

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КРИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ГІРНИЧО-МЕТАЛУРГІЙНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА МЕТАЛУРГІЇ ЧОРНИХ МЕТАЛІВ І ЛИВАРНОГО
ВИРОБНИЦТВА

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до випускної магістерської роботи
зі спеціальності 136 – Металургія
за освітньо-професійною програмою – Металургія чорних металів

Тема роботи: «Аналіз можливостей підвищення ефективності доменного виробництва за рахунок покращення якості вихідних матеріалів»

Виконав:

магістрант групи МЧМ-24м _____ Микита МІШИН

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Сергій САВЕЛЬЄВ

Нормоконтролер _____ Сергій САВЕЛЬЄВ

Завідувач кафедри _____ Сергій САВЕЛЬЄВ

Кривий Ріг

2025 р.

РЕФЕРАТ

Дипломна робота на тему «Аналіз можливостей підвищення ефективності доменного виробництва за рахунок покращення якості вихідних матеріалів»: містить 99 сторінки основного тексту, ____ рис., ____ табл., ____ літературних посилань.

В роботі запропоновано та досліджено шляхи підвищення ефективності доменного виробництва в умовах використання пиловугільного палива та змінної якості сировини. Розглянуто технологію використання перспективних видів залізорудної сировини (офлюсованих локальних спеків) та вдосконалено методи управління розподілом шихтових матеріалів на колошнику для формування раціональної газодинаміки печі.

В роботі застосовано методи математичного моделювання впливу фізико-механічних властивостей коксу (показників холодної та гарячої міцності) на його питому витрату, а також розрахункові методи визначення енергетичних характеристик дуття для оптимізації роботи нижньої зони печі.

Результати досліджень свідчать, що на підставі встановлених закономірностей впливу повної механічної енергії горнового газу на глибину проникнення дуття та розподіл температур, розроблено алгоритм динамічного управління радіусом «осьової віддушини». Це дозволяє компенсувати коливання якості шихти, попередити розвиток канального ходу та захаращення горна. Доведено, що перехід на використання одного виду залізорудної сировини (локальних спеків) та оптимізація дуттьових параметрів забезпечують суттєве зниження витрат палива.

Створені технології та алгоритми дозволяють підвищити продуктивність доменних печей великого об'єму, стабілізувати їх тепловий стан та зменшити собівартість чавуну шляхом ефективного використання енергетичного потенціалу газів та заміщення дорогого коксу альтернативними видами палива.

ДОМЕННА ПІЧ, ЯКІСТЬ ШИХТИ, КОКС, ПИЛОВУГІЛЬНЕ ПАЛИВО, ГАЗОДИНАМІКА, ЛОКАЛЬНІ СПЕКИ, ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ, ОСЬОВА ВІДДУШИНА.

ЗМІСТ

ВСТУП

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1. Аналіз світових тенденцій інтенсифікації доменної плавки та зміни вимог до якості шихти.

1.2. Порівняльний аналіз металургійних властивостей традиційних та перспективних видів залізорудної сировини.

1.3. Оцінка впливу фізико-хімічних властивостей та реакційної здатності коксу на тепловий стан печі.

1.4. Вплив стабільності складу та властивостей шихтових матеріалів на хід доменного процесу.

1.5. Узагальнення факторів впливу якості шихти на показники печі.

РОЗДІЛ 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЯКОСТІ СИРОВИНИ НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ НА ПРИКЛАДІ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»

2.1. Аналіз ефективності використання різних видів залізорудної сировини та вплив вмісту заліза на продуктивність печі.

2.2. Математичне моделювання впливу якісних характеристик коксу на енергетичні показники плавки.

2.3. Дослідження впливу стабільності якості коксу та ефективності заміщення його альтернативними видами палива.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА

3.1. Оптимізація газодинамічного режиму роботи печі засобами управління «знизу» (параметри дуття та діаметр фурм).

3.2. Вдосконалення режимів завантаження шихти та керування газовим потоком «зверху».

3.3. Розробка системи динамічного управління газодинамічним режимом печі на основі енергетичних критеріїв.

3.4. Результати розробки технологічних рішень щодо підвищення ефективності доменного виробництва.

ВСТУП

Актуальність теми. Чорна металургія, будучи основою промислового комплексу України, історично є ключовою галуззю для економіки країни. Доменне виробництво, як перший і визначальний переділ у технологічному ланцюзі "чавун-сталь", значною мірою формує техніко-економічні показники всієї галузі. Протягом десятиліть основний вектор розвитку доменної плавки був спрямований на підвищення її інтенсивності та зниження питомої витрати палива, що дозволило досягти видатних показників продуктивності печей. Однак, в умовах глобального посилення екологічних стандартів, вичерпання багатих руд та зростання вартості сировинних і енергетичних ресурсів, на перший план виходять нові виклики. Ефективність сучасного металургійного підприємства все більше визначається не лише обсягом виплавленого металу, а й комплексністю використання сировини та мінімізацією техногенного навантаження на довкілля.

У цьому контексті проблема утворення побічних продуктів доменної плавки – шлаків, колошникового пилу та шламів – набуває особливої гостроти. Ці продукти, які часто розглядаються як неминучі відходи, по суті є значними матеріальними потоками, що містять цінні компоненти. Так, колошниковий пил та шлам газоочисток є продуктами механічного та хімічного руйнування шихтових матеріалів і містять значну кількість заліза та вуглецю, втрата яких напряму знижує економічну ефективність виробництва. Доменний шлак, вихід якого сягає 300-400 кг на тонну чавуну при роботі на бідній сировині, вимагає значних площ для відвалів та витрат на його переробку.

Особливої актуальності ця проблема набуває для підприємств Криворізького басейну, які працюють переважно на місцевій залізородній сировині, що характеризується високим вмістом кремнезему. Це об'єктивно призводить до підвищеного виходу шлаку. Водночас, інтенсифікація плавки, підвищення тиску газу під колошником та використання комбінованого дуття посилюють вимоги до якості шихтових матеріалів. Будь-яке відхилення від оптимальних фізико-хімічних та гранулометричних властивостей агломерату, окатишів та коксу призводить до дестабілізації газодинамічного режиму,

збільшення механічного руйнування шихти у стовпі печі та, як наслідок, до різкого зростання виносу пилу та утворення шламів.

Таким чином, дослідження закономірностей утворення побічних продуктів залежно від якості шихти та розробка науково обґрунтованих заходів щодо їх мінімізації є актуальним науково-практичним завданням. Його вирішення дозволить не тільки підвищити техніко-економічні показники доменної плавки за рахунок економії сировини та енергоресурсів, а й суттєво зменшити екологічне навантаження, що є стратегічним напрямком сталого розвитку сучасної металургії.

Мета роботи – встановлення закономірностей впливу фізико-хімічних та гранулометричних характеристик залізорудної частини шихти на кількість та властивості побічних продуктів доменної плавки (шлаку, пилу, шламу) для розробки практичних рекомендацій щодо їх зменшення.

Для досягнення поставленої мети було сформульовано наступні **завдання дослідження**:

1. Проаналізувати сучасні наукові уявлення про фізико-хімічні механізми утворення шлаку, колошникового пилу та шламу в доменній печі на різних етапах руху шихтових матеріалів.
2. Класифікувати та провести аналіз існуючих промислових технологій утилізації та переробки твердих і пилоподібних побічних продуктів доменного цеху.
3. Провести аналітичне дослідження матеріальних балансів доменної плавки на основі узагальнених репрезентативних даних діючого виробництва для визначення кількісних показників виходу побічних продуктів.
4. Встановити кількісний вплив ключових показників якості агломерату (вміст дріб'язку, міцність на стирання) на питомий вихід колошникового пилу та шламу газоочисток.
5. Розробити та теоретично обґрунтувати технологічні рекомендації щодо оптимізації якісних параметрів шихтових матеріалів для зниження виходу побічних продуктів в умовах сучасного доменного виробництва.

