

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»
Гірничо-металургійний факультет
Кафедра металургії та інноваційних технологій

«Допущено до захисту»
Гарант освітньої програми
«Металургія чорних металів»

Христина МАЛІЙ

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
за підсумками виконання освітньо-професійної програми
«Металургія чорних металів»
за спеціальністю 136 Металургія

на тему «Оцінка впливу характеристик твердого палива на показники агломераційного процесу та якість агломерату»

Керівник роботи

Максим ЯГОЛЬНИК

Консультант
від бази практики

Олег ІСЕНКО

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

Здобувач

Ярослав КОНОНЧУК

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

Голова ЕК

Євген БРАГІНЕЦЬ

Запоріжжя, 2026

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»	
Факультет	<u>гірничо-металургійний</u>
Кафедра	<u>металургії та інноваційних технологій</u>
Ступінь вищої освіти	<u>бакалавр</u>
Спеціальність	<u>136 Металургія</u>
ОПП	<u>Металургія чорних металів</u>

ЗАТВЕРДЖУЮ

Гарант освітньої програми

Христина МАЛІЙ

«10» квітня 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Конончуку Ярославу Володимировичу

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

1. Тема роботи Оцінка впливу характеристик твердого палива на показники агломераційного процесу та якість агломерату
керівник роботи Ягольник Максим Вікторович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом Університету від № 41/23.02.2026 від 23.02.2026
2. Термін подання роботи 20.06.2026
3. Вихідні дані до роботи Навчальна, методична література з спеціальних дисциплін, науково-дослідницькі роботи з тематики агломераційного виробництва, науково-технічні літературні джерела, технологічні інструкції, дані ПАТ "Запоріжсталь".
4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань) Анотація. Зміст. Вступ. Розділ 1. Аналітична оцінка впливу характеристик твердого палива на агломераційний процес. Розділ 2. Основна частина. Статистичний аналіз даних роботи агломераційних машин з використанням різних видів твердого палива. Визначення взаємозв'язків впливу характеристик твердого палива на основні технологічні показники процесу агломерації. Розробка пропозицій щодо покращення технології агломерації. Розділ 3. Охорона праці і екологія. Розділ 4. Розрахунки економічної доцільності запропонованих рішень. Висновки. Перелік використаних джерел. Додатки.

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

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

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта
1, 2, 3, 4	Ягольник М.В. доцент кафедри металургії та інноваційних технологій

7. Дата видачі завдання 10.04.2026

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи
1	Аналітична частина	11.05 – 13.06.2026
2	Основна частина	11.05 – 13.06.2026
3	Охорона праці та екологія	06 – 13.06.2026
4	Економічно-організаційна частина	06 – 13.06.2026
5	Оформлення пояснювальної записки	13 – 20.06.2026
6	Захист	за графіком

Здобувач

Ярослав КОНОНЧУК

Керівник роботи

Максим ЯГОЛЬНИК

АНОТАЦІЯ

Конончук Я. В. Оцінка впливу характеристик твердого палива на показники агломераційного процесу та якість агломерату. – Кваліфікаційна праця на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня бакалавра за спеціальністю 136 Металургія, ОПП «Металургія чорних металів» – ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», Запоріжжя, 2026.

Об'єктом дослідження є процес виробництва офлюсованого агломерату в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Предметом дослідження є вплив фізико-хімічних та гранулометричних характеристик твердого палива на хід агломераційного процесу та механічну міцність готового продукту.

У першому розділі проаналізована аналітична оцінка впливу характеристик твердого палива на агломераційний процес. Надана загальна характеристика технологічного циклу агломераційного цеху ПАТ «Запоріжсталь». Проведено аналіз рішень щодо підготовки та використання коксового дріб'язку.

В результаті визначена необхідність оптимізації підготовки палива, сформульована невирішена частина проблеми щодо негативного впливу пилюватої фракції, яку планується досліджувати та вирішувати в рамках кваліфікаційної роботи. У другому розділі проведено аналіз статистичних даних роботи агломашин, визначено тісний кореляційний зв'язок між вмістом фракції менше 0,5 мм та зниженням міцності агломерату, обґрунтовано технологічні пропозиції щодо жорсткого контролю дроблення коксую, наведено математичну модель залежності показників. У третьому розділі обґрунтовано необхідні заходи безпеки, проаналізовано стан охорони праці, виявлено шкідливі виробничі фактори в агломераційному цеху та розроблено шляхи мінімізації їх впливу на персонал.

У четвертому розділі розраховано економічну доцільність запропонованих рішень та доведено ефективність зниження питомих витрат коксую за рахунок стабілізації його гранулометричного складу.

АГЛОМЕРАЦІЯ, ТВЕРДЕ ПАЛИВО, КОКСОВИЙ ДРІБ'ЯЗОК, МІЦНІСТЬ АГЛОМЕРАТУ, ГРАНУЛОМЕТРИЧНИЙ СКЛАД, СОБІВАРТІСТЬ

ЗМІСТ

ВСТУП	5
1. АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОГО ПАЛИВА НА АГЛОМЕРАЦІЙНИЙ ПРОЦЕС	8
1.1 Загальна структура та апаратурне оформлення агломераційного цеху ПАТ «Запоріжсталь»	8
1.2 Теоретичні основи горіння твердого палива в шарі агломераційної шихти	12
1.3 Фізико-хімічні властивості та порівняльна характеристика видів твердого палива	13
1.4 Технологія підготовки палива та його дозування в агломераційну шихту	15
2. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА ТА СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ	19
2.1 Аналіз впливу пилюватої фракції коксиду на міцність агломерату	19
2.2 Математичне моделювання та регресійний аналіз	21
2.3 Технологічні пропозиції	23
2.4 Розробка пропозицій щодо покращення технології агломерації	23
3. ОХОРОНА ПРАЦІ В АГЛОМЕРАЦІЙНОМУ ЦЕХУ	26
3.1 Характеристика умов праці та шкідливих факторів в агломераційному цеху	26
3.2 Заходи безпеки та засоби індивідуального захисту на робочих місцях	27
3.3 Заходи цеху з охорони навколишнього середовища	28
4. ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА	29
4.1 Структура собівартості офлюсованого агломерату	29
4.2 Вплив витрат твердого палива на економіку підприємства	31
ВИСНОВКИ	34
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	36

ВСТУП

Чорна металургія залишається однією з базових галузей промисловості України, що визначає її економічний потенціал. Сучасний етап розвитку металургійного комплексу характеризується жорсткою конкуренцією на світових ринках, стрімким зростанням вартості енергоносіїв та підвищенням вимог до екологічної безпеки виробництва. За цих умов ключовим завданням підприємств є зниження собівартості продукції при одночасному підвищенні її якості.

У технологічному ланцюжку виробництва чавуну домінуючу роль відіграє підготовка залізорудної сировини. Агломерація залишається найпоширенішим та найважливішим методом огрудкування дрібних руд і концентратів [8, с. 15]. Ефективність роботи доменних печей, питома витрата коксу та продуктивність виплавки чавуну безпосередньо залежать від фізико-механічних властивостей і відновлюваності агломерату [9, с. 302]. Агломерацийний процес є надзвичайно енергоємним, а основною статтею витрат на забезпечення теплового балансу спікання є тверде паливо, частка якого у собівартості агломерату сягає 10-15% [8, с. 45].

