екологічного управління. Вимоги та настанови щодо застосування. Київ ДП «УкрНДНЦ» 2016. URL: https://quality.nuph.edu.ua/wp-content/uploads/2018/10/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-ISO_14001-2015-.pdf (дата звернення: 01.12.2025).
9. Karkoszka T. Process safety in metallurgical production. *METALURGIJA*. 2020. Vol. 59. No. 3. P. 393—395. URL: <https://hrcak.srce.hr/file/344220> (дата звернення: 01.12.2025).
10. Ключовий показник ефективності (KPI). За матеріалами вебсайту «People force». URL: <https://peopleforce.io/uk/hr-glossary/key-performance-indicator> (дата звернення: 01.12.2025).
11. ESG: ключові поняття для бізнесу та інвесторів. За матеріалами вебсайту «Sayenko Kharenko». URL: <https://sk.ua/uk/esg-kljuchovi-ponjattja-dlja-biznesu-ta-investoriv/> (дата звернення: 01.12.2025).

12. Марченко О. Вуглецеве мито (CBAM) і українська промисловість: удар чи можливість. За матеріалами вебсайту «Українська енергетика». URL: <https://ua-energy.org/uk/posts/vuhletseve-myto-cbam-i-ukrainska-promyslovist-udar-chy-mozhlyvist> (дата звернення: 01.12.2025).
13. Романовська М. Що таке MES Система: Важливість, Функції та Переваги Впровадження. За матеріалами вебсайту «IGITAP». URL: https://digitap.com.ua/shho-take-mes-systema-vazhlyvist-funkcziyi-ta-perevagy-vprovadzheniya/?utm_source (дата звернення: 01.12.2025).
14. Ардімасова В. Автоматизація процесів у лабораторії: впровадження сучасної інформаційної системи LIMS. Е-журнал «Метрологія для підприємства». 2023. № 01. URL: https://mp.techmedia.com.ua/metrolohiya-dlya-pidpryyemstva-2023-1/avtomatyzatsiya-protseviv-u-laboratoriyi-vprovadzheniya?utm_source (дата звернення: 01.12.2025).
15. Taljaad J. Process Safety Management (PSM). According to the website «ISTEC Training». URL: https://istectraining.com/process-safety-managment-psm/?utm_source (дата звернення: 01.12.2025).
16. Ціни на CO₂ в європейській системі торгівлі парниковими квотами (EU ETS): прогнози на 2026—2030 рр. За матеріалами вебсайту «GMK Center». URL: https://gmk.center.ua/infographic/cina-na-co2-v-eu-ets-mozhe-syagnuti-e126-t-do-2030-roku/?utm_source (дата звернення: 01.12.2025).
17. Мішалкін А.П., Петренко В.О., Селегей А.М., Фонарьова Т.А. Дослідження загроз та управління ризиками із впровадженням системи комплаєнс-контролю, як основи економічної безпеки металургійного виробництва. *Метал та литейні України*. 2025. Т. 33. № 3—4(342—343). С. 64—75. <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.064>
18. НПАОП 0.00-4.33-99. Положення щодо розробки планів локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій (57007). За матеріалами вебсайту «ДНАОП Законодавча база». URL: https://dnaop.com/html/57007/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00-4.33-99 (дата звернення: 01.12.2025).
19. What is EHS and why is it important. According to the website «Enhesa». URL: <https://www.enhesa.com/resources/fundamentals/what-is-ehs-and-why-is-it-important/> (дата звернення: 01.12.2025).
20. Сертифікація ISO 9001 (ДСТУ EN ISO 9001:2018; ДСТУ ISO 9001:2015). За матеріалами вебсайту «Viconsult». URL: https://www.viconsult.com/ua/sertyfikatsiia-iso-9001-2015-dstu-iso-9001-2015/?gad_source=1&gad_campaignid=19916990537&gbraid=0AAAAAApSlln-I5Tzb03O8syss6Dqh4SxdE&gclid=CjwKCAiA8vXIBhAtEiwAf3B-g5_HFUQqKjhGFRatOAXnMe_dokrcrFBy4VaLD6QUUk1YnjoZDSQSL1RoCTpsQAvD_BwE (дата звернення: 01.12.2025).