Об'єкт дослідження – процес утворення побічних продуктів (шлаку, колошникового пилу, шламу) в умовах доменної печі великого об'єму.

Предмет дослідження – залежність питомого виходу та складу доменного шлаку, колошникового пилу та шламу від якісних характеристик залізорудної шихти, зокрема від її гранулометричного складу та показників міцності.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у систематизації впливу основних якісних показників залізорудних шихтових матеріалів на процеси пило- та шламоутворення. Встановлено кількісні кореляційні залежності між вмістом фракції менше 5 мм в агломераті, його міцністю на стирання та питомим виходом колошникового пилу і шламу в умовах форсованої роботи доменної печі з використанням комбінованого дуття. Це дозволило уточнити уявлення про руйнування шихти на різних горизонтах печі та визначити пріоритетні напрямки контролю якості сировини для стабілізації роботи газоочисток.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці конкретних технологічних рекомендацій для інженерно-технічного персоналу аглодоменного виробництва. Запропоновано критерії для оперативного контролю якості агломерату, що подається до доменного цеху. Обґрунтовано, що стабілізація гранулометричного складу агломерату та підвищення його міцнісних характеристик дозволяє знизити питомий вихід шламу на 5-7% та, відповідно, зменшити безповоротні втрати заліза, що забезпечує прямий економічний ефект та сприяє покращенню екологічної ситуації за рахунок зменшення обсягів відходів, що підлягають складуванню.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

Скорочення та аббревіатури

- АМКР — ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг»
- АСУ ТП — автоматизована система управління технологічним процесом
- БЗП — безконусний завантажувальний пристрій
- ДП — доменна піч
- МВОЗ — метод відновлення одновимірних залежностей (статистичний метод)
- МНК — метод найменших квадратів (статистичний метод)
- ПВП — пиловугільне паливо
- ПГЗК — ПАТ «Південний гірничо-збагачувальний комбінат»
- ПрК — приведена питома витрата коксу

Умовні позначення фізичних та хімічних величин

- E_k — кінетична енергія дуття
- $E_{\text{пм кд}}$ — повна механічна енергія потоку комбінованого дуття
- $E_{\text{пм гг}}$ — повна механічна енергія горнового газу
- $Fe_{\text{заг}}$ — вміст загального заліза в сировині
- P_d — тиск дуття
- $Q_{\text{см}}$ — витрата газоповітряної суміші (дуття)
- $Q_{\text{гг}}$ — вихід горнового газу
- $R_{\text{від}}$ — радіус осьової «віддушини» (зона зі зниженим рудним навантаженням)
- $S_{\text{ф}}$ — площа перерізу фурми
- $T_{\text{см}}$ — температура газоповітряної суміші
- T_m — теоретична температура горіння палива
- $V\sigma$ — коефіцієнт варіації (показник стабільності властивостей)
- n — кількість повітряних фурм

- $\rho_{\text{см}}$ — густина газоповітряної суміші
- σ — середньоквадратичне відхилення

Показники якості сировини

- CRI (*Coke Reactivity Index*) — показник реакційної здатності коксу
- CSR (*Coke Strength after Reaction*) — показник міцності коксу після реакції з CO₂ («гаряча» міцність)
- LTD — міцність при низькотемпературному відновленні
- M₁₀ — показник стираності коксу (вміст фракції менше 10 мм після випробування в барабані)
- M₂₅ (або M₄₀) — показник механічної міцності коксу на удар (вміст фракції більше 25 мм або 40 мм після випробування)

Одиниці вимірювання

- ДаН/ок — деканьютон на окаток (одиниця виміру міцності на стиснення)
- кДж/с — кілоджоуль за секунду (одиниця потужності/енергії потоку)
- кг/т — кілограм на тонну (питома витрата матеріалів на 1 т чавуну)
- м³/хв — кубічний метр за хвилину (витрата газів)
- т/добу — тонн за добу (продуктивність агрегату)

Терміни

- Зона когезії — зона в'язко-пластичного стану шихти в доменній печі (зона розм'якшення та плавлення).
- Осьова віддушина — центральна зона колошника печі, в яку завантажується переважно кокс для забезпечення газопроникності осьової зони.
- Парадокс реакційної здатності — явище, при якому використання коксу з підвищеною реакційною здатністю (CRI) призводить до зниження питомої витрати палива (ефект Nippon Steel).
- Тотерман — малорухливий стовп шихтових матеріалів (коксу) в центрі горна доменної печі.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ТЕОРІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА

1.1. Аналіз світових тенденцій інтенсифікації доменної плавки та зміни вимог до якості шихти.

Розвиток доменного виробництва протягом останніх десятиліть характеризувався чіткими тенденціями, спрямованими на інтенсифікацію процесу плавки. Ще в минулому столітті були визначені та реалізовані основні напрямки, які дозволили досягти сучасного високого технічного рівня виплавки чавуну. До ключових факторів належали: збільшення корисного об'єму доменних печей, підвищення температури гарячого дуття, збагачення дуття киснем, підвищення тиску газу на колошнику, а також впровадження технологій вдування вуглеводневих добавок — природного газу, мазуту та, особливо, пиловугільного палива (ПВП).

На сучасному етапі можна стверджувати, що екстенсивні методи підвищення ефективності доменної плавки практично вичерпали свій ресурс. Питання подальшого нарощування об'ємів агрегатів втратило свою актуальність: доменні печі об'ємом 5000–5500 м³ визнані оптимальними як з технологічної, так і з економічної точок зору, забезпечуючи високу продуктивність при раціональних капітальних витратах. Температурні режими також досягли своїх меж: сучасні конструкції повітронагрівачів стабільно забезпечують температуру гарячого дуття на рівні 1300 °C і вище, що є достатнім для високоефективного ведення процесу.

Підвищення тиску газу на колошнику, яке раніше розглядалося як потужний засіб інтенсифікації, нині використовується переважно для підтримки оптимального перепаду статичного тиску газів у печі, що забезпечує стабільну газодинаміку. Технології вдування додаткових видів палива також добре освоєні промисловістю. Найбільш поширеним та ефективним стало вдування природного газу та пиловугільного палива, причому саме технологія ПВП дозволяє досягати рекордних показників скорочення витрат коксу та підвищення продуктивності.

В умовах, коли параметри дуттьового режиму та конструкції печей наблизилися до своїх теоретичних та практичних максимумів, центр ваги у боротьбі за ефективність виробництва змістився в площину якості шихтових матеріалів. Забезпечення доменних печей високоякісними залізорудними матеріалами та коксом стало пріоритетним напрямком, який має випереджати інші технологічні рішення.

Головним напрямком інноваційного вдосконалення технології є перехід на використання одного виду залізорудної сировини, який поєднував би найкращі властивості агломерату та окатків. Розробка та впровадження офлюсованих локальних спеків або інших комплексних огрудкованих матеріалів дозволяє отримати сировину з високим вмістом заліза, стабільним хімічним складом та оптимальними аеродинамічними характеристиками шару.

Особливої гостроти питання якості сировини набуває в умовах масового впровадження технології вдування пиловугільного палива. Заміна частини коксу на вугільний пил (у кількості до 250 кг/т чавуну) призводить до збільшення навантаження на коксову насадку та зміни газодинамічних умов у нижній частині печі. Для стабільної роботи в таких умовах залізорудна частина шихти повинна мати мінімальний вихід дріб'язку, високу міцність при відновленні та вузький інтервал температур розм'якшення-плавлення, що забезпечує хорошу газопроникність зони когезії.

Підвищення якості сировини є фундаментом для вирішення головного економічного завдання — зниження питомих витрат коксу, на який припадає основна частка енергетичних витрат у виробництві чавуну. Оскільки кокс виконує функцію не лише палива, а й розпушувача стовпа шихти (забезпечуючи газопроникність, особливо в нижніх зонах), будь-які заходи зі зменшення його витрат — наприклад, шляхом заміни на дешевше пиловугільне паливо чи антрацит — можливі лише за умови суворого дотримання вимог до якості шихтових матеріалів.

