

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії та організації виробництва

«Допущено до захисту»
Гарант ОПП



Юрій РЕКОВ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня магістра

за підсумками виконання
освітньо-професійної програми
«Аглодоменне виробництво»
за спеціальністю 136 Металургія

**на тему «Дослідження ефективності використання добавок до дуття
в умовах доменного цеху ПрАТ "КАМЕТ-СТАЛЬ"»**

Керівник роботи

Христина МАЛІЙ

Наставник від бази
практики

Ігор ЄВПЛОВ

*Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають
посилання на відповідне джерело*

Здобувач

Іван ПРОНІН

Підсумкова оцінка за атестацію			
--------------------------------	--	--	--

Голова ЕК

Олександр ФОМЕНКО

Запоріжжя 2026

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

Факультет	<u>гірничо-металургійний</u>
Кафедра	<u>металургії та організації виробництва</u>
Ступінь вищої освіти	<u>магістр</u>
Спеціальність	<u>136 Металургія</u>
ОПП	<u>Аглодоменне виробництво</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант ОПП

Юрій РЕКОВ

08 грудня 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Пронін Іван Миколайович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи «Дослідження ефективності використання добавок до дуття в умовах доменного цеху ПрАТ "КАМЕТ-СТАЛЬ"»

керівник роботи Малій Христина Василівна, доцент, канд. техн. наук.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом Університету №239/10.09.2025 від 10.09.2025 р.

2. Термін подання роботи: 24 січня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Навчальна, методична література з спеціальних дисциплін та дипломування, науково-дослідницькі роботи з тематики доменного виробництва, науково-технічні літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПрАТ "КАМЕТ-СТАЛЬ".

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. Розділ 1. Аналітичні дослідження щодо добавок до дуття в умовах доменного. Розділ 2. Основна частина. Статистичний аналіз даних роботи доменних печей з використанням різних добавок до дуття. Визначення взаємозв'язків впливу зміни кількості добавок до дуття на основні технологічні показники доменного процесу та якість чавуну. Розробка пропозицій щодо підвищення ефективності використання добавок до дуття в умовах доменного цеху ПрАТ "КАМЕТ-СТАЛЬ". Розділ 3. Охорона праці. Розділ 4. Розрахунки економічної доцільності запропонованих рішень. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

5. Перелік графічного (демонстраційного) матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): 6 слайдів основної частини, 1 слайд економічна частина.

6. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
Розділ 1	Малій Х.В., доцент
Розділ 2	Малій Х.В., доцент
Розділ 3	Малій Х.В., доцент
Розділ 4	Малій Х.В., доцент

7. Дата видачі завдання 08.12.2025 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Розділ 1. Теоретичний розділ (Аналітично-пошуковий)	08.12.2025-27.12.2025
2	Розділ 2. Технологічний розділ	27.12.2025-10.01.2026
3	Розділ 3. Охорона праці	10.01.2026-14.01.2026
4	Розділ 4. Економічний розділ	14.01.2026-17.01.2026
5	Висновки, перелік посилань, вступ, зміст, автореферат	17.01.2026-19.01.2026
6	Подання завершеної роботи. Перевірка на академічний плагіат	19.01.2026-22.01.2026
7	Остаточне оформлення роботи, презентаційного матеріалу	22.01.2026-24.01.2026
8	Рецензування завершеної роботи. Захист	26.01.2026-31.01.2026

Здобувач

Іван ПРОНІН

Керівник роботи

Христина МАЛІЙ

АНОТАЦІЯ

Пронін І.М. Дослідження ефективності використання добавок до дуття в умовах доменного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» - Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 136 Металургія, ОПП «Аглодоменне виробництво» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єкт дослідження є технологічний процес виплавки чавуну в доменних печах при використанні пиловугільного палива.

Предмет дослідження є закономірності впливу витрати ПВП, температури дуття та вмісту кисню на показники роботи печі та собівартість продукції.

Кваліфікаційна робота магістра присвячена науковому обґрунтуванню та практичному дослідженню ефективності використання добавок до дуття, зокрема пиловугільного палива (ПВП), у доменному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Актуальність дослідження зумовлена необхідністю радикального зниження собівартості чавуну як базового напівфабрикату в умовах обмеженого попиту на високомаржинальну продукцію комбінату, таку як катана осьова заготовка.

У першому розділі виконано аналітичний огляд світових тенденцій впровадження технологій вдування ПВП та надано детальну характеристику об'єкта дослідження. Розглянуто конструктивні особливості доменних печей № 1М та № 9, обладнаних двоконусними завантажувальними апаратами, та проаналізовано якість сировинної бази підприємства станом на листопад 20.... року.

Другий (технологічний) розділ містить методику розрахунку показників теплового стану горна та результати порівняльного аналізу роботи печей. Встановлено, що на ДП № 9 при витраті ПВП кг/т досягнуто питомої витрати коксу кг/т при коефіцієнті заміни

кг/кг. Виконано математичне моделювання впливу параметрів дуття на теоретичну температуру горіння, що дозволило визначити раціональні режими збагачення дуття киснем.

У третьому розділі розроблено заходи з охорони праці та промислової безпеки при роботі з вибухонебезпечним вугільним пилом та киснем.

Четвертий розділ присвячено економічному обґрунтуванню технологічних рішень та оцінці ефективності впровадження пиловугільного палива (ПВП) на ДП № 9 ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Проведено аналіз структури собівартості чавуну, зокрема паливної складової, та визначено, що витрати на паливо-енергетичні ресурси складають ... –...% загальної собівартості. Розрахунками підтверджено економічну доцільність заміщення дорогоцінного металургійного коксу дешевшим ПВП, що забезпечує зниження собівартості на грн/т чавуну та сумарний річний економічний ефект млн грн. Виконано аналіз чутливості та оцінку ризиків проекту, визначено точку беззбитковості та запас фінансової стійкості, що підтверджує рентабельність технології навіть за коливань цін на енергоносії. Розділ підтверджує стратегічну ефективність переходу до інтенсивних режимів роботи з ПВП для зміцнення конкурентних позицій підприємства.