В якості основного виду твердого палива традиційно використовуюється коксовий дріб'язок — продукт відсіву доменного коксу на коксохімічних підприємствах. Враховуючи дефіцит високоякісного коксику та його високу абсолютну вартість, питання оптимізації використання твердого палива набуває стратегічного значення. Стабільність фізико-хімічних властивостей палива (зольність, вміст твердого вуглецю, вихід летких речовин) та, що особливо важливо, його гранулометричний склад критично впливають на аеродинаміку шару шихти, швидкість горіння та температурно-тепловий режим процесу [6, с. 24].

Синергія між коксохімічним виробництвом, де формується якість коксу, та агломераційними фабриками є запорукою стабільної роботи всього металургійного циклу. Відхилення у фракційному складі палива, зокрема підвищений вміст пилюватої фракції (менше 0,5 мм) або наявність великих класів (більше 3 мм), призводить до нерівномірного горіння, утворення локальних зон переплаву, зниження газопроникності шихти та, як наслідок, різкого падіння механічної міцності готового агломерату.

Для умов ПАТ «Запоріжсталь», яке є одним із найбільших виробників офлюсованого агломерату з проектною продуктивністю 5,9 млн тонн на рік, вирішення проблеми стабілізації міцності агломерату шляхом оптимізації параметрів твердого палива є вкрай актуальним. Впровадження ефективних методів контролю за підготовкою палива дозволить не лише підвищити вихід придатного агломерату, а й істотно знизити питомі витрати дефіцитного енергоресурсу, що обумовлює своєчасність і доцільність даної кваліфікаційної роботи.

Мета роботи полягає у вирішенні актуальної практичної проблеми щодо підвищення якості агломерату та зниження питомих витрат палива шляхом визначення взаємозв'язків між характеристиками твердого палива та основними технологічними показниками процесу агломерації в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Для досягнення поставленої мети було сформульовано та вирішено такі завдання дослідження:

- проаналізувати загальну характеристику, технологічний цикл та апаратне оформлення агломераційного цеху ПАТ «Запоріжсталь»;
- дослідити теоретичні основи процесу агломерації та визначити теплотехнічну і фізико-хімічну роль твердого палива при спіканні шихти;

- здійснити статистичний аналіз виробничих даних щодо роботи агломераційних машин із використанням твердого палива різного гранулометричного складу;
- встановити математичні та кореляційні залежності між вмістом пилюватої фракції у коксовому дріб'язку та механічною міцністю готового агломерату;
- розробити комплекс технологічних пропозицій щодо вдосконалення процесів подрібнення та підготовки палива до спікання;
- оцінити стан охорони праці, рівень екологічної безпеки в агломераційному цеху та обґрунтувати економічну доцільність запропонованих інженерних рішень.

Об'єктом дослідження є процес виробництва офлюсованого агломерату в умовах ПАТ «Запоріжсталь».

Предметом дослідження є вплив фізико-хімічних та гранулометричних характеристик твердого палива (зокрема коксового дріб'язку) на перебіг агломераційного процесу та показники якості готового продукту.

Для вирішення поставлених завдань у роботі використано комплексний підхід, що включає: аналітичний метод (для огляду наукової літератури, технічної та нормативної документації підприємства), методи математичної статистики та обробки великих масивів даних (для аналізу промислових показників роботи агломашин), кореляційно-регресійний

аналіз (для побудови математичної моделі впливу фракції палива на міцність агломерату), а також методи техніко-економічного розрахунку.

1. АНАЛІТИЧНА ОЦІНКА ВПЛИВУ ХАРАКТЕРИСТИК ТВЕРДОГО ПАЛИВА НА АГЛОМЕРАЦІЙНИЙ ПРОЦЕС

1.1 Загальна структура та апаратурне оформлення агломераційного цеху ПАТ «Запоріжсталь»

Агломераційний цех ПАТ «Запоріжсталь» є одним з найбільших структурних підрозділів комбінату, який призначений для безперебійного забезпечення доменного цеху високоякісним офлюсованим агломератом. Проектна продуктивність цеху становить 5,9 млн тонн агломерату на рік. Виробнича структура агломераційного цеху є складною системою взаємопов'язаних технологічних ліній і включає шість основних відділень: Приймальне відділення залізородних матеріалів (рудний двір). Відділення дроблення вапняку. Відділення випалу вапняку (обпалювальна машина КМ-14). Відділення дроблення палива (коксового дріб'язку та антрациту). Шихтове відділення (дозування компонентів). Відділення агломерації та гарячого повернення. Загальну візуалізацію технологічних потоків цеху наведено на рисунку 1.1.

Шихтове та приймальне відділення

Шихтове відділення є початковою ланкою технологічного ланцюга агломераційної фабрики. Його головна функція полягає у прийманні, зберіганні, усередненні та первинній підготовці всіх компонентів сировини: залізної руди, концентратів, флюсів, твердого палива та залізовмісних відходів металургійного циклу. Сировина надходить переважно залізничним транспортом, розвантаження здійснюється за допомогою вагоноперекидачів у приймальні бункери, звідки стрічковими конвеєрами транспортується на склади або в бункери шихтового відділення.