1.2. Порівняльний аналіз металургійних властивостей традиційних та перспективних видів залізорудної сировини

На сучасному етапі розвитку доменного виробництва, коли можливості екстенсивного нарощування обсягів печей фактично вичерпані, центр уваги технологів змістився на якість шихтових матеріалів. Основними залізовмісними компонентами залишаються офлюсований агломерат (традиційно з основністю 1,2–1,3 од.) та окатки (офлюсовані або неофлюсовані). Ефективність їх використання визначається тим, наскільки їхні властивості відповідають жорстким вимогам щодо стабільності хімічного складу, міцності та поведінки у зоні високих температур.

Сучасні вимоги доменної плавки до металургійних характеристик агломерату та окатишів

Найменування показників	Агломерат	Окатиші
1	2	3
1. В холодному стані		
1.1. Міцність на стиснення, ДаН/ок (ДСТУ 3206-95)	—	не менше 200,0
1.2. Вміст в готовій продукції окатишів з міцністю на стиснення більше 200,0 ДаН/ок, %	—	не менше 90,0
1.3. Коефіцієнт міцності (+5 мм), % (ДСТУ 3200-95)	не менше 80,0	не менше 95,0
1.4. Коефіцієнт стираності (0-0,5 мм), % (ДСТУ 3200-95)	не більше 4,0	не більше 3,0
1.5. Вміст дріб'язку (0-5 мм) в готовій продукції, %	не більше 6,0	не більше 3,0
1.6. Крупність готової продукції, % класів.	не менше 85 % 8-35 мм	не менше 95 % 8-18 мм
2. В процесі відновлення		
Найменування показників	Агломерат	Окатиші
2.1. Показник міцності (+5 мм), % (ДСТУ 3202-95)	не менше 50,0	не менше 80,0
2.2. Показник стираності (0-0,5 мм), % (ДСТУ 3202-95)	не менше 5,0	не менше 5,0
2.3. Усадка шару при відновленні, % (ДСТУ 3205-95)	не більше 20,0	не більше 30,0
1	2	3
2.4. Перепад тиску-відновнику в шарі, Па (ДСТУ 3202-95)	не більше 150	не більше 200

2.5. Фактичний ступінь відновлення, % (ДСТУ 3204-95)	не менше 90,0	не менше 90,0
2.6. Відновлюваність при ступені відновлення до 40 %, %/хв (ДСТУ 3204-95)	не менше 0,5	не менше 0,5
2.7. Температури початку і кінця розм'якшення, °С (ДСТУ 3817-98)	не нижче 1050 и 1150	не нижче 960 и 1160
2.8. Температурний інтервал розм'якшення, °С (ДСТУ 3817-98)	не більше 100	не більше 200
3. Стабільність складу		
3.1. Допустимі коливання вмісту заліза, ± %	0,25	0,25
3.2. Допустимі коливання закису заліза, ± %	1,00	0,50
3.3. Допустимі коливання основності, ± д.од.	0,05	0,025

Сучасні вимоги до стабільності хімічного складу є критичними для теплового стану печі. Допустимі коливання вмісту заліза для обох матеріалів не повинні перевищувати $\pm 0,25$ %, вмісту закису заліза — $\pm 1,0$ % для агломерату та $\pm 0,5$ % для окатків. Особливо жорсткі вимоги висуваються до стабільності основності: для агломерату допустиме відхилення становить $\pm 0,05$ од., а для окатків — лише $\pm 0,025$ од.

Головна технологічна перевага агломерату полягає у гнучкості його хімічного складу. Технологія агломерації дозволяє виробляти продукт із будь-якого залізистого матеріалу та відходів металургійного переділу, а головне — офлюсовувати його до будь-якої необхідної основності (CaO/SiO_2) у широкому діапазоні від 0,1 до 4,5 од. Це дає доменщикам потужний інструмент для регулювання шлакового режиму печі безпосередньо через залізисту частину шихти, мінімізуючи завантаження "сирого" вапняку, який потребує додаткового тепла на розкладання.

Натомість виробництво окатків має суттєві обмеження щодо хімічного складу. Позитивною рисою окатків є, безумовно, вищий вміст заліза порівняно з агломератом, що сприяє зниженню витрати коксу. Однак серйозним недоліком є технологічна неможливість (або економічна недоцільність) виробництва окатків з необхідною для доменної плавки основністю (вище 0,8 од.) у випадках, коли використовуються залізисті концентрати з вмістом кремнезему (SiO_2) понад

5,0 %. Це змушує використовувати в шихті суміш низькоосновних окатків та високоосновного агломерату, що ускладнює керування плавкою.

Фізико-хімічні властивості та холодна міцність

Наступним критичним блоком характеристик, що визначають ефективність доменної плавки, є фізико-механічні властивості матеріалів у холодному стані. Вони визначають здатність сировини зберігати свою цілісність під час багаторазових перевантажень у системі шихтоподачі — від складу до скіпа або конвеєра і далі у бункер безконусного завантажувального пристрою.

Агломерат, незважаючи на свою поширеність, має суттєві недоліки саме в цьому аспекті. Він характеризується відносно низькою міцністю на удар і високою стиранністю при транспортуванні. Внаслідок крихкої структури, значна частина агломерату руйнується ще до потрапляння в піч, що призводить до утворення дрібної фракції (0–5 мм). Згідно з сучасними вимогами (Табл. 1.1), вміст дріб'язку в готовому агломераті не повинен перевищувати 6,0 %, а коефіцієнт стиранності (фракція 0–0,5 мм після випробування в барабані) має бути не більше 4,0 %. Проте на практиці агломерат часто має широкий діапазон крупності та підвищений вміст дріб'язку, що значно погіршує газопроникність стовпа шихти в печі.

Окатки в цьому плані демонструють беззаперечні переваги. Технологія їх виробництва (огрудкування тонко подрібнених концентратів з наступним високотемпературним обпаленням) дозволяє отримати матеріал майже ідеальної сферичної форми з вузьким діапазоном гранулометричного складу (зазвичай 95 % окатків мають розмір 8–18 мм). Окатки відзначаються надзвичайно високою міцністю на стиснення — сучасні стандарти вимагають, щоб один окаток витримував навантаження не менше 200,0 ДаН/ок. Також вони мають низький коефіцієнт стиранності (не більше 3,0 %) і мінімальний вихід дріб'язку (не більше 3,0 %). Це забезпечує збереження їхньої форми при транспортуванні та створює умови для рівномірного проходження газів через шар матеріалів.

У окатків кут природного укусу значно менший — $28\text{--}32^\circ$. Через це вони схильні до скочування у нижчі ділянки профілю засипу (до стінок або в центр печі), що призводить до неконтрольованої сегрегації матеріалів. Це явище може порушувати газодинаміку печі та негативно впливати на стійкість футерівки, що змушує технологів застосовувати спеціальні методи завантаження для обмеження довільного переміщення окатків.

Окрім технологічних характеристик, важливим аргументом на користь збільшення частки окатків у шихті є екологічний фактор. Процес агломерації залишається одним із головних джерел шкідливих викидів на металургійному комбінаті (пил, оксиди сірки та азоту). Виробництво окатків чинить значно менший техногенний тиск на навколишнє середовище, що відповідає сучасним стратегіям сталого розвитку металургії.

Перспективним рішенням для усунення недоліків традиційних компонентів шихти є впровадження технології виробництва **офлюсованих локальних спеків** (або гібридного огрудкованого матеріалу). Цей вид сировини являє собою симбіоз агломерату та окатків, поєднуючи високий вміст заліза та міцність, характерні для окатків, із сприятливими аеродинамічними та технологічними властивостями агломерату.