REFERENCES

1. Ensuring Environmental Compliance: Trends and Good Practices. (2009). OECD. https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2009/05/ensuring-environmental-compliance_g1gha7ea/9789264059597-en.pdf?utm_source
2. Rosenqvist, T. (2004). Principles of Extractive Metallurgy. Tapir Academic Press. https://books.google.com.ua/books?id=I2mg2ine4AEC&printsec=frontcover&hl=uk&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
3. Lahri, V., Virmani, N., & Jagtap, S. (2025). Sustainability framework for manufacturing in the steel industry: emphasis on eco-centric and sociocentric dimensions. *Discover Sustainability*, 6, 743. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01564-4>
4. Service-Level Agreement Template. Use this free Service Level Agreement Template for Word to manage your projects better. According to the website “ProjectManager”. https://www.projectmanager.com/templates/service-level-agreement-template?utm_source
5. Alshaye, M. S., & AlAmoudi, R. (2025). Transforming the steel industry supply chain: strategies for optimization, sustainability and resilience. *International Journal of Basic and Applied Science*, 14(1), 422-434. <https://doi.org/10.14419/61zbgk64>
6. Natsionalnyi standart Ukrainy. DSTU ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT). Systemy upravlinnia yakistiu. Vymohy. Vydannia ofitsiine. [National Standard of Ukraine. DSTU ISO 9001:2015 (ISO 9001:2015, IDT). Quality management systems. Requirements. Official edition]. Kyiv: DP “UkrNDNTs”. 2016. https://education.profitteh.kiev.ua/pluginfile.php/267/mod_page/content/132/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3%20ISO%209001_2015.pdf [in Ukrainian].
7. Rahim, M. S. A., Reniers, G., Yang, M., & Bajpai, S. (2024). Risk assessment methods for process safety, process security and resilience in the chemical process industry: A thorough literature review. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 88, 105274, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2024.105274>
8. Natsionalnyi standart Ukrainy. DSTU ISO 14001:2015 (DSTUIISO 14001:2015). Systemy ekolohichnoho upravlinnia. Vymohy ta nastanovy shchodo zastosuvannia. [National Standard of Ukraine. DSTU ISO 14001:2015 (DSTUIISO 14001:2015). Environmental management systems. Requirements and guidelines for application]. Kyiv DP “UkrNDNTs”. 2016. https://quality.nuph.edu.ua/wp-content/uploads/2018/10/%D0%94%D0%A1%D0%A2%D0%A3-ISO_14001-2015-.pdf [in Ukrainian].
9. Karkoszka, T. (2020). Process safety in metallurgical production. *METALURGIJA*, 59(3), 393-395. <https://hrcak.srce.hr/file/344220>