Технологическая схема производства

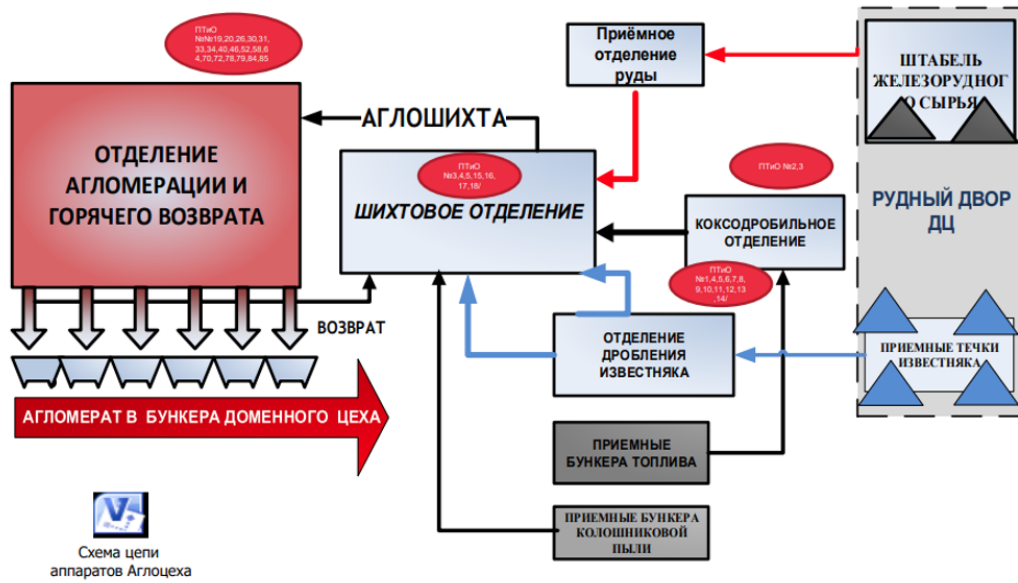


Рисунок 1.1 — Технологічна схема виробництва агломерату

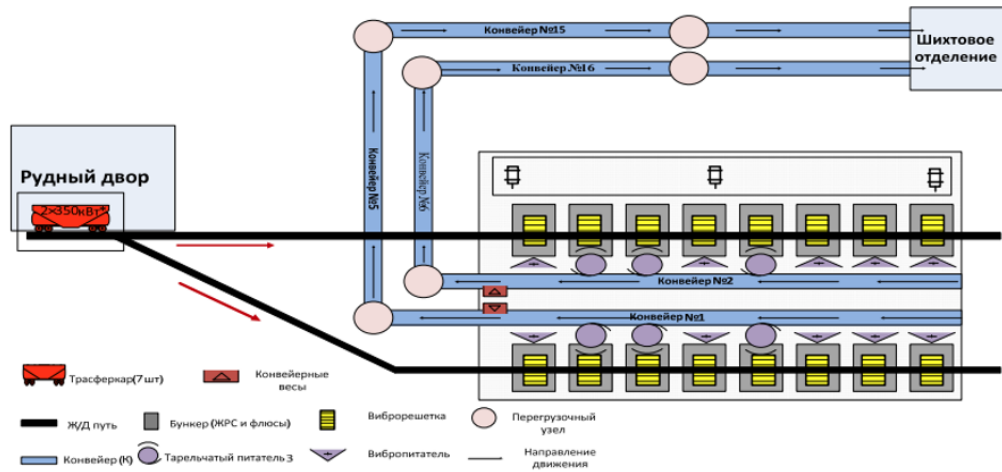


Рисунок 1.2 — Схема ланцюгів апаратів приймального відділення

Відділення підготовки шихти

Сучасні аглофабрики оснащені автоматизованими системами вагового дозування, які забезпечують точну видачу кожного компонента шихти. Після дозування збірна шихта направляється у змішувальні барабани. Процес підготовки складається з двох стадій: Первинне змішування в барабанах-змішувачах для досягнення однорідності хімічного складу. Вторинне змішування та огрудкування в барабанах-огрудковувачах, де шихта доводиться до оптимальної вологості (6-8%), утворюючи гранули. Якісне огрудкування забезпечує високу газопроникність шару.



Рисунок 1.3 — Змішувальний барабан для підготовки агломераційної шихти

Спікальне відділення

Спікальне відділення є центральним вузлом цеху. Процес здійснюється на шести конвеєрних агломашинах: машина № 1 має корисну площу 75 м², а машини № 2–6 — по 62,5 м² кожна. На палети укладається «постіль» (дрібний агломерат для захисту колосників), а зверху — основний

шар шихти висотою 300–500 мм. Під запальним горном верхній шар нагрівається до 1150–1200 °С, після чого вакуумні ексгаустери простягають повітря крізь шар, підтримуючи горіння твердого палива.



Рисунок 1.4 — Загальний вигляд працюючої агломераційної машини

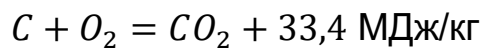
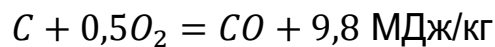
Відділення підготовки готового агломерату

Пиріг агломерату, що сходить з машини, має температуру 700–900 °С. Його піддають первинному дробленню у зубчастій дробарці, після чого направляють на гаряче грохочення для відсіву дрібної фракції (повернення). Основна маса кускового агломерату охолоджується на лінійних охолоджувачах до температури нижче 100 °С, проходить стадію холодного дроблення та сортування на товарний продукт (фракція понад 5–10 мм), який відправляється в доменний цех.

1.2 Теоретичні основи горіння твердого палива в шарі агломераційної шихти

Переважна частина викидів агломераційного виробництва — це відхідні гази, які є продуктами горіння твердого палива. Відповідно, глибоке розуміння стадії спікання є необхідним для оптимізації як технологічних, так і екологічних показників процесу.

Основним паливом агломерації є коксовий дріб'язок та дрібний антрацит (штиб). Температура займання коксиду становить близько 700 °С, тоді як для антрацитового штибу цей показник вищий і складає 750–800 °С [15]. Залежно від крупності, концентрації палива в шихті та швидкості фільтрації газів, горіння протікає у вузькому шарі товщиною 20–30 мм. Горіння вуглецю сильно уповільнюється при зниженні вмісту кисню у фільтрованому газі до 5–6 % і зовсім припиняється при концентрації 3–4 % O_2 і менше [15]. Елементарні уявлення про горіння вуглецю твердого палива свідчать, що в умовах агломерації приблизно 45 % вуглецю згоряє до монооксиду вуглецю (CO), а 55 % — до діоксиду вуглецю (CO_2) за наступними реакціями [15]:



Тепловий ефект реакції неповного горіння вуглецю у 3,4 раза менший, ніж ефект повного горіння [20, с. 84]. Це означає, що зі збільшенням повноти горіння (доведення вуглецю до CO_2) досягається суттєва економія палива та зниження викидів високотоксичного чадного газу. Твердий вуглець після нагрівання інтенсивно окислюється, проходячи чотири послідовні стадії фізико-хімічних перетворень [15]:

Дифузія: доставка кисню до поверхні частинок палива шляхом конвективної та молекулярної дифузії.

Адсорбція: поглинання кисню поверхнею палива під дією молекулярних сил. Хімічна реакція: безпосереднє окислення вуглецю з утворенням первинних оксидів.

Десорбція: видалення продуктів горіння з маси палаючих частинок у загальний газовий потік.

Слід враховувати, що умови горіння частинок палива в шарі шихти кардинально відрізняються від звичайного шарового спалювання. Шматочки палива займають лише 10–15 % об'єму матеріалів і розосереджені в ній. Горіння може протікати у двох режимах [15]: Кінетичний режим (при низьких температурах): швидкість окислення визначається факторами хімічної кінетики, тобто температурою та фізико-хімічними властивостями поверхні частинок палива.

Дифузійний режим (при високих температурах): швидкість горіння лімітується виключно швидкістю підведення газу та вмістом у ньому кисню.

У більшості випадків на агломашинах ПАТ «Запоріжсталь» горіння протікає у змішаному режимі. Саме тому використання надмірно подрібненого палива (фракція < 0,5 мм) є вкрай небажаним: дрібний пил має величезну питому поверхню, миттєво вступає в реакцію (спалахує) у кінетичному режимі і вигоряє ще до того, як основна маса шихти встигне акумулювати виділене тепло.

1.3 Фізико-хімічні властивості та порівняльна характеристика видів твердого палива

В агломераційному виробництві основним видом палива історично і технологічно є коксовий дріб'язок (коксик) [6, с. 42]. Це побічний продукт

коксу виробництва, що утворюється при сортуванні доменного коксу вимоги до якого регламентовані технічними умовами [5, с. 3]. Враховуючи дефіцит коксуючого газу, підприємства практикують його часткову заміну на антрацитовий штиб (АШ) [8, с. 134].

Ефективність процесу спікання залежить від теплотехнічних властивостей палива. У таблиці 1.1 наведено порівняльну характеристику цих матеріалів.