Технологічно виробництво офлюсованих локальних спеків базується на використанні модернізованого процесу агломерації. На відміну від класичного агломерату, до шихти вводиться підвищена частка тонкоподрібнених залізорудних концентратів (аналогічних тим, що йдуть на окатки), а процес спікання відбувається при скоригованому тепловому режимі з використанням твердого палива. Це дозволяє отримати структуру з міцністю, наближеною до окатків, але зі збереженням пористості та неправильної форми шматка, властивої агломерату, що забезпечує високий кут природного укусу.

Ключовою перевагою локальних спеків є кут природного укусу на рівні $37\text{--}41^\circ$, що відповідає показнику доменного коксу. Це дозволяє уникнути проблем із сегрегацією та скочуванням матеріалів на колошнику, які виникають при використанні звичайних окатків, та забезпечити стабільний газорозподіл по

перерізу печі. Крім того, такий матеріал характеризується вузьким інтервалом розм'якшення та високою відновлюваністю, що робить його оптимальною основою для переходу на високоефективну доменну плавку з використанням одного виду залізорудної сировини (моношихти).

Поведінка матеріалів у процесах відновлення та розм'якшення

Поведінка шихтових матеріалів у відновлювальній атмосфері доменної печі є критичним фактором, що визначає газопроникність стовпа шихти та ефективність використання енергії газів. Згідно з сучасними вимогами, показник міцності матеріалів під час відновлення (клас +5 мм) має становити не менше 50,0 % для агломерату та не менше 80,0 % для окатків. Це вказує на те, що окатки значно краще зберігають свою цілісність у верхніх горизонтах печі під впливом відновлювальних газів, тоді як агломерат схильний до інтенсивнішого руйнування (низькотемпературна дезінтеграція).

Агломерат має суттєвий недолік — низьку міцність і високу стиранність у процесі низькотемпературного відновлення (500–600 °C). Руйнування кусків агломерату в цій зоні призводить до утворення дріб'язку, який забиває порожнечі між кусками коксу та погіршує газодинаміку. Водночас пориста структура агломерату забезпечує йому високу відновлюваність, що дозволяє інтенсифікувати процеси плавки.

Окатки, навпаки, характеризуються високою міцністю під час відновлення, що є їхньою перевагою. Проте низькоосновні окатки мають схильність до значної усадки шару (набухання) під час відновлення — допустима норма становить не більше 30 %, тоді як для агломерату цей показник жорсткіший і становить не більше 20 %. Висока усадка окатків може призводити до зростання перепаду тиску газу в шарі, що негативно впливає на рівність ходу печі.

Ще одним важливим аспектом є поведінка матеріалів у зоні високих температур, де відбувається їх розм'якшення та плавлення. Агломерат має суттєву перевагу — вузький інтервал температур розм'якшення (різниця між початком і кінцем розм'якшення не перевищує 100 °C), причому початок

розм'якшення відбувається при досить високих температурах (не нижче 1050 °C). Це забезпечує формування вузької зони когезії (зони в'язко-пластичного стану) в печі, що є сприятливим для проходження газів.

Окати, особливо низькоосновні, часто мають значно ширший температурний інтервал розм'якшення (до 200 °C) та нижчу температуру початку цього процесу (від 960 °C). Широка зона розм'якшення створює значний опір проході газів, що може порушувати стабільність ходу печі. Крім того, низькоосновні окати характеризуються високими величинами перепаду тиску газу в шарі в процесі високотемпературного відновлення (до 1100 °C), що є їхнім серйозним технологічним недоліком.

Незважаючи на високу міцність і вміст заліза, використання окатків вимагає ретельного контролю їх розподілу на колошнику для запобігання утворенню малопроникних зон, тоді як агломерат забезпечує кращу газопроникність у нижній частині печі завдяки своїм властивостям розм'якшення.

Проведений порівняльний аналіз показує, що традиційні шихтові матеріали — агломерат та окати — мають як суттєві переваги, так і значні недоліки, що впливають на технологію доменної плавки.

Наявність у шихті двох компонентів з настільки різними фізико-хімічними та аеродинамічними характеристиками ускладнює ведення плавки на граничних параметрах продуктивності. Тому головним напрямком вдосконалення технології є пошук рішень, які дозволили б поєднати високий вміст заліза та міцність окатків з сприятливими аеродинамічними властивостями та здатністю до офлюсування агломерату. Це обґрунтовує необхідність розробки та використання нових видів сировини (наприклад, офлюсованих локальних спеків) або суворої оптимізації співвідношення агломерату та окатків для стабілізації ходу печі.

Агломерат є технологічно зручним для регулювання розподілу шихти на колошнику завдяки куту природного укосу, який є аналогічним доменному коксу. Також він характеризується сприятливою поведінкою у зоні розм'якшення. Проте його суттєвими недоліками залишаються низький вміст заліза, низька міцність на

удар та висока стиранність при транспортуванні, а також широкий діапазон гранулометричного складу.

Окати забезпечують високу концентрацію заліза та відмінну холодну міцність, але створюють аеродинамічні проблеми через низький кут природного укосу ($28\text{--}32^\circ$), що призводить до їхньої сегрегації та неконтрольованого переміщення у нижчі ділянки профілю засипу. Крім того, низькоосновні окати схильні до значної усадки та підвищеного перепаду тиску під час високотемпературного відновлення.

Також важливим аргументом на користь окатків у сучасному світі є екологічний фактор: процес агломерації вважається більш екологічно «брудним» через значні викиди пилу та діоксиду сірки (SO_2), тоді як виробництво окатків чинить менший тиск на навколишнє середовище.

Наявність у шихті двох компонентів із настільки відмінними фізико-хімічними характеристиками створює бар'єри для подальшої інтенсифікації плавки. Тому актуальним напрямком інноваційного вдосконалення технології є перехід на використання одного виду залізорудної сировини, який поєднував би найкращі властивості агломерату та окатків.

Важливим етапом роботи шихтових матеріалів у доменній печі є зона розм'якшення та плавлення (зона когезії). Саме тут шихта втрачає свою сипкість, перетворюючись на в'язко-пластичні маси, що створює найбільший опір проходженню горнових газів.

Згідно з нормативними вимогами (Табл. 1.1), температурний інтервал розм'якшення є визначальним показником якості. Для агломерату температура початку розм'якшення має бути не нижче **1050°C** , а кінця — не нижче **1150°C** . При цьому температурний інтервал розм'якшення не повинен перевищувати **100°C** . Вузкий інтервал розм'якшення є значною перевагою агломерату, оскільки це забезпечує формування тонкої зони когезії, що сприяє кращій газопроникності нижньої частини печі.

Для окатків вимоги дещо інші: температура початку розм'якшення допускається не нижче **960°C** , а інтервал розм'якшення може досягати **200°C** .

Широкий інтервал розм'якшення та нижча температура його початку у окатків створюють ризик утворення широкої малопроникної зони в печі, що ускладнює дренаж продуктів плавки та рух газів.

Різниця у фізичних властивостях призводить до того, що при завантаженні в піч окатки не утримуються на гребені шихти, а скочуються в нижчі ділянки профілю (до стінок або в центр), що викликає сегрегацію матеріалів. Це порушує заданий розподіл рудного навантаження по радіусу, дестабілізує газовий потік і може негативно впливати на стійкість футерівки та рівність ходу печі.

1.3. Оцінка впливу фізико-хімічних властивостей та реакційної здатності коксу на тепловий стан печі.

У сучасній доменній плавці на кокс припадає найбільша частка споживання палива, а витрати на нього складають основну частину собівартості чавуну. Ефективність використання коксу визначається його потрібною функцією: енергетичною (забезпечення теплом), хімічною (відновлювальний газ CO) та фізичною (роль твердої насадки або «скелета» стовпа шихти).

Першим рівнем оцінки якості є хімічний склад, насамперед зольність та вміст сірки.