Апробація результатів роботи: Пронін І.М., Бойко М.М. Аналіз особливостей використання добавок до дуття в умовах доменного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Start in Science: студентська науково-технічна конференція : збірник тез і анотацій наукових доповідей. – Одеса : Олді+, 2025. С. 83-85. <https://dspace.mipolytech.education/items/6e2cb261-1e14-4ed9-a6a8-8c2c1c9543c8>

ДОМЕННА ПЛАВКА, ПИЛОВУГІЛЬНЕ ПАЛИВО, КОМБІНОВАНЕ ДУТТЯ, ТЕОРЕТИЧНА ТЕМПЕРАТУРА ГОРІННЯ, КОЕФІЦІЄНТ ЗАМІНИ КОКСУ, СОБІВАРТІСТЬ ЧАВУНУ

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ	8
ВСТУП	9
1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ	11
1.1 Світовий досвід та перспективи використання замінників коксу в доменному виробництві	11
1.2 Теоретичні аспекти горіння вугільного пилу у фурменому вогнищі	11
1.3 Характеристика ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» та аналіз роботи доменного цеху	13
1.4 Аналіз якісних показників шихтових матеріалів та палива у звітному періоді	18
Висновки до розділу 1	19
2 ТЕХНОЛОГІЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КОМБІНОВАНОГО ДУТТЯ	21
2.1 Методика розрахунку показників теплового стану горна та теоретичної температури горіння	21
2.2 Математичне моделювання та оптимізація дуттєвого режиму	24
2.3 Визначення фактичного коефіцієнта заміщення коксу пиловугільним паливом	28
2.4 Аналіз газодинамічних режимів та впливу рудного навантаження на стабільність сходу шихти	29
2.5 Аналіз показників якості чавуну та контроль теплового стану горна	32
2.6 Шлаковий режим та десульфуратійна здатність шлаків в умовах вдування ПВП	32
Висновки до розділу 2	33
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ В УМОВАХ ДОМЕННОГО ЦЕХУ	34
3.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів у доменному виробництві	34
3.2 Особливості безпеки при роботі з установками пиловугільного палива та киснем	35

3.3 Організація системного навчання та підготовки персоналу до надзвичайних ситуацій	36
3.4 Засоби індивідуального захисту та алгоритм дій в аварійних ситуаціях	37
3.5 Алгоритм дій персоналу при раптовому припиненні енергопостачання та аварійних зупинках	41
3.6 Охорона навколишнього середовища та екологічна безпека при впровадженні ПВП	42
3.7 Організаційна структура управління безпекою та роль добровільних ланок	43
Висновки до розділу 3	44
4 ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ ПВП	46
4.1 Аналіз структури собівартості чавуну та паливної складової	46
4.2 Методика розрахунку економічної ефективності та вихідні дані	47
4.3 Розрахунок зниження собівартості та річного економічного ефекту	47
4.4 Аналіз чутливості та оцінка ризиків проєкту	48
Висновки до розділу 4	51
ВИСНОВКИ	52
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	54
ДОДАТОК А. Технічна характеристика доменних печей ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Порівняльні конструктивні параметри основних виробничих одиниць доменного цеху	56
ДОДАТОК Б. Добові показники роботи доменних печей	57
ДОДАТОК В. Хімічний склад та фізико-механічні властивості шихтових матеріалів	59
ДОДАТОК Д. Детальні показники роботи ДП № 9 у звітному періоді	67
ДОДАТОК Ж. Алгоритм розрахунку економічного ефекту від впровадження ПВП	74
ДОДАТОК И. Результати розрахунку аналізу оперативної собівартості	75

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Скорочення та аббревіатури:

ГМК — гірничо-металургійний комплекс.

ДП — доменна піч.

ЗІЗ — засоби індивідуального захисту.

ПВП — пиловугільне паливо (PCI — Pulverized Coal Injection).

ПЛАС — план локалізації та ліквідації аварійних ситуацій.

АСУ ТП — автоматизована система управління технологічним процесом.

ЗРС — залізородна сировина.

СЛР — серцево-легенева реанімація.

Технологічні символи та одиниці:

T_f — теоретична температура горіння у фурменому вогнищі (°C).

K_{zam} — питомий коефіцієнт заміщення коксу вугіллям (кг/кг).

V^{daf} — вихід летких речовин на суху беззольну масу палива (%).

A^d — зольність вугілля на суху масу (%).

W_t^r — загальна робоча волога палива (%).

Q_i^r — нижча теплота згоряння палива (кДж/кг).

CSR — показник гарячої міцності коксу після реакції (%).

CRI — індекс реакційної здатності коксу (%).

I_d — фізичне тепло гарячого дуття (кДж/м³).

ω — вологість атмосферного дуття (г/м³).

[Si] — масова частка кремнію в чавуні (%).

[S] — масова частка сірки в чавуні (%).

$(CaO)/(SiO_2)$ — показник основності доменного шлаку.

Економічні терміни:

CAPEX — капітальні вкладення (Capital Expenditures).

OPEX — операційні витрати (Operating Expenditures).

E_{annual} — сумарний умовний річний економічний ефект (млн грн).

E_{ton} — зниження собівартості виробництва однієї тонни чавуну (грн/т).

ВСТУП

Сучасний розвиток металургійної галузі України відбувається в умовах безпрецедентних викликів, пов'язаних із дефіцитом енергоресурсів, зростанням вартості сировини та необхідністю адаптації виробництва до вимог глобального ринку. Доменне виробництво як найбільш енергоємний переділ металургійного циклу залишається ключовою ланкою, що визначає конкурентоспроможність кінцевої металопродукції. Витрати на паливо, зокрема на металургійний кокс, складають левову частку у структурі собівартості чавуну, що робить впровадження ресурсозберігаючих технологій питанням виживання підприємств.

Як зазначається у фундаментальних працях з теорії доменної плавки [1] та сучасному підручнику фахівців «Метінвест Політехніки» [2], найбільш ефективним інструментом зниження витрат коксу є технологія вдування пиловугільного палива (ПВП) у поєднанні зі збагаченням дуття киснем. Ця технологія дозволяє не лише замінити дорогий дефіцитний кокс дешевшим енергетичним вугіллям, а й інтенсифікувати процеси відновлення у печі завдяки підвищенню вмісту водню у продуктах горіння.

Для ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», яке входить до складу Групи Метінвест та є містоутворюючим підприємством Кам'янського, питання енергоефективності набуває особливої гостроти. Специфікою комбінату є виробництво унікальної продукції — катаної осьової заготовки, на яку в сучасних умовах спостерігається нестабільний попит. У ситуації, коли реалізація високомаржинального прокату обмежена, єдиним шляхом підтримки рентабельності підприємства є радикальне зниження собівартості чавуну на першому етапі металургійного переділу. Оскільки чавун є базою для виробництва всієї лінійки продукції (арматури, катанки, куль та профілів), будь-яке

технологічне вдосконалення дуттєвого режиму дає суттєвий кумулятивний економічний ефект.

Актуальність теми роботи полягає у необхідності наукового обґрунтування режимів вдування ПВП, які забезпечили б максимальне заміщення коксу при збереженні стабільного теплового та газодинамічного стану доменних печей великого об'єму.

Метою роботи є дослідження ефективності використання добавок до дуття та розробка рекомендацій щодо оптимізації параметрів комбінованого дуття для доменних печей ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ».

Об'єктом дослідження є технологічний процес виплавки чавуну в доменних печах при використанні пиловугільного палива.