Таблиця 1.1 — Порівняльна характеристика видів палива

Показник	Коксовий дріб'язок (Коксик)	Антрацитовий штиб (АШ)
Вміст вуглецю (C_{fix}), %	82 - 86	78 - 82
Зольність (A^d), %	12 - 15	15 - 20
Вихід летких речовин (V^{daf}), %	1,5 - 2,5	2,5 - 4,5
Вологість робоча (W^r), %	10 - 15	7 - 10
Нижча теплота згоряння (Q), МДж/кг	27,0 - 28,5	25,5 - 27,0

Високий вміст летких речовин є небажаним, оскільки в умовах просмоктування повітря зверху вниз, вони виділяються в нижніх горизонтах шару і видаляються з відхідними газами, не беручи участі в тепловому балансі [9, с. 156].

1.4 Вплив гранулометричного складу на аеродинаміку шару

Найбільш критичним технологічним параметром підготовки палива є його гранулометричний склад: оптимальним є вміст фракції 0,5-3,0 мм [6, с. 55].

Дроблення здійснюється у чотиривалкових дробарках.

- Фракція > 3 мм: Занадто великі шматки палива призводять до утворення локальних зон переплаву. Вони горять повільно.
- Фракція < 0,5 мм (пилувата): Пил згоряє миттєво («спалахує»), виділяючи велику кількість тепла занадто швидко [8, с. 142]. Тепло виноситься з газами. Крім того, тонкий пил обволікає центри гранулоутворення, що різко знижує газопроникність шару і продуктивність агломашин [2, с. 27].

Варто зазначити, що в металургійній науці існують і альтернативні підходи до використання твердого палива. Зокрема, дослідженнями Н. Д. Ванюкової доведено можливість отримання агломерату із підвищеним вмістом залишкового вуглецю (до 0,63–1,59 %) шляхом збільшення крупності палива до фракцій 5–10 мм та введення його в шихту понад оптимальний рівень [14]. Наявність такого залишкового вуглецю згодом інтенсифікує процеси відновлення оксидів заліза безпосередньо під час доменної плавки [14]. Однак, в умовах класичного виробництва офлюсованого агломерату на ПАТ «Запоріжсталь», пріоритетним завданням є не збереження вуглецю в спеку, а його максимально повне згоряння на агломашині. Це необхідно для забезпечення температурно-теплогового режиму та максимальної економії дефіцитного коксиду. З огляду на це, жорстке подрібнення палива до класу 0–3 мм залишається безальтернативним технологічним рішенням для умов підприємства.

1.4 Технологія підготовки палива та його дозування в агломераційну шихту

Підготовка твердого палива до спікання є одним із найвідповідальніших етапів роботи агломераційного цеху, оскільки від точності дозування та якості дроблення безпосередньо залежить температурно-тепловий

режим процесу. Технологічний ланцюжок роботи з паливом включає його приймання, дроблення, транспортування, дозування та змішування з іншими компонентами шихти [4, с. 30].

Коксовий дріб'язок надходить з коксохімічного виробництва у вигляді неоднорідної маси з крупністю шматків переважно від 0 до 25 мм. Враховуючи, що для ефективного спікання необхідна фракція 0–3 мм, паливо підлягає обов'язковому подрібненню.



Рисунок 1.5 — Зовнішній вигляд коксового дріб'язку до подрібнення

Основним агрегатом для підготовки палива в умовах ПАТ «Запоріжсталь» є чотиривалкова дробарка. Процес подрібнення в ній здійснюється у дві стадії послідовно: спочатку між верхньою, а потім між нижньою парою валків, які обертаються назустріч один одному. Руйнування шматків коксиду відбувається за рахунок деформацій роздавлювання та часткового стирання [6, с. 55].

Для забезпечення заданого гранулометричного складу надзвичайно важливим є підтримання правильних зазорів між валками (верхні — 8 мм, нижні — 2 мм). Недотримання цих параметрів або знос робочої поверхні (бандажів) валків призводить до пропуску великих класів (> 3 мм) або, навпаки, до катастрофічного переподрібнення палива з утворенням пилюватої фракції ($< 0,5$ мм).



Рисунок 1.6 — Чотиривалкова дробарка у відділенні підготовки палива

Після дроблення підготовлене паливо системою стрічкових конвеєрів транспортується у бункерне (шихтове) відділення. Видача палива з бункерів на збірний конвеєр здійснюється за допомогою автоматичних вагових дозаторів безперервної дії.



Рисунок 1.7 — Автоматизований ваговий дозатор у шихтовому відділенні

Точність роботи дозаторів є критичною для всього агломераційного переділу. Відхилення у дозуванні твердого палива навіть на 0,1–0,2 % від заданої маси призводить до різких коливань температури в зоні горіння. Нестача палива викликає недоспівання шихти, втрату міцності та утворення великої кількості повернення, тоді як його надлишок призводить до оплавлення поверхні шару, різкого падіння газопроникності та перевитрати дорогого енергоресурсу [8, с. 182].

Остаточний розподіл палива в масі матеріалу відбувається у змішувальних барабанах. Оскільки частинки коксикі є гідрофобними (погано змочуються водою), вони практично не беруть участі в утворенні центрів гранул, а переважно налипають на поверхню вже сформованих рудних грудочок (окотишів). Таке зовнішнє розташування палива на гранулах є сприятливим, оскільки забезпечує максимальний контакт вуглецю з киснем повітря під час проходження зони горіння на агломашині [9, с. 210].

2. ДОСЛІДНИЦЬКА ЧАСТИНА ТА СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ

2.1 Аналіз впливу пилюватої фракції коксикку на міцність агломерату

Для об'єктивної оцінки впливу гранулометричного складу палива на показники готового продукту був проведений збір та аналіз промислових даних. Згідно зі СТП 226.01.01-19, агломерат ПАТ «Запоріжсталь» повинен мати механічну міцність на удар (+5 мм) не менше 68,0% (фактично 76,6% - 79,1%) [1, с. 4].

Для забезпечення достовірності результатів дослідження, збір статистичних даних проводився на діючих агломераційних машинах ПАТ «Запоріжсталь» протягом квартального періоду. Відбір проб твердого палива для визначення його гранулометричного складу здійснювався з конвеєрних стрічок шихтового відділення після стадії дроблення. Ситовий аналіз проводився з використанням стандартного набору лабораторних сит з розміром чарунок від 0,5 мм до 10 мм.

Оцінка механічної міцності готового офлюсованого агломерату виконувалася згідно з вимогами ДСТУ за класичною методикою випробувань у барабані Рубіна. Проба агломерату масою 50 кг піддавалася 100 обертам у сталевому барабані зі швидкістю 25 об/хв. Показником міцності на удар вважався вихід фракції розміром понад 5 мм (клас +5 мм) після випробування. Контроль газопроникності спекуваного шару здійснювався за показаннями штатних вакуумметрів у колекторах ексгаустерів. Отримані усереднені промислові дані зведено у таблицю 2.1.

Дані дослідження зведено у таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 — Вплив вмісту фракції <0,5 мм у паливі на показники процесу агломерації

Вміст фракції <0,5 мм у коксифікаторі, %	Питома витрата палива, кг/т	Міцність агломерату (+5 мм), %	Газопроникність шару, ум. од.
4,0	50,5	79,1	45,2
6,0	52,0	78,5	43,8
8,0	54,5	77,8	41,5
10,0	57,0	76,6	38,0
12,0	61,5	74,2	34,5
15,0	65,0	71,5	30,2

На основі таблиці побудовано графік (рисунок 2.1), який наочно демонструє динаміку погіршення показників.