Зола коксу є баластом, який зменшує вміст корисного вуглецю та потребує додаткових витрат тепла на розплавлення. Сірка — шкідлива домішка, для видалення якої необхідно підвищувати основність шлаку та температуру в горні, що веде до перевитрат палива 3. Згідно з нормативними даними, зниження зольності коксу на 1 % дозволяє зменшити його питому витрату на 1,3 %, а зниження вмісту сірки на 0,1 % — на 0,3 %.

Окрім хімічного складу, важливими є і фізико-механічні властивості (холодна міцність), які визначають здатність коксу зберігати кусковатість при транспортуванні та опусканні в печі⁵.

Традиційно ці властивості оцінюються показниками:

- **M₂₅ (міцність на удар):** Характеризує опір дробленню. Для сучасних потужних печей цей показник має бути не менше 88,0–90,0 %⁶.

- **M₁₀ (стираність):** Характеризує схильність до утворення дріб'язку. Це найбільш критичний показник, оскільки дріб'язок забиває простір між шматками шихти, погіршуючи газопроникність. Вимога для сучасних печей — не більше 6,0–7,2 %. Кількісна оцінка впливу цих показників наведена у Таблиці 1.2.

Таблиця 1.2. Вплив показників якості коксу на його питому витрату та продуктивність доменної печі

Фактори зміни якості коксу	Зміна витрати коксу, %	Зміна продуктивності, %
Зменшення зольності на 1 %	-1,3	+1,3
Зменшення вмісту сірки на 0,1 %	-0,3	+0,3
Підвищення міцності (M ₂₅) на 1 %	-0,6	+0,6
Зниження стираності (M ₁₀) на 1 %	-2,8	+2,8
Зменшення вмісту фракції +80 мм на 1 %	-0,2	+0,2
Зменшення вмісту фракції -25 мм на 1 %	-1,0	+1,0

Важливим резервом підвищення ефективності використання палива є залучення у шихту **коксового горішка** (фракція 10–25 мм або 6–25 мм). Традиційно ця фракція відсівалася, проте сучасна практика показує, що її завантаження у суміші із залізорудною частиною шихти дозволяє утилізувати дрібне паливо без погіршення газопроникності стовпа шихти. Це сприяє покращенню відновлювальних процесів у рудному гребені та знижує загальну собівартість чавуну.

Роль показників гарячої міцності та реакційної здатності в умовах інтенсифікації плавки

Варто наголосити, що вимоги до якості шихтових матеріалів набувають значення саме в умовах впровадження технології **вдування пиловугільного палива (ПВП)**. При заміщенні частини коксу вугільним пилом (у кількості до 200 кг/т і більше) навантаження на коксову насадку в горні різко зростає. Тому

будь-яке погіршення міцності коксу або гранулометрії агломерату при роботі з ПВП призводить до миттєвого розладу ходу печі.

Традиційний підхід стверджує: чим менше кокс реагує з CO_2 у верхніх зонах печі, тим більше вуглецю зберігається для згоряння біля фурм і тим вища його «гаряча» міцність (CSR) у нижній частині агрегату. Проте, аналіз світових досліджень та практика роботи вітчизняних підприємств виявили явище, яке можна назвати «парадоксом реакційної здатності».

Суть цього феномену полягає в тому, що за певних умов використання коксу з **підвищеною реакційною здатністю** (високим CRI) не призводить до перевитрат палива, а навпаки — дозволяє суттєво знизити питому витрату коксу та підвищити продуктивність печі. Це явище було зафіксоване дослідниками провідних металургійних компаній, зокрема в екологічному центрі фірми Nippon Steel (Японія), де встановили, що високореакційний кокс змінює температурний профіль відновлення агломерату, зміщуючи його в область нижчих температур.

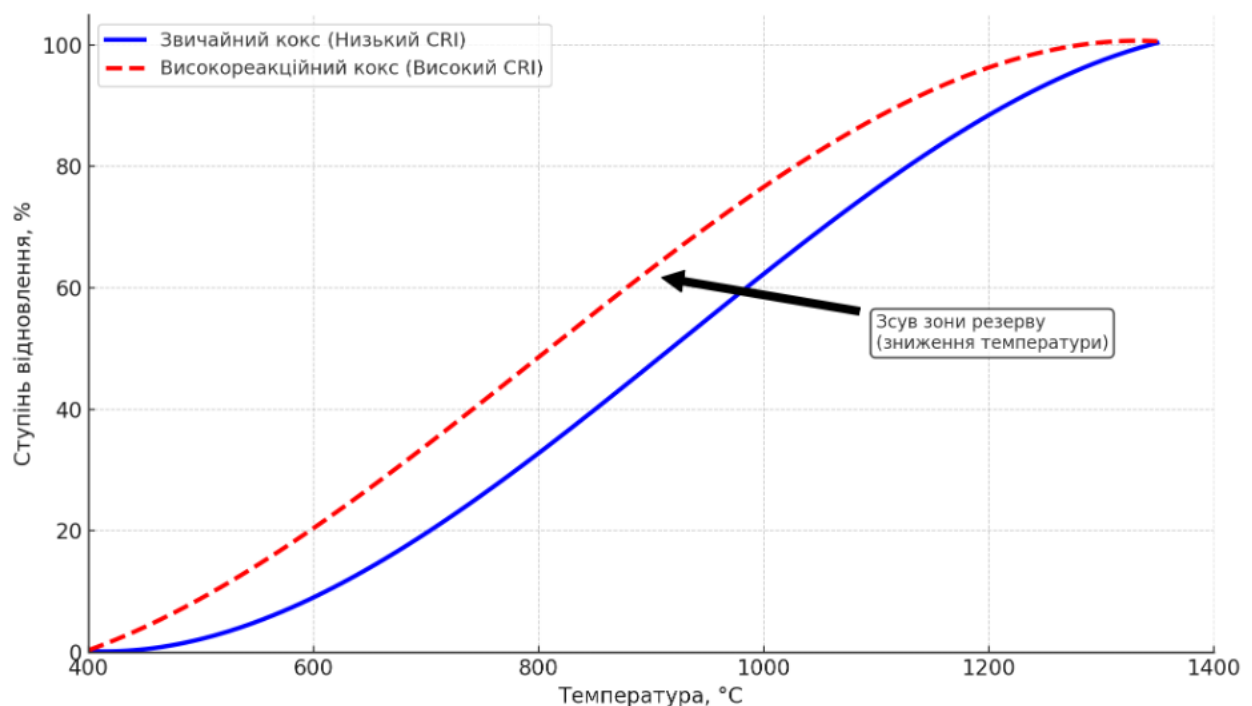


Рис. 1. Парадокс реакційної здатності

Цей ефект порівнюють з результатами вдування природного газу в поєднанні з підвищенням температури дуття. Тобто кокс сам починає працювати як активний реагент, що інтенсифікує процеси відновлення ще до того, як

потрапить у горн. Розуміння цього механізму відкриває нові резерви економії, які суперечать спрощеному погляду «чим міцніше кокс, тим краще»

Щоб зрозуміти, чому високореакційний кокс може заощаджувати паливо, потрібно заглибитися в теплообмінні процеси доменної печі. У класичній схемі доменної плавки існує так звана «зона теплового резерву» — ділянка в шахті печі, де температури шихти та газу практично вирівнюються (на рівні 900–1000 °C). Ця зона є своєрідним буфером, який визначає ступінь використання хімічної енергії газу (CO) для непрямого відновлення оксидів заліза ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$).

Використання коксу з підвищеною реакційною здатністю ($\text{CRI} > 30\text{--}35\%$) призводить до того, що реакція Будуара (взаємодія коксу з діоксидом вуглецю) починається раніше і протікає інтенсивніше при нижчих температурах. Оскільки ця реакція є сильно ендотермічною (поглинає багато тепла — 166 кДж/моль), вона викликає локальне зниження температури газів, що піднімаються з нижніх горизонтів.