Предметом дослідження є закономірності впливу витрати ПВП, температури дуття та вмісту кисню на показники роботи печі та собівартість продукції.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ХАРАКТЕРИСТИКА ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Світовий досвід та перспективи використання заміників коксу в доменному виробництві

Світова практика експлуатації доменних печей останніх десятиліть демонструє стійку тенденцію до мінімізації питомих витрат коксу. Аналіз досвіду провідних металургійних компаній світу, зокрема за звітами Jellinbach Resources [3], показує, що на сучасних агрегатах витрата ПВП досягає рівня 180–220 кг/т чавуну. Це стає можливим завдяки глибокій підготовці шихти та використанню високих параметрів комбінованого дуття.

Вагомий внесок у розвиток технологій вдування ПВП зробили інжинірингові компанії, такі як VA TECH [4, 5], які розробили системи прецизійного розподілу вугільного пилу по фурмах печі. Слід підкреслити, що заміна коксу вугіллям має не лише економічний, а й екологічний аспект. Використання ПВП сприяє зниженню викидів вуглекислого газу через зміну співвідношення вуглецю та водню в паливному балансі, що корелює із сучасними стратегіями «зеленої» металургії. Проте успішна реалізація таких режимів вимагає суворого дотримання теплового балансу фурменого вогнища, оскільки вдування холодного пилу супроводжується значними енерговитратами на його нагрів та газифікацію.

1.2 Теоретичні аспекти горіння вугільного пилу у фурменому вогнищі

Процес спалювання вугільного пилу у фурменому вогнищі доменної печі характеризується екстремально коротким часом

перебування частинки в окислювальній зоні — соті частки секунди. Згідно з дослідженнями Лялюка В.П. та Семенова Ю.С. [6], за цей мікроскопічний проміжок часу вугільна частинка має пройти етапи нагріву, термічної деструкції з виділенням летких речовин та безпосереднього горіння коксового залишку. Швидкість цих процесів лімітується переважно дифузією кисню до поверхні реагування. Схематичне зображення цих процесів наведено на рис. 1.1.

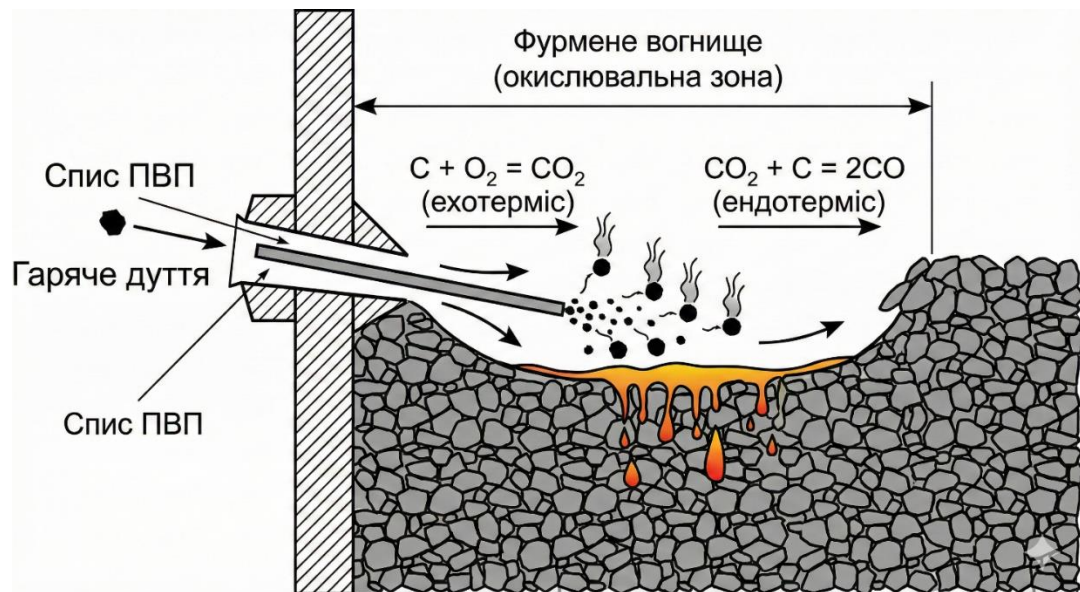


Рисунок 1.1 - Схема циркуляційної зони фурменого вогнища при вдуванні пиловугільного палива (ПВП) та основні зони протікання хімічних реакцій

Зона окиснення (ближче до фурми, рис. 1.1):

- Тут відбувається реакція
 $C + O_2 = CO_2$.
- Це екзотермічна реакція (виділення тепла), яка створює необхідну високу температуру в горні. На схемі вона позначена як «екзотерміс» (екзотермічний процес).
- Вугільна частинка миттєво нагрівається, з неї виділяються леткі речовини, які згорають першими.

Зона відновлення (на межі з коксовою насадкою, рис. 1.1):

- Тут відбувається реакція

$$\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}.$$
- Це ендотермічна реакція (поглинання тепла). Продукт цієї реакції — оксид вуглецю (CO) — є основним відновником заліза в шахті печі.
- Також тут відбувається дисоціація вологи та летких речовин вугілля, що додатково охолоджує зону.

Критичним параметром тут виступає теоретична температура горіння (T_f), яка повинна підтримуватися на рівні, що забезпечує нормальну фільтрацію продуктів плавки крізь коксову насадку. Неповне згорання вугілля призводить до винесення сажистого вуглецю за межі циркуляційної зони, що провокує явища «засмічення» горна та погіршення газодинаміки печі. Як зазначає Ярошевський С.Л. [7], ефективне використання ПВП неможливе без адекватної компенсації теплових втрат шляхом підвищення температури дуття та збагачення його киснем.

1.3 Характеристика ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» та аналіз роботи доменного цеху

ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» представляє собою сучасний металургійний комплекс повного циклу, який було сформовано шляхом стратегічного об'єднання потужностей Дніпровського металургійного комбінату та Дніпровського коксохімічного заводу. Розташування підприємства у місті Кам'янському, важливому промисловому центрі Дніпропетровської області, забезпечує зручну логістику та доступ до ключових сировинних баз України. З 2021 року підприємство інтегроване до складу Групи Метінвест, що дозволило стабілізувати

ланцюги постачання залізорудної сировини та забезпечити доступ до сучасних інвестиційних програм модернізації.

Виробнича структура комбінату охоплює всі етапи отримання металопродукції: від виробництва коксу та агломерату до виплавки чавуну, сталі та випуску широкого сортаменту прокату. Підприємство спеціалізується на виробництві безперервнолитої заготовки, фасонного і сортового прокату, зокрема арматури, катанки, мелючих куль та спеціальних профілів. Важливою технологічною особливістю ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» є наявність унікального виробництва катаної осьової заготовки для залізничного транспорту, за обсягами та якістю якої підприємство займає провідні позиції на світовому ринку. Однак, з огляду на воєнно-політичні виклики та зміну логістичних маршрутів, навантаження потужностей з випуску осей у звітний період було обмеженим, що зумовило необхідність концентрації на підвищенні ефективності базових переділів.