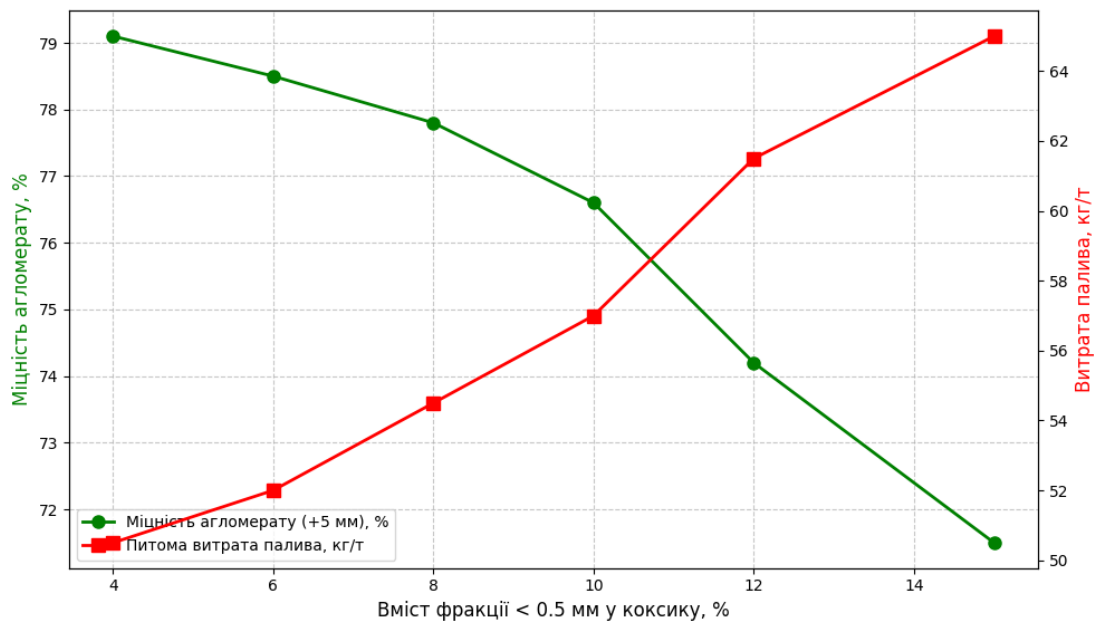


Рисунок 2.1 — Вплив пилюватої фракції на показники агломерації

Аналіз підтверджує: при збільшенні вмісту пилюватої фракції газопроникність шару катастрофічно падає (з 45,2 до 30,2 ум. од.), що змушує технологічний персонал збільшувати питому витрату палива для компенсації теплових втрат.

2.2 Математичне моделювання та регресійний аналіз

Для прогнозування поведінки агломераційного процесу побудовано лінійну регресійну модель. Залежною змінною (відгуком) Y виступає механічна міцність агломерату, а незалежною змінною (фактором) X — вміст фракції $<0,5$ мм (%). Отримано наступне рівняння регресії:

$$Y = -0,69X + 82,73$$

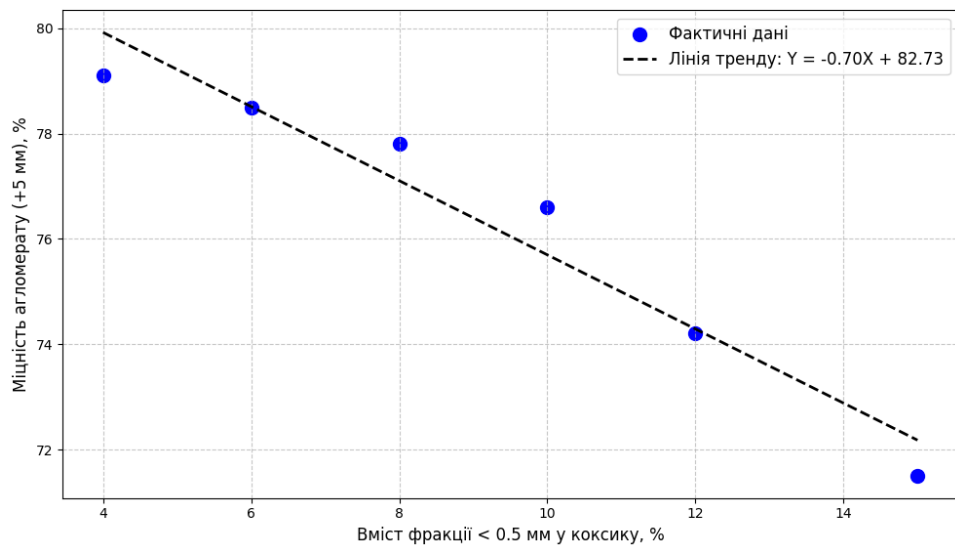


Рисунок 2.2 — Лінійна регресійна модель залежності міцності агломерату від запиленості палива

Коефіцієнт регресії показує, що зростання частки пилюватої фракції на кожен 1% призводить до гарантованого падіння міцності агломерату на 0,69%.

Крім втрати механічної міцності, зростання частки пилюватої фракції безпосередньо впливає на економіку процесу. Для кількісної оцінки цього впливу було побудовано другу кореляційно-регресійну модель. Залежною змінною (Y_2) у даному випадку виступає питома витрата твердого палива (кг/т), а незалежною (X) — вміст фракції <0,5 мм (%). За результатами обробки масиву даних методом найменших квадратів, отримано наступне рівняння лінійної регресії:

$$Y_2 = 1,38X + 44,11$$

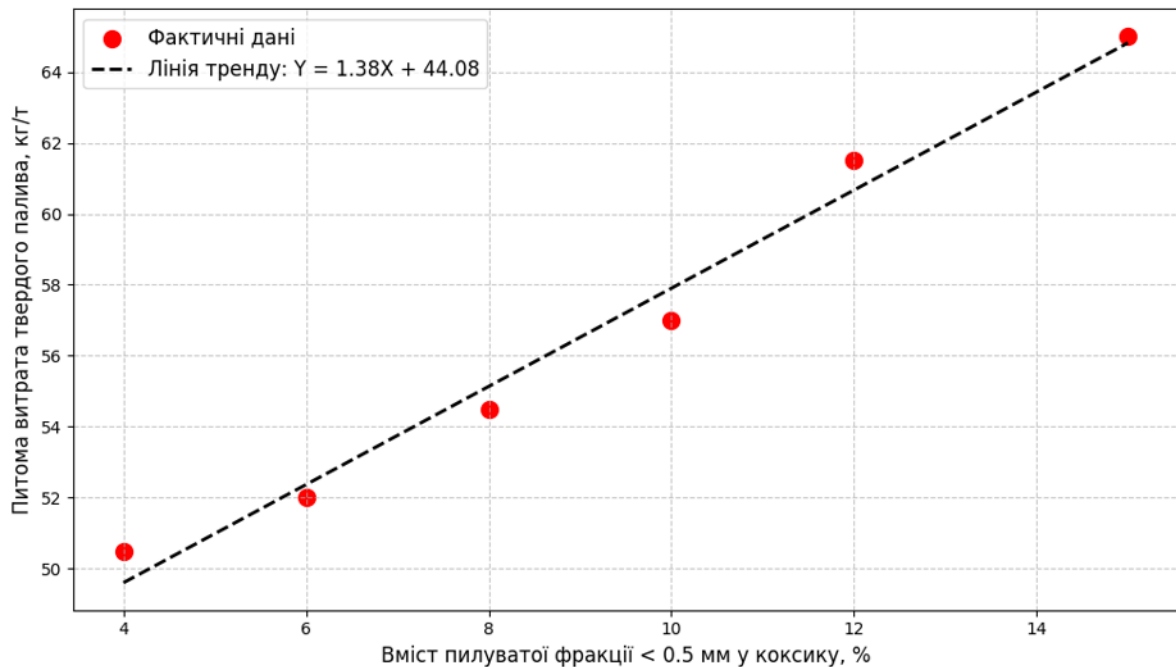


Рисунок 2.3 — Лінійна регресійна модель залежності питомої витрати палива від вмісту пилюватої фракції