Внаслідок цього відбувається **зниження температури зони теплового резерву**. Температурний рівень, при якому теплоємність потоку шихти зрівнюється з теплоємністю потоку газу, зміщується в область нижчих значень (наприклад, до 800–850 °C).

Це має два важливі наслідки:

1. **Покращення відновлення:** При нижчих температурах рівновага реакції відновлення оксидів заліза оксидом вуглецю зміщується в бік утворення продукту (заліза), що дозволяє газам краще «відпрацювати» свій хімічний потенціал.

2. **Перерозподіл тепла:** Зниження температури на кордоні між верхнім і нижнім ступенями теплообміну означає, що більше тепла засвоюється в нижній частині печі (зоні плавлення), де воно найбільш потрібне.

Тобто високореакційний кокс діє як регулятор теплового стану, «охолоджуючи» верх печі та концентруючи теплову енергію вниз, що теоретично знижує потребу в загальній кількості палива.

Ключовим моментом у розумінні «парадоксу реакційної здатності» є зміна співвідношення між прямим та непрямим відновленням заліза. Як відомо, основна кількість тепла в нижній частині доменної печі витрачається на ендотермічну реакцію прямого відновлення вюститу твердим вуглецем коксу ($\text{FeO} + \text{C} = \text{Fe} + \text{CO} - Q$). Саме потреба в теплі для цієї реакції значною мірою диктує підсумкову витрату коксу.

Використання високореакційного коксу змінює кінетику процесів у шахті печі. Завдяки активній взаємодії вуглецю коксу з діоксидом вуглецю (реакція газифікації), відбувається інтенсивна регенерація відновного газу (CO) безпосередньо в зоні помірних температур. Це призводить до підвищення відновного потенціалу газового потоку.

Збагачений оксидом вуглецю газ починає активніше відновлювати залізну руду ще до того, як вона опуститься в зону високих температур. Японські дослідники з центру екології та промислової технології фірми Nippon Steel встановили, що при роботі на високореакційному коксі максимум швидкості відновлення агломерату зміщується в область нижчих температур.

Це означає, що більша частина кисню заліза видаляється шляхом **непрямого відновлення** (газом CO), яке є екзотермічним (виділяє тепло) або слабо ендотермічним. Внаслідок цього, коли шихта опускається в низ печі, в ній залишається менше невідновленого FeO, що потребує прямого відновлення коксом. Зменшення обсягу прямого відновлення автоматично знижує потребу в теплі і, як наслідок, дозволяє скоротити витрату коксу.

Тому кокс із високим CRI у цьому сценарії виступає не просто як паливо, а як хімічний активатор, що переносить навантаження з «дорогого» прямого відновлення на «дешевше» непряме.

Теоретичні передумови позитивного впливу високореакційного коксу знайшли своє підтвердження у промисловій практиці. Знайдено детальний аналіз роботи доменної печі №9 (об'ємом 5000 м³) ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» у період з 2006 по 2010 роки.

Статистичний аналіз виявив несподівану, на перший погляд, залежність: фактична питома витрата коксу знижувалася, а продуктивність печі зростала при використанні коксу з **вищим** показником реакційної здатності (CRI).

Конкретні виробничі дані свідчать про таке:

- При інтенсивності плавки по коксу 700–800 кг/(м³·добу) і менше, збільшення показника CRI на **1 %** (понад рівень 37 %) призводило до зниження середньої питомої витрати коксу на **2,5 %**.

- При цьому продуктивність печі зростала на **2,2 %**.

Цей ефект пояснюється тим, що при підвищенні реакційної здатності коксу знижується температура резервної зони, що збільшує кількість тепла, яке засвоюється в нижній зоні теплообміну (де це найбільш необхідно).

Проте, цей «парадокс» має **суворі обмеження**. Зниження витрати коксу за рахунок підвищення його реакційної здатності можливе лише за умови **високої відновлюваності залізорудної частини шихти**. Це необхідно для того, щоб вплив зростаючого відновного потенціалу газу (завдяки активній газифікації коксу) переважав над негативним впливом зниження температур у верхній зоні печі.

Якщо шихта відновлюється повільно, то позитивний ефект від активного коксу нівелюється, а ризик його руйнування зростає. Тому ефективність реакцій відновлення заліза в печі визначається як результат пов'язаних реакцій за участю коксу і залізорудної сировини, які повинні бути узгоджені між собою.

Незважаючи на привабливість зниження витрат палива за рахунок використання високореакційного коксу, цей шлях пов'язаний із серйозними технологічними ризиками. Головна проблема полягає у фізичній природі коксу. Прагнення знизити питому витрату відновника за рахунок високої реакційної здатності (CRI) неминуче призводить до посиленого руйнування коксу внаслідок реакції газифікації.

Механізм руйнування такий:

1. Інтенсивна реакція $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ «виїдає» вуглець зі стінок пор коксу.
2. Це послаблює структуру шматків коксу саме в той момент, коли на них тисне величезна маса стовпа шихти.
3. Якщо кокс втрачає міцність занадто швидко (низький показник CSR), він перетворюється на дріб'язок і пил ще до того, як досягне фурм.

Це створює загрозу для газопроникності нижньої частини печі та дренажної здатності горна. Коксовий дріб'язок забиває простір між шматками, порушуючи рух газів і стікання розплавів. Позитивний ефект від високого CRI спостерігається лише тоді, коли технологічними заходами вдається запобігти «захаращенню» горна.

1.4. Вплив стабільності складу та властивостей шихтових матеріалів на хід доменного процесу

Дослідження показують, що питома витрата коксу та продуктивність печі залежать не лише від абсолютних значень, а й від відхилень від них. Підвищення нестабільності складу та властивостей коксу безпосередньо дестабілізує тепловий стан печі та хімічний склад чавуну.

Кокс залишається головним енерготехнологічним матеріалом доменної плавки. Ефективність його використання та можливість заміни альтернативними видами палива (ПВП, антрацит) безпосередньо залежать від його якості.

1. Зниження вмісту золи та сірки, а також підвищення холодної міцності (M_{25}) та стійкості до стирання (M_{10}) є базовими умовами зниження витрат палива.
2. Для інтенсивної роботи печей великого об'єму критичними є показники гарячої міцності (CSR не менше 56 %, CRI не більше 29 %).
3. Стабілізація якісних характеристик є пріоритетним завданням, оскільки навіть незначні коливання призводять до значних економічних втрат через розлад технологічного режиму.

Показник якості коксу	Скорочення витрати коксового еквіваленту, кг/т чавуну
Вміст сірки (S)	1,37
Вміст золи	1,50
Механічна міцність (M_{25})	4,23
Стираність (M_{10})	1,38
Гаряча міцність (CSR)	5,33

У сучасному доменному виробництві поняття «якість шихти» не обмежується лише середніми значеннями хімічного складу чи фізичних властивостей. Не менш важливим параметром, який часто визначає кінцеву ефективність плавки, є **стабільність** цих характеристик у часі. Навіть шихта з високим вмістом заліза та низькою зольністю, але зі значними коливаннями цих показників від порції до порції, може завдати більше шкоди технологічному процесу, ніж бідніша, але стабільна сировина.

Нестабільність властивостей шихтових матеріалів (коливання вмісту заліза, основності, зольності коксу, його вологості та міцності) призводить до постійних збурень у тепловому та газодинамічному стані доменної печі. Доменна піч — це інерційний агрегат, який не може миттєво реагувати на зміни вхідних параметрів. Тому будь-які різкі відхилення якості матеріалів порушують встановлений баланс, викликаючи розлад ходу печі, коливання хімічного складу чавуну (особливо вмісту кремнію та сірки) та зниження продуктивності.

Основним джерелом коливань якості коксу є нестабільність вугільної шихти, з якої він виробляється. Дослідження показують, що варіація показників механічної міцності коксу (M_{25}) та стираності (M_{10}) знаходиться у тісному кореляційному зв'язку з коливаннями властивостей вугільної шихти, зокрема її вологості та зольності. Це означає, що неможливо отримати стабільний кокс без попередньої ретельної стабілізації вхідної сировини ще на етапі коксохімічного переділу.