Доменне виробництво підприємства є фундаментом його економічної стійкості. У сучасних умовах, коли комбінат виконує роль одного з ключових виробників сталі в Україні після втрати контролю над маріупольськими активами Групи Метінвест, навантаження на доменний цех суттєво зросло. Стратегія розвитку підприємства передбачає перехід до «зеленої металургії» та поступову декарбонізацію процесів. Впровадження технології вдування пиловугільного палива на доменних печах № 1М та № 9 є критично важливим кроком у цьому напрямку, оскільки дозволяє не лише знизити собівартість продукції, а й зменшити техногенне навантаження на екологію регіону за рахунок оптимізації паливного балансу.

На рис. 1.2 представлено весь цикл підготовки та пневматичного транспортування пиловугільного палива до фурменних приладів доменної печі (рис. 1.3).

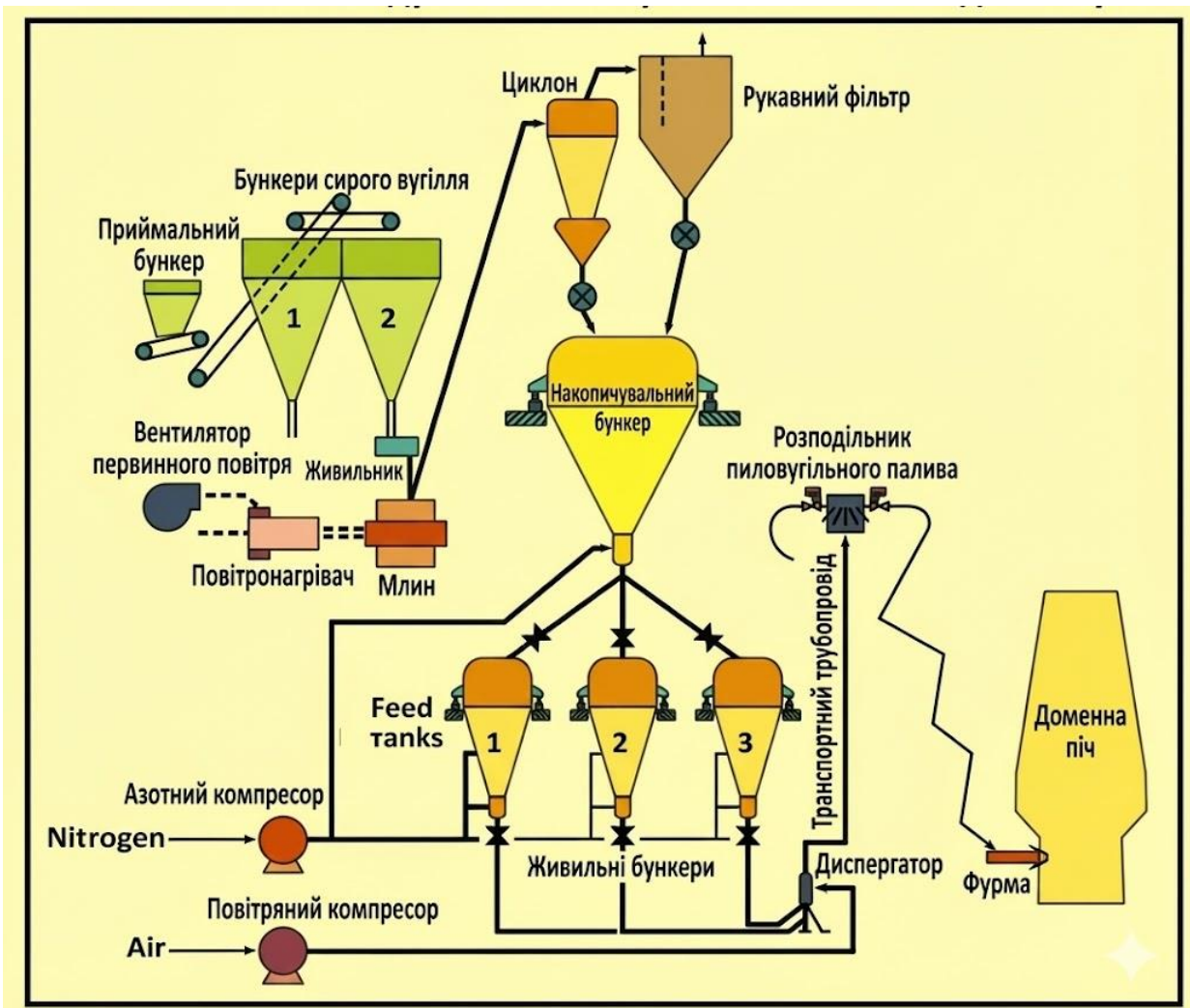


Рисунок 1.2 - Технологічна схема підготовки та пневматичного транспортування пилувугільного палива до фурменних приладів доменної печі

Доменний цех комбінату представлений доменними печами № 1М та № 9. Обидві печі обладнані традиційними двоконусними завантажувальними пристроями (рис. 1.4). Така конструктивна особливість накладає обмеження на можливості регулювання радіального розподілу матеріалів у порівнянні з сучасними безконусними апаратами (БЗП). При роботі з високими витратами ПВП це вимагає від технологічного персоналу особливої уваги до

формування «центральної віддушини» шляхом специфічних систем завантаження для забезпечення стабільного газового потоку (рис. 1.5).