10. Key Performance Indicator (KPI). According to the website "People force". <https://peopleforce.io/uk/hr-glossary/key-performance-indicator>
11. ESG: key concepts for businesses and investors. According to the website "Sayenko Kharenko". <https://sk.ua/uk/esg-kliuchovi-ponjattja-dlja-biznesu-ta-investoriv/>
12. Marchenko, O. (2025). Carbon tax (CBAM) and Ukrainian industry: blow or opportunity. According to the website "Ukrainian Energy". <https://ua-energy.org/uk/posts/vuhletseve-myto-cbam-i-ukrainska-promyslovist-udar-chy-mozhlyvist>
13. Romanovska, M. Shcho take MES Systema: Vazhlyvist, Funktsii ta Perevahy Vprovadzhenia. [What is an MES System: Importance, Functions and Benefits of Implementation]. According to the website "IGITAP". https://digitap.com.ua/shho-take-mes-systema-vazhlyvist-funkcziiyi-ta-perevagy-vprovadzheniya/?utm_source [in Ukrainian].
14. Ardimasova, V. (2023). Avtomatyzatsiia protsesiv u laboratorii: vprovadzhenia suchasnoi informatsiinoi systemy LIMS. E-zhurnal «Metrolohiia dlia pidpryemstva», (01). [Automation of processes in the laboratory: implementation of a modern information system LIMS. E-journal "Metrology for Business"]. https://mp.techmedia.com.ua/metrolohiya-dlya-pidpryemstva-2023-1/avtomatyzatsiya-protsesiv-u-laboratorii-vprovadzheniya?utm_source [in Ukrainian].
15. Taljaad, J. (2025). Process Safety Management (PSM). According to the website "ISTEC Training". https://istectraining.com/process-safety-managment-psm/?utm_source
16. CO₂ price in the EU ETS: forecasts for 2026-2030. According to the website "GMK Center". <https://gmk.center/en/infographic/carbon-price-in-the-eu-ets-to-hit-e126-t-by-2030/>
17. Mishalkin, A. P., Petrenko, V. O., Selegey, A. M., & Fonarova, T. A. (2025). Threat Research and Risk Management with the Implementation of a Compliance Control System as the Basis for the Economic Security of Metallurgical Production. *Metal and Casting of Ukraine*, 33(3-4(342-343)), 64-75. <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.064> [in Ukrainian].
18. NPAOP 0.00-4.33-99. Polozhennia shchodo rozrobky planiv lokalizatsii ta likvidatsii avariinykh sytuatsii i avarii (57007). According to the website «DNAOP Zakonodavcha baza». [NPAOP 0.00-4.33-99. Position of the development of plans for the localization and liquidation of emergency situations and accidents (57007). Based on materials from the website "DNAOP Legislative Base"]. https://dnaop.com/html/57007/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_0.00-4.33-99 [in Ukrainian].
19. What is EHS and why is it important. According to the website "Enhessa". <https://www.enhessa.com/resources/fundamentals/what-is-ehs-and-why-is-it-important/>
20. Sertyfikatsiia ISO 9001 (DSTU EN ISO 9001:2018; DSTU ISO 9001:2015). [ISO 9001 certification (DSTU EN ISO 9001:2018; DSTU ISO 9001:2015)]. According to the website "Viconsult". https://www.viconsult.com/ua/sertyfikatsiia-iso-9001-2015-dstu-iso-9001-2015/?gad_source=1&gad_campaignid=19916990537&gbraid=0AAAApSlln-I5Tzb03O8syss6Dqh4SxdE&gclid=CjwKCAiA8vXIBhAtEiwAf3B-g5_HFUQqkjhGFRatOAXnMe_dokcrFBy4VaLD6QUUk1YnjoZDSQSL1RoCTpsQAvD_BwE [in Ukrainian].

Надійшла/Received 11.01.2026

Прийнята/Accepted 22.02.2026

Опублікована/Published 31.03.2026

Summary

A.P. Mishalkin, PhD (Engin.), Associate Professor,
e-mail: meshalkin@ukr.net

V.O. Petrenko, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Intellectual Property and Project Management,
e-mail: petrenko_v@email.ua, <https://orcid.org/0000-0001-5017-1674>

L.V. Kamkina, Dr. Sci. (Engin.), Professor, Head of the Department of Theoretical Foundations of Metallurgical Processes,
e-mail: lydmila.kamkina@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-8329-0917>

T.A. Fonarova, PhD (Econ.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Intellectual Property and Project Management,
e-mail: fonarevat@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-7726-6999>

Ukrainian State University of Science and Technologies (Dnipro, Ukraine)

Compliance-Ensuring the Efficiency of Logistics Routes for Raw Materials and Energy Resources as a Factor in the Sustainable Development of Metallurgical Production