Ситуація значно ускладнюється сучасним станом сировинної бази українських підприємств. На коксохімічні виробництва (зокрема, ПАТ

«АрселорМіттал Кривий Ріг») надходить вугілля з різних вугільних басейнів, яке суттєво відрізняється за своїми технологічними властивостями. Використання таких багатокомпонентних сумішей із концентратів різного походження робить завдання отримання однорідного за властивостями коксу надзвичайно складним інженерним викликом.

Вирішальним фактором у цих умовах стає ефективність усереднення та змішування компонентів шихти. У виробничих умовах необхідна стабільність досягається шляхом ретельного усереднення вугілля на вугільних складах (методом пошарового формування штабелів) та використання високоточних автоматизованих систем дозування компонентів шихти перед завантаженням у коксові камери. Встановлено, що для забезпечення необхідної стабільності якості коксу ступінь змішування вугільної шихти за всіма показниками має складати 98–99 %. Проте, як показує аналіз роботи підприємств, фактичний ступінь однорідності часто далекий від цього оптимуму, що призводить до завантаження в доменну піч порцій коксу з різко відмінними характеристиками.

Головна економічна проблема нестабільності полягає в необхідності **«страхування»**. Щоб уникнути похолодання горна у випадку раптового погіршення якості сировини (наприклад, приходу порції коксу з високою зольністю або агломерату з низьким вмістом заліза), технологи змушені підтримувати завищений тепловий рівень печі. Це означає, що в піч постійно завантажуються надлишкова кількість коксу (резерв тепла), яка витрачається не на корисну роботу, а на компенсацію можливих коливань.

Для кількісної оцінки впливу нестабільності якості шихти на показники плавки були використані спеціальні математичні моделі. Вони дозволили встановити, що техніко-економічні показники доменної печі (продуктивність і питома витрата коксу) визначаються не лише абсолютними значеннями якості матеріалів, а й величиною їх відхилень від середнього.

Наприклад, дослідження показали, що навіть незначне збільшення середньоквадратичного відхилення вмісту сірки в коксі (на 0,02 %) призводить до відчутних втрат: продуктивність печі знижується на 1 %, а питома витрата

коксу зростає на 4,8 кг/т чавуну. Аналогічна ситуація спостерігається і з фізико-механічними властивостями: збільшення коливань показника міцності коксу (M_{40}) на 0,5 % спричиняє перевитрату коксу на 9,6 кг/т чавуну.

Щодо залізорудної частини шихти, то сучасні вимоги також суворо регламентують стабільність її складу. Перевищення цих меж неминуче призводить до розладу теплового та шлакового режимів плавки.

1.5 Узагальнення факторів впливу якості шихти на показники печі

1. Аналіз сучасного стану доменного виробництва показав, що екстенсивні шляхи розвитку галузі вичерпані. Головним резервом підвищення ефективності та енергозбереження є покращення якості шихтових матеріалів, що стає дуже важливим в умовах впровадження технології вдування пиловугільного палива (ПВП).

2. Порівняльний аналіз залізорудної сировини виявив, що традиційні компоненти — агломерат та окатки — мають протилежні переваги та недоліки. Агломерат забезпечує сприятливу газодинаміку завдяки високому куту укосу та вузькій зоні розм'якшення, тоді як окатки мають вищий вміст заліза та кращу холодну міцність. Перспективним напрямком є використання офлюсованих локальних спеків, які поєднують переваги обох матеріалів.

3. Встановлено, що ефективність використання коксу визначається не лише його холодною міцністю (M_{25} , M_{10}), але й показниками гарячої міцності (CSR) та реакційної здатності (CRI). Для інтенсивної плавки з ПВП необхідний кокс із $CSR \geq 56\%$. Водночас виявлено «парадокс реакційної здатності», який дозволяє знижувати витрати палива при використанні коксу з підвищеним CRI за умови високої відновлюваності залізорудної частини шихти.

4. Доведено, що стабільність якісних характеристик шихти є не менш важливою, ніж їхні абсолютні значення. Математичний аналіз показав, що зниження коефіцієнта варіації якісних показників коксу на 1 % дозволяє зменшити витрату палива на 1,3–5,3 кг/т чавуну. Це обґрунтовує необхідність

впровадження заходів з усереднення сировини та автоматизації контролю її якості.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЯКОСТІ СИРОВИНИ НА ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ НА ПРИКЛАДІ ПАТ «АРСЕЛОРМІТТАЛ КРИВИЙ РІГ»

2.1. Аналіз ефективності використання різних видів залізорудної сировини та вплив вмісту заліза на продуктивність печі

Таблиця 2.7

Технологічні параметри отримання і металургійні характеристики різних видів огрудкованої сировини

Найменування показників	Промисловий офлюсований агломерат	Промислові офлюсовані та неофлюсовані окатиші	Офлюсовані локальні спеки з підвищеним вмістом заліза і залишковим вуглецем
1	2	3	4
Питома продуктивність агрегату, т/м ² ·год	1,1-1,4 ¹	0,79-1,2	1,1-1,4
Питома витрата теплоти, МДж/т	1947-2452	367-840	391-728
Питома витрата електроенергії, кВт·год/т	43,1-71,3	38,7-68,1	37,4-59,5
Вміст, %: Fe	51,2-64,1	61,5-65,8	63,5-74,8
FeO	9,1-15,6	1,3-5,4	7,6-25,2
SiO ₂	8,2-3,7	7,7-0,9	4,1-2,3
C	0	0	1,6-2,5
1	2	3	4
Основність (CaO/SiO ₂), од	1,2-1,8	0,1-1,25	1,25-1,5
Вміст класів, %: 60-100 мм	23,7-35,6	0	0 85,9-71,8 11,9-24,8
20-60 мм 5-	55,9-34,3	0 91,7-98,9 5,2-1,8	2,2-3,4
20 мм 0-5 мм	12,3-7,8		
	8,1-20,4		
Міцність в барабані, ДСТУ ISO 3271:2012, %:	57,4-93,1	92,4-97,1	93,5-96,4
на удар (+5 мм) стиранисть (-0,5 мм)	13,6-2,6	5,8-1,1	3,6-2,5
Міцність при відновленні, ДСТУ ISO 7215:2008, %:	37,8-62,2	53,6-95,1	72,9-93,1
міцність (+5 мм) стиранисть (-0,5 мм)	10,4-5,3	7,4-4,2	4,2-3,3
Газопроникність та усадка шару при відновленні, ДСТУ 3205-95:			
усадка шару, % перепад тиску, Па	15-18 68-71	23-67 108-154	13-19 60-72

Кінцевий ступінь відновлення, ДСТУ ISO 7215:2008, %	65,1-96	72,8-91,4	89,1-93,8
Кут природного укусу, град.	38-41	25-32	37-40

На основі аналізу виробничої діяльності ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» встановлено, що ефективність доменної плавки стримується використанням багатокомпонентної шихти, яка складається з агломерату та окатків, що мають суттєво відмінні фізико-хімічні характеристики. Для визначення резервів підвищення ефективності було проведено порівняльний аналіз металургійних властивостей традиційної шихти (промисловий агломерат та окатки) та перспективних видів сировини (офлюсованих локальних спеків), розроблених та випробуваних у рамках досліджень, наведених у джерелі.

Аналіз якісних характеристик, отриманих у ході промислових та напівпромислових випробувань (узагальнені дані наведені в Таблиці 2.7), дозволив виявити ключові відмінності, що впливають на техніко-економічні показники плавки.

Аналіз хімічного складу та вмісту заліза

Ключовим фактором, що визначає вихід шлаку та питому витрату коксу, є вміст заліза ($\text{Fe}_{\text{заг}}$) та кремнезему (SiO_2) у шихті.