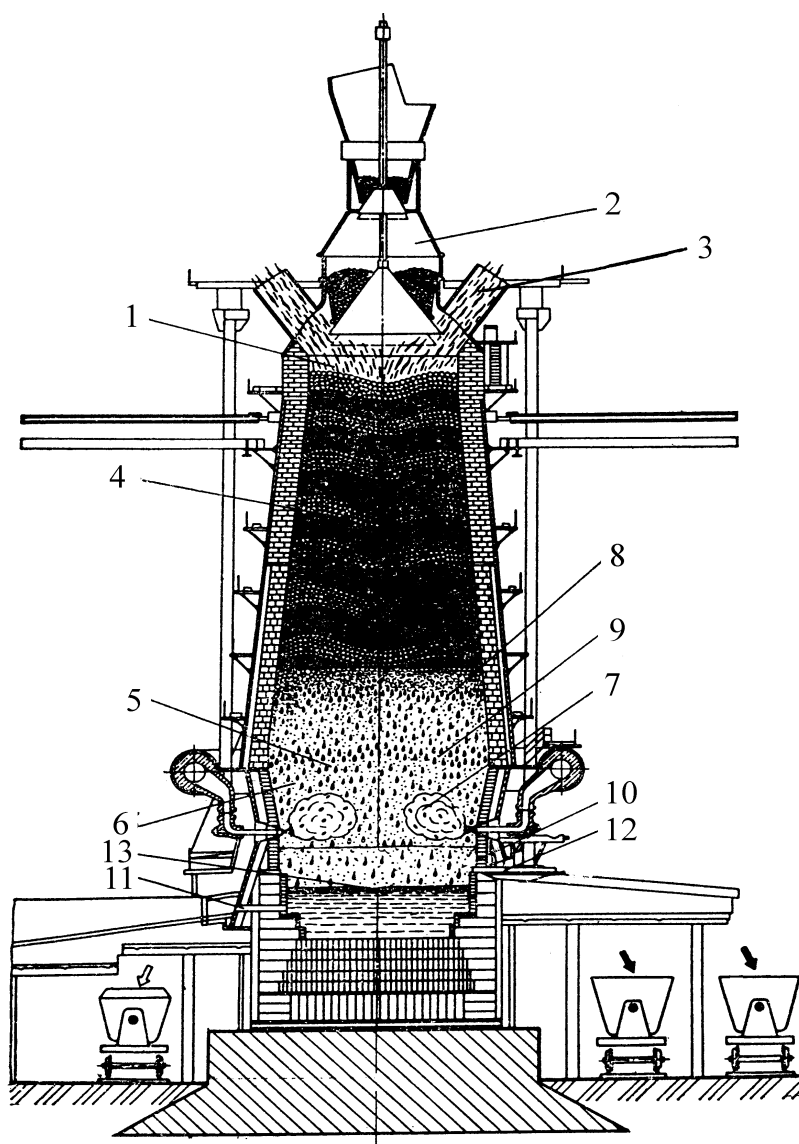


Рисунок 1.3 - Розріз доменної печі: 1 – колошник; 2 – засипний апарат; 3 – газовідводи; 4 – шахта; 5 – розпар; 6 – заплечіки; 7 – зони горіння коксу; 8,9 – горизонти створення чавуну і шлаку; 10 – повітряні фурми; 11 – чавунна лъотка; 12 – шлакова лъотка; 13 – горно

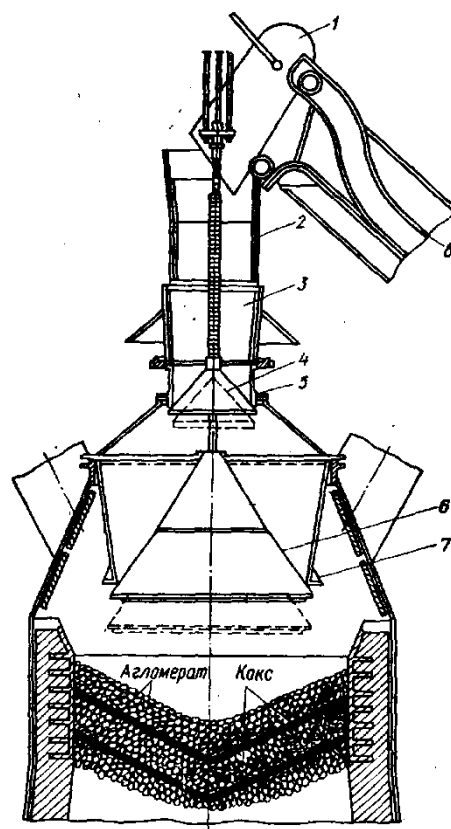


Рисунок 1.4 - Засипний апарат доменної печі: 1 – скіп; 2 – приймальна воронка; 3 – воронка, що обертається; 4 – малий конус; 5 – обертовий розподільувач шихти; 6 – великий конус; 7 - воронка великого конуса; 8 – похилий міст

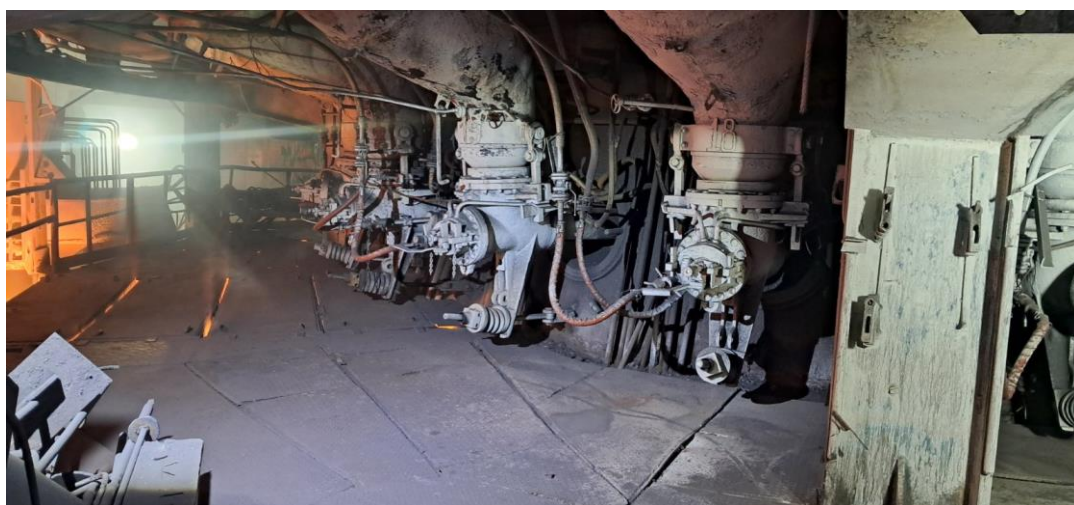


Рисунок 1.5 - Вигляд фурменої зони доменної печі ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»



Рисунок 1.6 - Випуск чавуну на ливарному дворі доменної печі ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ»

1.4 Аналіз якісних показників шихтових матеріалів та палива у звітному періоді

Стабільність доменної плавки та ефективність використання добавок до дуття безпосередньо залежать від фізико-хімічних властивостей компонентів шихти. У листопаді 2025 року основну частину залізорудної шихти ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» складав офлюсований агломерат власного виробництва. Аналіз звітних даних технічного відділу [11] дозволив встановити, що середній вміст заліза в агломераті становив 55,1%, що при основності $\text{CaO/SiO}_2 = 1,25$ забезпечує необхідний рівень рідкорухомості шлаків. Проте наявність дрібної фракції (0–5 мм) на рівні 12,8% створює додатковий опір газовому потоку, що стає критичним при інтенсифікації вдування пиловугільного палива.

Особлива увага в дослідженні приділена якості металургійного коксу, оскільки при вдуванні ПВП його роль як розпушувача шихти значно зростає. Середній вміст сірки в коксі становив 0,77%, а зольність — 10,8%. Однак найбільш критичним показником для умов цеху є

гаряча міцність коксу (CSR), яка у звітному періоді перебувала на рівні 50,36%. Згідно з рекомендаціями фахівців [2, 8], для стабільного вдування вугілля обсягом понад 120 кг/т бажано мати показник CSR > 60%. Поточний рівень міцності обмежує можливість подальшого форсування печей та вимагає прецизійного керування тепловим станом горна для запобігання деградації коксової насадки.

Характеристика вугілля, що використовувалося для приготування ПВП, свідчить про його високу реакційну здатність. При зольності 7,52% та виході летких речовин 32,83%, це паливо забезпечує швидке займання у фурменому вогнищі. Проте високий вміст летких речовин зумовлює значний ендотермічний ефект піролізу, що вимагає адекватної теплової компенсації параметрами дуття.