Коефіцієнт детермінації для цієї моделі становить $R^2 = 0,98$, що свідчить про дуже тісний і статистично значущий зв'язок. Кутовий коефіцієнт регресії ($b = 1,38$) має надзвичайно важливе технологічне значення: він математично доводить, що збільшення вмісту пилюватої фракції в паливі лише на 1 абсолютний відсоток неминуче призводить до перевитрати твердого палива на 1,38 кг на кожну тонну виробленого агломерату. Саме ця математична закономірність є фундаментом для розробки подальших технологічних пропозицій щодо жорсткого контролю режимів дроблення.

2.3 Технологічні пропозиції

Оптимальним рішенням для підприємства є жорсткий контроль роботи чотиривалкових дробарок [6, с. 88]. Вихідна фракція 0-3 мм у подрібненому паливі має становити не менше 90% [5, с. 6]. При відхиленні від норми необхідно оперативно виконувати налаштування зазорів валків (верхні — 8 мм, нижні — 2 мм) або переходити на резервну лінію дроблення.

2.4 Розробка пропозицій щодо покращення технології агломерації

Аналіз промислових даних переконливо доводить, що наявність пилюватої фракції (менше 0,5 мм) у твердому паливі є головним дестабілізуючим фактором агломераційного процесу. Традиційна схема підготовки палива, за якої весь об'єм коксового дріб'язку направляється безпосередньо у чотиривалкові дробарки, неминуче призводить до переподрібнення тієї частини матеріалу, яка вже має кондиційний розмір (0–3 мм). Для вирішення цієї проблеми та підвищення міцності готового агломерату

пропонується впровадити комплекс технологічних рішень у відділенні підготовки палива:

1. Впровадження схеми дроблення з попереднім відсівом дріб'язку.

Перед подачею коксового дріб'язку в чотиривалкову дробарку доцільно встановити вібраційний грохот (наприклад, типу ГЛ або струнний грохот, стійкий до забивання вологим матеріалом) з розміром чарунки сита 3 мм. Фракція 0–3 мм просипатиметься під сито і направлятиметься одразу на шихтування, оминаючи дробарку. У дробарку надходитиме виключно надрешітний продукт (клас >3 мм). Це рішення дозволить: знизити вихід пилюватої фракції ($<0,5$ мм) у готовому паливі щонайменше на 4–6 абсолютних відсотків; розвантажити чотиривалкові дробарки на 30–40%, що зменшить знос їхніх робочих органів та споживання електроенергії; підвищити загальну продуктивність лінії вуглепідготовки.

2. Жорсткий контроль профілю робочих валків та їх своєчасне наплавлення.

Чотиривалкові дробарки забезпечують необхідний гранулометричний склад палива лише за умови суворого дотримання зазорів (верхні валки — 8 мм, нижні — 2 мм). Однак коксик є надзвичайно абразивним матеріалом. Знос гладких валків призводить до збільшення зазору, пропуску великих класів палива, що згодом змушує операторів штучно "затискати" валки, різко збільшуючи вихід пилю. Пропонується впровадити графік планово-попереджувальних ремонтів із використанням зносостійкого наплавлення бандажів валків твердими сплавами (наприклад, сормайтом) без їх демонтажу, що дозволить підтримувати стабільний зазор.

3. Роздільна підготовка коксового дріб'язку та антрациту.

Промисловий досвід свідчить, що при подачі в чотиривалкову дробарку суміші палив різної природи, вихід некондиційних фракцій різко

зростає. Це пояснюється різними фізико-механічними властивостями матеріалів. Для оцінки їхньої здатності до руйнування використовується індекс розмелюваності (наприклад, індекс Гро / Hardgrove).

Антрацитовий штиб (АШ) має щільну структуру і є значно твердішим за коксовий дріб'язок, який має пористу будову. Спільне дроблення цих видів палива є технологічною помилкою: коли зазори валків налаштовуються (затискаються) для ефективного руйнування твердого антрациту, більш крихкий коксик неминуче піддається надлишковим деформаціям розчавлювання. Як наслідок, значна частка коксику перетворюється на некондиційний пил (<0,5 мм). І навпаки, якщо розширити зазори під коксик, у шихту почнуть проскакувати неприпустимо великі шматки антрациту (>5 мм), які не встигнуть згоріти на агломашині. Саме тому безальтернативним технологічним рішенням є роздільна підготовка: здійснення дроблення антрациту та коксику на виділених лініях зі своїми індивідуальними налаштуваннями зазорів, а їх змішування — вже на стадії дозування в шихтовому відділенні.

4. Оптимізація вологості палива при дробленні.

Сухий коксик (вологість менше 8-10%) при дробленні генерує величезну кількість пилу, який не вловлюється аспірацією і втрачається. Переволожений коксик (понад 15%) налипає на валки, знижуючи ефективність захоплення матеріалу. Рекомендується встановити автоматизовану систему зрошення на конвеєрах перед дробарками для стабілізації вологості палива строго в межах 11–13%.

3. ОХОРОНА ПРАЦІ В АГЛОМЕРАЦІЙНОМУ ЦЕХУ

3.1 Характеристика умов праці та шкідливих факторів в агломераційному цеху

Агломераційне виробництво характеризується важкими умовами праці та наявністю комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів [7, с. 45]. Хоча з точки зору класифікації хімічних речовин коксовий дріб'язок належить до мало небезпечних речовин (4-й клас безпеки), процеси його підготовки та спалювання становлять значну загрозу для персоналу [10]. Зокрема, коксовий пил є вибухонебезпечним та шкідливим при вдиханні (гранично допустима концентрація в повітрі робочої зони становить 6 мг/м³).

До основних шкідливих виробничих факторів в умовах ПАТ «Запоріжсталь» належать:

- Запиленість повітря робочої зони. Пил інтенсивно утворюється на всіх стадіях перевантаження сировини, її подрібнення (особливо в дробарках коксиду та вапняку), а також при грохоченні гарячого і холодного агломерату. Пил залізородних концентратів та коксиду містить діоксид кремнію (SiO_2), тривалий вплив якого може викликати важкі професійні захворювання дихальних шляхів — силікоз та пневмокніоз [7, с. 58].
- Загазованість. У процесі інтенсивного горіння твердого палива на агломераційній машині виділяється моноксид вуглецю (CO) та діоксид сірки (SO_2). Через можливі нещільності газоповітряного тракту агломашини ці токсичні гази можуть потрапляти у приміщення цеху, створюючи ризик отруєння персоналу [3, с. 14].
- Теплове (інфрачервоне) випромінювання та високі температури. Головними джерелами теплового навантаження є горн запалювання,

відкрита поверхня палаючої шихти на палетах агломашини, а також гарячий агломерат, температура якого під час первинного дроблення перевищує 800 °С.