*Metallurgical production operates in a complex environment characterized by high resource intensity of production processes, increasing requirements for energy efficiency of production and strict regulatory control in the field of its sustainable development. One of the key factors for the stable operation of metallurgical systems is the provision of reliable, safe and economically justified logistics routes for the supply of mineral raw materials, energy resources and auxiliary materials. The conditions of global competition, the unpredictability of transport and foreign economic risks, military threats and high volatility of energy markets necessitate the formation of an effective system of compliance assurance of logistics chains, which include monitoring, risk management, standardization of processes and products with mandatory compliance with both international compliance standards and rules and technical conditions of domestic origin. It is substantiated that compliance in the field of resource and energy supply of metallurgical production performs a dual functional load. On the one hand, it ensures the legal, technical and environmental compliance of the enterprise with internal policies, industry regulations and international quality standards. On the other hand, it creates a control toolkit that minimizes logistical, technological and financial risks that arise in the process of transportation, storage and use of useful properties of raw materials and energy resources during the implementation of the relevant stages of the complex steel production technology. This system acquires particular importance in the context of Ukraine's integration into the European Economic Area, where compliance with ESG requirements (three key criteria for assessing the sustainability and ethics of business: Ecology (Environmental), Social Responsibility (Social) and Governance (Governance)), CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), ISO (International Organization for Standardization) 37301 and ISO 14001 becomes a necessary condition for maintaining competitiveness in international metal products markets. **The purpose of the study** is to scientifically substantiate the principles, institutional mechanisms and structural elements of compliance-ensuring logistics of mineral raw materials and energy resources as an integral factor of sustainable development of metallurgical production. **Research methodology.** The object of the study is the structural elements of compliance-ensuring logistics of mineral raw materials and energy resources as an integral factor of sustainable development of metallurgical production. The following scientific methods were used in the study: system analysis – for a comprehensive assessment of logistical, technological and regulatory factors; risk-based compliance method (Risk-Based Compliance) – for identification and assessment of threats in logistics chains; main provisions of a harmonized methodology for the development of a rational in terms of raw material and fuel costs, energy-efficient closed circuit of relevant technological routes as the basis for creating a coordinated system of technological processes of ferrous metallurgy. The use of approaches of such a methodology will ensure the rational use of resources, minimal energy losses and reduction of man-made environmental impact; comparative analysis – to compare international approaches to logistics risk management in the metallurgical industry; technological analysis methods that have a physicochemical focus, to study the impact of the quality of raw materials and energy resources on the formation of useful properties of metallurgical systems that are the objects of research. **The scientific novelty** of the research results lies in: – expanding the provisions of the concept of integrated compliance-ensurance of raw material and energy logistics, with provisions that combine legal, technical, environmental and technological aspects of risk management in metallurgical production; determining the relationship between the stability of resource supply and the efficiency of the main metallurgical processes (blast furnace production, steelmaking processes, off-furnace processing); developing principles for assessing the safety of logistics routes that take into account technological factors and physicochemical properties of metallurgical production resources, the specifics, conditions and probable risks of their transportation; introducing a risk-oriented system of control of supply/resource provision, which allows objectively assessing the impact of logistical failures on the energy efficiency and resource intensity of production, ecology and quality of metal products. **Research results.** The functional activity of metallurgical compliance assurance concerns the provision of production with mineral raw materials, energy resources/fuel, the reliability of logistics routes for their supply, product quality and sustainable innovative development of production. Compliance assurance with resources acts as a key mechanism for*

*the rational use of raw materials and energy in metallurgical production, contributes to increasing the efficiency of technological processes, reducing costs and environmental risks, and also creates a foundation for the sustainable development of the enterprise in conditions of instability of market and resource factors. Its application proves high efficiency both in the short term and in the long term, forming a systematic approach to managing resource security and production reliability. **The practical value** follows from the obtained theoretical results on reducing technological risks by optimizing the logistics routes of raw materials and energy resources.*

Keywords

Sustainable development, economic and technological security, metallurgical production, threats, risks, management, compliance, logistics routes of raw materials and energy.