Висновки до розділу 1

ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» представляє собою сучасний металургійний комплекс повного циклу, який було сформовано шляхом стратегічного об'єднання потужностей Дніпровського металургійного комбінату та Дніпровського коксохімічного заводу. Розташування підприємства у місті Кам'янському, важливому промисловому центрі Дніпропетровської області, забезпечує зручну логістику та доступ до ключових сировинних баз України. З 2021 року підприємство інтегроване до складу Групи Метінвест, що дозволило стабілізувати ланцюги постачання залізорудної сировини та забезпечити доступ до сучасних інвестиційних програм модернізації.

Виробнича структура комбінату охоплює всі етапи отримання металопродукції: від виробництва коксу та агломерату до виплавки чавуну, сталі та випуску широкого сортаменту прокату. Комбінат спеціалізується на виробництві безперервнолитої заготовки, фасонного і сортового прокату, зокрема арматури, катанки, мелючих куль та

спеціальних профілів. Важливою технологічною особливістю ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» є наявність унікального виробництва катаної осьової заготовки для залізничного транспорту, за обсягами та якістю якої підприємство займає провідні позиції на світовому ринку. Однак, з огляду на воєнно-політичні виклики та зміну логістичних маршрутів, завантаження потужностей з випуску осей у звітний період було обмеженим, що зумовило необхідність концентрації на підвищенні ефективності базових переділів.

Доменне виробництво підприємства є фундаментом його економічної стійкості. У сучасних умовах, коли комбінат виконує роль одного з ключових виробників сталі в Україні після втрати контролю над маріупольськими активами Групи Метінвест, навантаження на доменний цех суттєво зросло. Стратегія розвитку підприємства передбачає перехід до «зеленої металургії» та поступову декарбонізацію процесів. Впровадження технології вдування пиловугільного палива на доменних печах № 1М та № 9 є критично важливим кроком у цьому напрямку, оскільки дозволяє не лише знизити собівартість продукції, а й зменшити техногенне навантаження на екологію регіону за рахунок оптимізації паливного балансу.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ В УМОВАХ ДОМЕННОГО ЦЕХУ

3.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів у доменному виробництві

Забезпечення безпечних умов праці на ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» базується на принципах пріоритетності життя і здоров'я працівників над результатами виробничої діяльності, що відповідає загальній стратегії Групи Метінвест у сфері промислової безпеки. Доменне виробництво належить до категорії об'єктів з підвищеним ступенем ризику, що зумовлено поєднанням екстремальних температурних режимів, наявності токсичних газів та складної механізації процесів. Основним нормативним документом, що регламентує безпеку праці у цеху, є Закон України «Про охорону праці» та профільні галузеві правила.

Аналіз умов праці на дільницях доменних печей № 1М та № 9 дозволяє класифікувати шкідливі фактори за декількома напрямками. Хімічний фактор представлений насамперед доменним газом, який містить значну концентрацію оксиду вуглецю (СО). Оскільки цей газ не має кольору та запаху, він становить особливу небезпеку при негерметичності фурменних приладів або систем завантаження. Фізичні фактори включають інтенсивне теплове випромінювання від розплавленого чавуну та шлаку. Як демонструє рис. 3.1, робота горнового на ливарному дворі вимагає постійного перебування в зоні дії високих температур та бризок металу, що зумовлює суворі вимоги до застосування спеціалізованих термостійких засобів індивідуального захисту [10].

Додатково персонал піддається впливу виробничого шуму, вібрації від роботи систем аспірації та повітрорудних машин, а також

психофізіологічним навантаженням, пов'язаним із високою відповідальністю під час ведення технологічного процесу.



Рисунок 3.1 - Виконання технологічних операцій горновим доменної печі ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» в умовах інтенсивного теплового випромінювання

3.2 Особливості безпеки при роботі з установками пиловугільного палива та киснем

Впровадження технології вдування ПВП на підприємстві супроводжується появою нових специфічних ризиків, головним з яких є вибухонебезпечність вугільного пилу. Аерозоль вугілля у суміші з повітрям здатен до миттєвого займання при досягненні нижньої межі вибуховості (НМВ), яка для використовуваних марок вугілля становить близько 12–30 г/м³. Для мінімізації цього ризику в доменному цеху реалізовано комплекс інженерних заходів. Весь технологічний тракт — від розмелювання вугілля до введення його у фурми — є повністю герметичним і працює під надлишковим тиском азоту.

Згідно з інструкцією ІОП-047-2025 [11], критичним показником безпеки в бункерах ПВП є вміст кисню, який не повинен перевищувати 10% за об'ємом. Це досягається шляхом постійної інертизації азотом високої чистоти. Окрім вибухонебезпечності, вугільний пил має виражену токсичну дію на органи дихання, що вимагає використання сучасних засобів фільтрації у системах пилопридушення. Окрему увагу приділено безпеці при роботі з киснем, який використовується для інтенсифікації горіння ПВП. Оскільки кисень є потужним окиснювачем, будь-який контакт кисневих комунікацій з мастильними матеріалами або жирами призводить до миттєвого вибуху, що вимагає суворого дотримання регламентів знежирення інструменту та арматури.

3.3 Організація системного навчання та підготовки персоналу до надзвичайних ситуацій

Важливою складовою культури безпеки на підприємстві є безперервний процес навчання. На ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» впроваджено систему щомісячних тренувань для всього персоналу доменного цеху. Програма підготовки включає обов'язкові модулі з надання домедичної допомоги, протипожежної безпеки та відпрацювання дій за планом локалізації аварій.

Практичне навчання з тактичної та екстреної медицини проводиться за участю кваліфікованих інструкторів. Як ілюструє рис. 3.2, під час тренінгів працівники відпрацьовують критично важливі навички, такі як серцево-легенева реанімація на спеціалізованих манекенах.

Системність цих занять дозволяє довести дії персоналу до автоматизму, що мінімізує наслідки можливих виробничих травм.



Рисунок 3.2 - Практичне відпрацювання навичок серцево-легеневої реанімації під час щомісячного тренування персоналу доменного цеху

3.4 Засоби індивідуального захисту та алгоритм дій в аварійних ситуаціях

Організація робіт на ливарному дворі ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» передбачає обов'язкове використання персоналом засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), що відповідають європейським стандартам безпеки. Стандартний комплект горнового доменної печі включає суконний костюм з вогнезахисним просоченням, захисну каску з термостійким щитком, спецвзуття з металевим підноском та вачеги. Для захисту органів дихання у зонах можливої загазованості працівники забезпечуються фільтруючими або ізолюючими протигазами (ПШ-1, ПШ-2). Для контролю навколишнього середовища на наявність газів використовують прибор Dräger X-am 2500, 5000, 8000 (рис. 3.3). Також є в наявності саморятувальні пристрої органів дихання CI-30 (рис. 3.4) — це засоби індивідуального захисту (ЗІЗОД), призначені для екстреної евакуації людей із задимлених, загазованих або отруєних приміщень.