- Підвищений рівень шуму та вібрації. Даний фактор генерується роботою потужного технологічного обладнання: ексгаустерів, валкових дробарок палива, віброгрохотів та вагоноперекидачів на рудному дворі.

3.2 Заходи безпеки та засоби індивідуального захисту на робочих місцях

Для забезпечення належного рівня безпеки праці та мінімізації впливу зазначених шкідливих факторів в агломераційному цеху реалізується багаторівневий комплекс заходів:

1. Технічні та інженерні заходи: Для боротьби з пилом передбачено укриття місць пересипання матеріалів спеціальними герметичними кожухами, які оснащені потужними аспіраційними установками (циклонами, електрофільтрами, рукавними фільтрами) [7, с. 112]. Максимальна механізація та автоматизація процесів дроблення і дозування палива дозволила вивести управління ними на дистанційні пульти в операторські кімнати, що обладнані системами кондиціонування повітря.

2. Організаційні заходи: Проводиться регулярне прибирання осілого пилу за допомогою вакуумних систем або гідрозмиву. Забезпечується постійний контроль за станом укриттів і систем вентиляції. Персонал регулярно проходить навчання та інструктажі з охорони праці згідно з вимогами НПАОП 0.00–4.12–05 [11, с. 8].

3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): Кожен працівник спікального відділення забезпечується костюмами з вогнестійким просоченням, а працівники шихтового відділення — пилозахисним спецодягом [10].

Обов'язковим є носіння спецвзуття, захисних касок та окулярів. В умовах підвищеної запиленості застосовуються засоби захисту органів дихання — респіратори типу «Пелюсток» або напівмаски з фільтрами. Для захисту від шуму працівники використовують протишумові вкладиші (беруші) або навушники.

3.3 Заходи цеху з охорони навколишнього середовища

Оптимізація використання твердого палива має не лише технологічний, а й прямий екологічний ефект. Зниження питомої витрати коксового дріб'язку на 3-5% пропорційно зменшує обсяги викидів парникових газів (CO_2) та токсичних сполук сірки (SO_2) в атмосферу. Ефективна робота аспіраційних систем (електрофільтрів) на ділянках дроблення палива та грохочення агломерату запобігає потраплянню дисперсного пилу в навколишнє середовище, що відповідає сучасним екологічним стандартам металургійного виробництва.

4. ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ АГЛОМЕРАЦІЙНОГО ВИРОБНИЦТВА

4.1 Структура собівартості офлюсованого агломерату

Економічна ефективність роботи доменних цехів ПАТ «Запоріжсталь» безпосередньо залежить від собівартості виробництва агломерату [9, с. 410] [19, с. 112]. Основна частка витрат (калькуляційних статей) в агломераційному виробництві припадає на залізорудну сировину (шихтові матеріали) та енергоресурси [8, с. 220].

Аналіз структури собівартості 1 тонни придатного офлюсованого агломерату свідчить про наступний розподіл витрат:

- Залізорудна сировина (концентрат, руда, залізовмісні відходи) — 70-75%;
- Тверде паливо (коксик, антрацитовий штиб) — 10-15%;
- Флюси (вапняк, доломіт) — 5-8%;
- Електроенергія (приводи ексгаустерів, дробарок, конвеєрів) — 3-4%;
- Природний газ (на запалювання шихти) — 1,5-2,5%;
- Заробітна плата, амортизація обладнання та накладні витрати — 3-5%.

Для розуміння фінансового впливу технологічних рішень наведемо калькуляцію виробничої собівартості 1 тонни офлюсованого агломерату (таблиця 4.1). У розрахунку використані середньогалузеві індикативні ціни на сировину для підприємств України станом на 2025–2026 роки.

Таблиця 4.1 — Розрахунок калькуляції собівартості 1 тонни агломерату

Стаття витрат	Питома витрата	Ціна за т, грн	Ціна за одиницю (без ПДВ), грн	Частка у собівартості, %
Сировина і матеріали, у т.ч.:			2 560,00	70,8
- Залізорудний концентрат	720 кг/т	3 100,00	2 232,00	
- Агломераційна руда	120 кг/т	2 400,00	288,00	
- Колошниковий пил, окалина	80 кг/т	500,00	40,00	
Флюси (Вапняк)	150 кг/т	650,00	97,50	2,7
Тверде паливо (Коксик)	60 кг/т	7 800,00	468,00	12,9
Енергоресурси, у т.ч.:			322,50	8,9
- Природний газ	15 м ³ /т	15 500,00	232,50	
- Електроенергія	30 кВт·год/т	3,00	90,00	
Зарплата, амортизація та накладні			170,00	4,7
Всього виробнича собівартість:			3 618,00	100,0

Структура виробничої собівартості агломерату



Рисунок 4.1 — Структура собівартості

4.2 Вплив витрат твердого палива на економіку підприємства

Незважаючи на те, що тверде паливо складає близько 10-15% від загальної собівартості продукції, його абсолютна вартість є дуже високою через енергоємність процесів видобутку вугілля та його коксування [9, с. 415]. Питомі витрати твердого палива на спікання 1 тонни агломерату в умовах цеху становлять в середньому 50-65 кг/т [6, с. 94]. Зниження цієї статті витрат є одним із найважливіших завдань для технологів.

Економіка паливно-енергетичного комплексу аглофабрики оптимізується наступними шляхами:

1. Заміна дефіцитного палива. Використання антрацитового штибу замість дорогого коксиду дозволяє знизити вартість паливної складової, проте антрацит має нижчу реакційну здатність і потребує більш тонкого подрібнення.

2. Оптимізація гранулометричного складу. Зменшення переподрібнення палива (мінімізація пилюватої фракції <0,5 мм) та виключення великих класів (>3 мм) дозволяє знизити загальні витрати палива на 3-5% за рахунок більш ефективного використання його теплової енергії безпосередньо у шарі шихти

Крім того, для комплексного зниження собівартості в аглоцеху ПАТ «Запоріжсталь» впроваджено низку модернізацій. Переведення агломашин на «важкий» колосник (зі збільшенням його ваги з 3,85 кг до 5,5 кг) дозволило стабілізувати вміст дріб'язку та підвищити питому продуктивність установок до 1,32-1,334 т/м²·год. Додатково, встановлення сучасних вимірювальних діафрагм забезпечило значну економію змішаного газу, що використовується на запалювання шихти.