Рисунок 3.3 - Dräger X-am 2500, 5000, 8000



Рисунок 3.4 - Саморятівник Ізолювальний Ci-30 KS

На підприємстві регулярно проводяться практичні тренінги з тактичної та екстреної медицини, відпрацювання при виявленні вибухонебезпечних предметів. Як ілюструють рис. 3.5 та рис. 3.6, працівники відпрацьовують навички евакуації поранених після військових дій та методи зупинки кровотеч і накладання пов'язок під наглядом кваліфікованих інструкторів Червоного Хреста. На рис. 3.7 та рис. 3.8 показано дії ланки пожежної безпеки та пожежної частини при ліквідації займань.

Такі заходи дозволяють мінімізувати наслідки можливих виробничих травм та забезпечують готовність колективу до позаштатних ситуацій.



Рисунок 3.5 - Відпрацювання евакуації пораненого



Рисунок 3.6 - Навчання персоналу методам накладання пов'язок та стабілізації постраждалих при механічних травмах при проведенні тренувань на робочих місцях



Рисунок 3.7 - Тренування персоналу (ланки пожежної безпеки) з гасіння займання



Рисунок 3.8 - Дії пожежної частини при ліквідації займань

Важливою складовою системи безпеки є План локалізації та ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС) [12]. У разі виникнення позаштатної ситуації, наприклад, прогару фурми або раптової зупинки подачі азоту в систему ПВП, персонал діє за чітко визначеним алгоритмом.

Першочерговим завданням є негайне припинення подачі вугільного пилу та кисню на аварійну ділянку, виведення людей у безпечну зону та повідомлення диспетчера цеху. Регулярні тренування персоналу та наявність стаціонарних, та особистих газоаналізаторів дозволяють забезпечити високий рівень захищеності в умовах сучасного металургійного виробництва.

Результати аналізу, наведені у табл. 3.1, підтверджують необхідність суворого контролю температурного режиму та концентрації пилу в приміщеннях установки ПВП. Таким чином, інтегрована система промислової безпеки ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» дозволяє ефективно впроваджувати інноваційні технології вдування добавок до дуття, мінімізуючи ризики для персоналу та обладнання.

Таблиця 3.1 — Характеристика вибухонебезпечності вугільного пилу для умов доменного цеху

Показник	Одиниця виміру	Значення для вугілля газової групи
Нижня межа вибуховості	г/м ³	12,0 – 30,0
Температура самозаймання аерогелю	°C	180 – 220
Температура самозаймання аерозолю	°C	450 – 580
Максимальний тиск вибуху	МПа	0,7 – 0,9

3.5 Алгоритм дій персоналу при раптовому припиненні енергопостачання та аварійних зупинках

Раптове припинення енергопостачання є одним із найбільш критичних ризиків для доменного цеху, оскільки воно призводить до миттєвої зупинки насосних станцій охолодження печі, систем подачі

дутьтя та установки вдування пиловугільного палива (ПВП). В умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» алгоритм дій персоналу при настанні такої події є чітко регламентованим і доведеним до автоматизму завдяки щомісячним практичним тренуванням. Першочерговим завданням при знеструмленні є негайне автоматичне та дублююче ручне перекриття подачі вугільного пилу та кисню до фурмених приладів, щоб запобігти завалу фурм розплавленим металом та унеможливити вихід горючих газів у приміщення цеху.

Особлива небезпека полягає у припиненні циркуляції води в охолоджувальних приладах доменної печі, що при температурі гарячого дутьтя 1100 °С може призвести до їх прогару протягом лічених хвилин. У такому разі персонал діє згідно з оперативною частиною Плану локалізації та ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС), забезпечуючи перехід на резервне живлення від незалежних джерел або підключення парових насосів. Важливим аспектом безпеки є також підтримка надлишкового тиску азоту в накопичувальних бункерах ПВП для запобігання підсмоктуванню повітря та утворення вибухонебезпечної суміші, оскільки при відсутності електроенергії системи активної інертизації можуть перейти в режим обмеженого функціонування. Кожна бригада має у своєму складі призначених відповідальних осіб, які формують ланки надання долікарської допомоги та протипожежного захисту, що дозволяє координувати дії безпосередньо на місці виникнення аварії до прибуття спеціалізованих служб.

3.6 Охорона навколишнього середовища та екологічна безпека при впровадженні ПВП

Впровадження технології вдування ПВП на ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» має не лише економічне обґрунтування, а й значний вплив на екологічну безпеку регіону. Зменшення питомої витрати коксу

безпосередньо сприяє зниженню викидів шкідливих речовин коксохімічного виробництва, проте водночас висуває підвищені вимоги до герметичності систем підготовки вугільного пилу. Екологічна безпека установки ПВП забезпечується використанням багатоступеневої системи аспірації, де основним елементом виступають високоефективні рукавні фільтри. Ці пристрої дозволяють уловлювати до 99,9% дрібнодисперсного вугільного пилу, запобігаючи його потраплянню в атмосферне повітря міста Кам'янського.

Системний моніторинг стану навколишнього природного середовища є невід'ємною частиною регламенту роботи цеху. Спеціалізовані датчики контролюють концентрацію пилу в зоні роботи установки в реальному часі, а будь-яке відхилення від нормативних показників стає сигналом для негайної зупинки обладнання та проведення ревізії герметичності з'єднань. Окрім атмосферних викидів, увага приділяється поводженню з відходами, зокрема уловленим пилом, який повертається у технологічний цикл, що відповідає принципам безвідходного виробництва та циркулярної економіки Групи Метінвест. Таким чином, інтегрований підхід до екологічної та промислової безпеки дозволяє мінімізувати антропогенне навантаження на довкілля при збереженні високої інтенсивності доменної плавки.

3.7 Організаційна структура управління безпекою та роль добровільних ланок

Ефективність системи охорони праці на підприємстві визначається не лише технічними засобами, а й чіткою організаційною структурою. У доменному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» впроваджено децентралізовану модель реагування, де в кожній зміні та бригаді функціонують ланки протипожежної безпеки та надання долікарської

допомоги. Це дозволяє забезпечити принцип «золотої години» при наданні допомоги постраждалим та локалізувати осередки займання на ранніх стадіях. Учасники цих ланок проходять спеціалізовану підготовку щомісяця, де відпрацьовують навички домедичної допомоги під керівництвом інструкторів, що зафіксовано на фотоматеріалах навчань (рис. 3.5–3.6).