4.3 Розрахунок економічного ефекту від впровадження запропонованих технологічних рішень

Запропонований у технологічній частині роботи жорсткий контроль роботи чотиривалкових дробарок дозволяє усунути негативний вплив пилюватої фракції, стабілізувати газопроникність шару і, як наслідок, знизити питому витрату коксового дріб'язку в середньому на 1,5 кг на кожну тонну виробленого агломерату. Розрахуємо річну економію твердого палива (ΔE) для проєктної потужності агломераційного цеху за формулою:

$$\Delta E = V_{agl} \times \Delta q_{fuel}$$

де V_{agl} — річний обсяг виробництва агломерату (проектна потужність становить 5 900 000 тонн);

Δq_{fuel} — прогнозоване зниження питомої витрати палива (1,5 кг/т або 0,0015 т/т).

$$\Delta E = 5900000 \times 0,0015 = 8850 \text{ тонн/рік}$$

Висновок до розділу: Впровадження заходів з оптимізації гранулометричного складу твердого палива дозволяє підприємству щорічно заощаджувати 8 850 тонн дороговартісного коксового дріб'язку при повному завантаженні потужностей. Враховуючи ринкову вартість коксика, це рішення забезпечує колосальний прямий економічний ефект, знижуючи собівартість агломерату та кінцевого чавуну на наступному металургійному переділі.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі вирішено актуальне науково-практичне завдання щодо підвищення якості офлюсованого агломерату та зниження питомих витрат енергоресурсів шляхом оптимізації підготовки твердого палива в умовах агломераційного цеху ПАТ «Запоріжсталь».

За результатами виконаних досліджень та розрахунків зроблено наступні висновки:

На основі аналізу технологічного циклу агломераційного цеху ПАТ «Запоріжсталь» встановлено, що тверде паливо (коковий дріб'язок) відіграє ключову роль у формуванні температурно-теплогового режиму спікання. Визначено, що стабільність фізико-хімічних властивостей палива (вміст вуглецю 82-86%, зольність 12-15%, вихід летких речовин до 2,5%) є необхідною, але недостатньою умовою для забезпечення високої продуктивності агломашин. Вирішальний вплив на аеродинаміку шару та механічну міцність агломерату здійснює гранулометричний склад палива.

За результатами статистичного аналізу промислових даних доведено критичний негативний вплив пилюватої фракції (менше 0,5 мм) на процес спікання. Пил згоряє занадто швидко, виділяючи тепло, яке виноситься з відхідними газами, і одночасно погіршує газопроникність шихти через обволікання центрів огрудкування. Це призводить до теплового дисбалансу та неповного спікання розплаву.

Побудовано лінійну кореляційно-регресійну модель залежності між вмістом пилюватої фракції в паливі та механічною міцністю агломерату. Отримане математичне рівняння ($Y = -0,69X + 82,73$) підтверджує, що збільшення частки пилюватої фракції коксикку на 1% призводить до гарантованого зниження міцності готового агломерату на 0,69 абсолютних відсотки.

Для стабілізації технологічного процесу розроблено рекомендації щодо жорсткого контролю роботи відділення підготовки палива. Обґрунтовано необхідність суворого дотримання зазорів чотиривалкових дробарок (верхні — 8 мм, нижні — 2 мм) для забезпечення виходу оптимальної фракції 0,5–3,0 мм на рівні не менше 90%. Також наголошено на недопустимості неузгодженого змішування коксикіу з антрацитовим штибом через різну реакційну здатність цих матеріалів.

Проаналізовано стан охорони праці в агломераційному цеху. Встановлено, що ключовими факторами ризику при роботі з твердим паливом є виділення пилу (що містить діоксид кремнію), загазованість (монооксид вуглецю та діоксид сірки), а також теплові та шумові навантаження. Запропоновано комплекс технічних та організаційних заходів (аспірація укриттів, використання ЗІЗ, дистанційне керування), що мінімізують ризики професійних захворювань.

Доведено економічну та екологічну доцільність впровадження запропонованих рішень. Розрахунки показують, що оптимізація фракційного складу палива дозволяє уникнути його перевитрат та знизити питому витрату в середньому на 1,5 кг/т. Для проєктної потужності цеху (5,9 млн тонн агломерату на рік) це забезпечує економію 8 850 тонн дефіцитного та дорогоартісного коксового дріб'язку щорічно. Крім прямого зниження собівартості, це рішення пропорційно зменшує екологічні платежі підприємства за викиди парникових газів в атмосферу.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. СТП 226.01.01–19. Агломерат офлюсований. Технічні вимоги та правила приймання. Запоріжжя : ПАТ «Запоріжсталь», 2019. 14 с.
2. ТІ 226-ОА-02-2025. Виробництво офлюсованого агломерату. Запоріжжя : ПАТ «Запоріжсталь», 2025. 45 с.
3. ТІ 226-ОА-03-2022. Виробництво вапна на обпалювальній машині КМ-14. Запоріжжя : ПАТ «Запоріжсталь», 2022. 28 с.
4. ТІ 226-Д-ОА-01-2025. Приймання, складування та усереднення матеріалів на рудному дворі. Запоріжжя : ПАТ «Запоріжсталь», 2025. 32 с.
5. ТУ У 23.1–00190443–011:2011. Дрібняк коксовий. Технічні умови. [Чинний від 2011-06-01]. Київ, 2011. 18 с.
6. Шляховий путівник з якості агломераційного цеху ПАТ «Запоріжсталь». Ч. 1-4. Запоріжжя : ПАТ «Запоріжсталь», 2024–2025. 112 с.
7. Охорона праці в металургійній промисловості : навч. посіб. / за ред. О. В. Смирнова. Київ : Основа, 2012. 320 с.
8. Коротич В. І., Фролов Ю. А., Безденежних В. А. Агломерація рудних матеріалів : наук. вид. Єкатеринбург : УДТУ-УПІ, 2003. 400 с.
9. Товаровський І. Г. Доменна плавка. 2-ге вид. Дніпро : Пороги, 2009. 768 с.
10. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 р. № 2694-ХІІ.
Дата оновлення: 28.01.2024. URL:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2694-12>
11. НПАОП 0.00–4.12–05. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці. Затверджено наказом Держнаглядохоронпраці України від 26.01.2005 р. № 15. Київ, 2005. 24 с.

12. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання. [Чинний від 2017-07-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 31 с.
13. ДСТУ 8302:2015. Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні положення та правила складання. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2016. 16 с.
14. Ванюкова Н. Д. Исследование влияния качества агломерационного топлива на содержание остаточного углерода в агломерате. Вісник Приазовського державного технічного університету. 2001. Вип. 11. С. 1–4.
15. Основи металургійного виробництва (Агломерація руд): конспект лекцій / уклад. анонім. Донецьк: ДТПА, 2019. 142 с.
16. Zhou H., Zhao C., Zhao J., Cheng Z. Effect of solid fuel type on the sintering process of iron ore. *Ironmaking & Steelmaking*. 2015. Vol. 42, № 8. P. 606–611.
17. Loo C. E., Leung W. Factors influencing the bonding phase structure of iron ore sinters. *ISIJ International*. 2003. Vol. 43, № 9. P. 1393–1402.
18. Geerdes M., Toxopeus H., van der Vliet C. *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction*. 3rd ed. Amsterdam : IOS Press, 2015. 164 p.
19. Бойко В. В., Круш П. В. Економіка підприємства : навч. посіб. Київ : Каравела, 2018. 416 с.
20. Степаненко В. В., Коваленко О. А. Теплотехніка та теплоенергетика металургійного виробництва : навч. посіб. Дніпро : НМетАУ, 2018. 256 с.