Важливим елементом є також проведення протипожежних тренувань, під час яких імітуються сценарії займання вугільного пилю, кабельних галерей, або дій військового впливу (рис.3.7-3.8). Персонал відпрацьовує навички роботи з первинними засобами пожежогасіння, використання стаціонарних систем пожежогасіння, а також співпраці з пожежною частиною які є на території підприємства. Поєднання щомісячного теоретичного навчання з практичними вправами безпосередньо на робочих місцях формує у працівників стійкі навички безпечної поведінки та готовність до швидкого прийняття рішень у стресових ситуаціях. Така багаторівнева система захисту, що включає технічну безпеку, організаційну підготовку та екологічний контроль, є запорукою стабільної роботи доменного виробництва в умовах сучасних викликів.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі проведено комплексний аналіз стану охорони праці та промислової безпеки в доменному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» при впровадженні технології вдування пиловугільного палива (ПВП). За результатами дослідження зроблено наступні висновки:

1. Ідентифікація ризиків: Встановлено, що основними небезпечними факторами доменного виробництва в умовах інтенсифікації дуттєвого режиму є висока концентрація токсичних газів (СО) та екстремальне теплове випромінювання (температура дуття до

1100 °C). Аналіз робочих місць горнових підтвердив необхідність застосування термостійких засобів індивідуального захисту європейського зразка для запобігання термічним опікам та тепловим ударам, оповіщення про підвищений рівень небезпечних газів.

2. Технічна безпека ПВП: Обґрунтовано специфічні заходи безпеки при роботі з вугільним пилом, що має низьку межу вибуховості (12,0–30,0 г/м³). Доведено ефективність системи безперервної інертизації тракту подачі палива азотом, що дозволяє підтримувати вміст кисню в накопичувальних бункерах на рівні нижче 10%, унеможливаючи виникнення вибухонебезпечного середовища.

3. Організаційна готовність: Відзначено високу ефективність впровадженої на підприємстві системи щомісячних практичних тренувань з домедичної та протипожежної допомоги. Створення в кожній робочій бригаді спеціалізованих ланок долікарської допомоги та протипожежного захисту забезпечує мінімальний час реагування на позаштатні ситуації безпосередньо на робочих місцях.

4. Екологічна та енергетична стійкість: Розроблено та деталізовано алгоритми дій персоналу при раптовому припиненні енергопостачання, що дозволяє запобігти аварійному пошкодженню охолоджувальних приладів печі. Використання сучасних систем аспірації з рукавними фільтрами (ефективність 99,9%) підтверджує екологічну безпеку технології ПВП для атмосферного повітря міста Кам'янського.

Впроваджений на ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» інтегрований підхід до безпеки, що поєднує інженерні рішення, системне навчання та організаційну структуру добровільних ланок, створює надійні умови для безпечної експлуатації установки ПВП та мінімізації виробничих ризиків.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній магістерській роботі розв'язано важливе науково-практичне завдання щодо підвищення ефективності доменної плавки в умовах ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» шляхом оптимізації параметрів комбінованого дуття при вдуванні пиловугільного палива (ПВП). Проведене дослідження дозволяє зробити ряд ґрунтовних висновків:

Стратегічне значення проєкту: Аналіз виробничої структури комбінату підтвердив, що статус єдиного у світі виробника катаної осьової заготовки вимагає радикального зниження собівартості чавуну як базового переділу для збереження конкурентоспроможності в умовах обмежених замовлень. Перехід на інтенсивне вдування ПВП визначено як найбільш реальний шлях заміщення дорогого коксу.

Технологічна ефективність: Порівняльний аналіз роботи печей у листопаді 2025 року показав суттєву перевагу ДП № 9. При питомій витраті ПВП на рівні 1..... кг/т було досягнуто зниження витрати скіпового коксу до кг/т, що забезпечило високий фактичний коефіцієнт заміни — кг/кг.

Тепловий та газодинамічний режими: Розрахункова методика А. Н. Рамма дозволила встановити, що підтримка теоретичної температури горіння на позначці 2084 °С стала можливою завдяки компенсаційним заходам: підвищенню температури дуття до 1100 °С та збагаченню його киснем до%. Дослідження підтвердило стабільність сходу шихти при значному рудному навантаженні т/т, хоча подальша інтенсифікація понад кг/т ПВП наразі обмежена міцністю коксу $CSR \approx \dots \%$.

Якість продукції: Доведено, що інтенсивне вдування ПВП не погіршує якість металу: вміст кремнію на рівні% та сірки% повністю відповідає вимогам сталеплавильного переділу марки П1 та П2.

Економічний ефект: Пряме зниження собівартості однієї тонни чавуну склало грн, що при прогнозній річній продуктивності ДП № 9 у млн тонн забезпечує сумарний річний економічний ефект у розмірі млн грн. Оцінка інвестицій підтвердила термін окупності проекту в межах років.

Промислова безпека: Обґрунтовано систему безпеки, що включає азотну інертизацію бункерів ПВП із підтриманням концентрації кисню не більше 10% та впровадження щомісячних практичних тренувань персоналу з домедичної та протипожежної допомоги.

Практичне значення роботи полягає у формуванні доказової бази для подальшого нарощування вдування ПВП до цільового показника 150 кг/т у довгостроковій перспективі.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Товровський І. Г. Доменна плавка : навч. посібник. Дніпро : Пороги, 2019. 420 с.
2. Смірнов О. М., Семенко А. Ю., Скоробагатько Ю. П., Горюк М. С. Основи металургії: виробництво чавуну : підручник. Одеса : Олді+, 2023. 192 с.
3. Большаков В. І., Нестеров О. С. Технологія доменної плавки з використанням пиловугільного палива : монографія. Дніпро : НМетАУ, 2018. 186 с.
4. Кухар В. В., Тимошенко Д. О., Малій Х. В. та ін. Порівняння енергоспоживання при виробництві металу різними технологічними маршрутами // Збірник наукових праць ДДТУ. 2024. № 3. С. 36–45.
5. VA TECH. Pulverized Coal Injection Technology in Blast Furnaces : technical documentation. Linz, Austria, 2015. 112 p.
6. Jellinbach Resources. Pulverized Coal Injection – Status and Prospects : proceedings of the Asian International Coal Conference. Queensland, Australia, 2013. 215 p.
7. Ярошевський С. Л., Кочура В. В. Паливо для доменної плавки : навч. посібник. Донецьк : ДонНТУ, 2012. 264 с.
8. Коваль А. М. Вплив якості коксу на граничні витрати пиловугільного палива // Металургійна та гірничя промисловість. 2022. № 4. С. 28–33.
9. Технологічна інструкція ТІ-235-ДЦ-01-2023 «Ведення доменної плавки в доменному цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Кам'янське, 2023. 85 с.
10. Інструкція з охорони праці № 02.06.22. Професія: горновий доменної печі. Кам'янське : ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», 2024. 24 с.

11. Звітні дані технічного відділу доменного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ» про роботу доменних печей за листопад 2025 р. Внутрішня документація.

12. Інструкція з охорони праці № ІОП-047-2025. Загальні вимоги з охорони праці для працівників підприємства. Кам'янське : ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ», 2025. 32 с.

13. План локалізації та ліквідації аварійних ситуацій (ПЛАС) доменного цеху ПрАТ «КАМЕТ-СТАЛЬ». Кам'янське, 2025. 110 с.