- Промисловий агломерат: За результатами аналізу, вміст заліза в агломераті, що використовується на підприємстві, варіюється в межах 51,2–57,6 % (для окремих партій до 64,1 %). При цьому вміст кремнезему залишається високим — на рівні 9,2–10,4 %, що вимагає підвищеної витрати вапняку для офлюсування та збільшує вихід шлаку.

- Промислові окатки: Характеризуються значно вищим вмістом заліза — 62,2–65,8 % та меншим вмістом кремнезему (4,7–7,7 %). Однак їх використання обмежене через низьку основність (0,1–1,25 од.), що змушує вводити в шихту додатковий флюс або високоосновний агломерат.

- Локальні спеки (перспективна сировина): Дослідження нового виду сировини (офлюсованих локальних спеків з підвищеним вмістом заліза) показало можливість отримання матеріалу з вмістом заліза 63,5–74,8 % при мінімальному

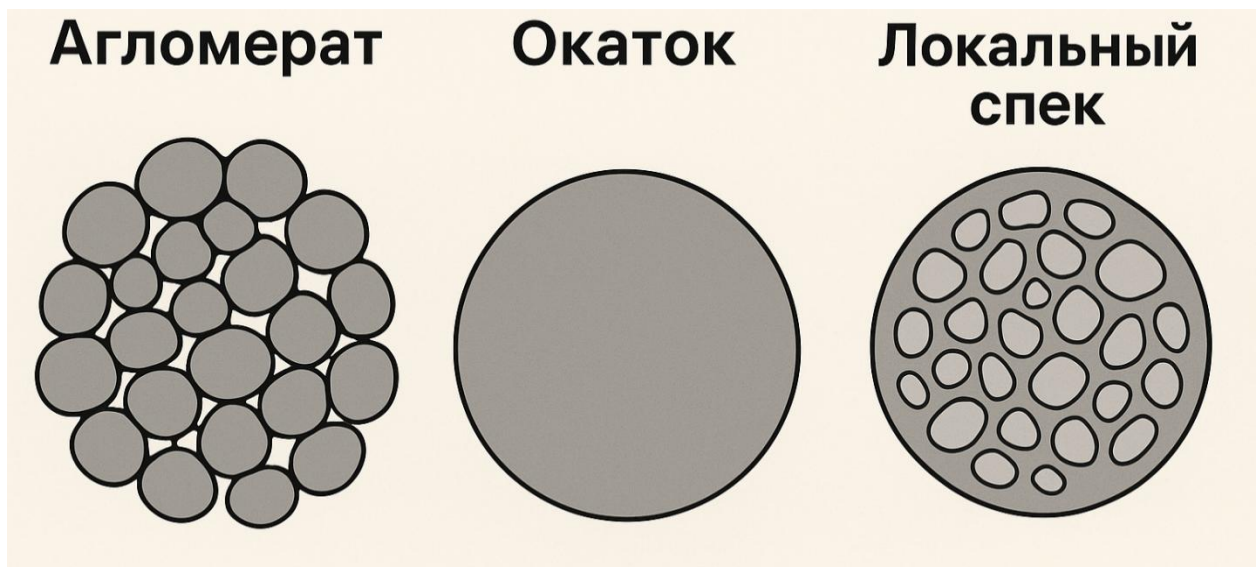
вмісті кремнезему 2,3–4,1 %. Це дозволяє досягти природної основності 1,25–1,5 од., що є оптимальним для доменної плавки без додавання сирого вапняку в піч.

2. Аналіз вмісту закису заліза (FeO) та відновлювальної здатності

Аналіз мінералогічного складу показав суттєві відмінності в окисненні матеріалів, що впливає на їх поведінку у верхній зоні печі.

- Традиційний агломерат має високий вміст FeO (9,1–15,6 %), що свідчить про наявність важковідновлюваних фаз.
- Окатки мають низький FeO (1,3–5,4 %), що забезпечує кращу відновлюваність, але робить їх схильними до руйнування при низькотемпературному відновленні.
- Локальні спеки з залишковим вуглецем характеризуються широким діапазоном FeO (7,6–25,2 %), однак наявність вуглецю в структурі матеріалу (1,6–2,5 %) інтенсифікує процес відновлення "зсередини", що підтверджується високим показником кінцевого ступеня відновлення — 89,1–93,8 % (проти 65,1–82,3 % у агломерату).

3. Порівняльний аналіз фізико-механічних властивостей (Холодна міцність)



Статистичний аналіз якісних показників шихти, що надходила на доменні печі, виявив суттєву різницю у міцності матеріалів на удар та стирання, що визначається за стандартом ДСТУ ISO 3271.

- Промисловий агломерат: Характеризується значною нестабільністю показників міцності. Міцність на удар (фракція +5 мм після барабану) варіюється в широкому діапазоні 57,4–93,1 %, при цьому показник стираності (фракція -0,5 мм) досягає високих значень — 8,3–13,6 %. Це свідчить про схильність агломерату до руйнування при перевантаженнях, що призводить до утворення дріб'язку ще до завантаження в піч.

- Окатки: Демонструють високу стабільність механічних властивостей. Міцність на удар становить 92,4–97,1 %, а стираність мінімальна — 1,1–5,8 %.

- Офлюсовані локальні спеки: За результатами випробувань, розроблений матеріал поєднує кращі показники обох традиційних компонентів. Його міцність на удар становить 93,5–96,4 %, а стираність знаходиться на рівні 2,5–3,6 %, що відповідає найжорсткішим вимогам доменної плавки і перевищує показники промислового агломерату.

4. Аналіз гранулометричного складу та вмісту дріб'язку Однорідність шихти є запорукою стабільної газопроникності. Аналіз фракційного складу виявив наступне:

- Агломерат: Має широкий діапазон крупності, містить значну кількість великих шматків (+60 мм: 23,7–35,6 %) та недопустимо високий вміст дріб'язку (0–5 мм: 8,1–20,4 %). Такий склад створює нерівномірний опір проходу газів.

- Окатки: Мають вузький діапазон крупності (основна маса 5–20 мм складає 93,5–97,3 %) та низький вміст дріб'язку (2,7–4,5 %).

- Локальні спеки: Технологія їх виробництва дозволяє повністю виключити фракцію +60 мм і забезпечити вміст основної робочої фракції (20–60 мм) на рівні 71,8–85,9 % при мінімальному вмісті дріб'язку 2,2–3,4 %. Це створює оптимальну структуру стовпа шихти.

5. Оцінка аеродинамічних характеристик та поведінки при відновленні

Критичним фактором для управління газовим потоком "зверху" є кут природного укусу та поведінка матеріалів при нагріванні.

- Кут природного укусу: Експериментальні дані підтвердили головний недолік окатків — низький кут укусу ($25\text{--}32^\circ$), що призводить до їх скочування в центр печі і порушення розподілу шихти. Натомість, локальні спеки мають кут укусу $37\text{--}40^\circ$, що аналогічно агломерату ($38\text{--}41^\circ$) та коксу. Це дозволяє формувати стійкий профіль засипу на колошнику.

- Газопроникність шару при відновленні: При високотемпературному відновленні окатки (особливо низькоосновні) демонструють високий перепад тиску газу в шарі ($108\text{--}154$ Па), що свідчить про погіршення газопроникності. Для агломерату та локальних спеків цей показник значно кращий і знаходиться в межах $60\text{--}73$ Па.

- Міцність при відновленні (LTD): Локальні спеки показали найвищу стійкість до руйнування в відновлювальній атмосфері: вихід фракції $+6,3$ мм після випробувань склав $72,9\text{--}93,1$ %, тоді як для звичайного агломерату цей показник часто падає до **$37,8$ %**, що призводить до забивання горна пилом.

6. Результати промислових випробувань на доменних печах середнього об'єму (ДП №8, 2700 м^3)

Вплив якості агломерату на показники плавки було яскраво продемонстровано під час капітального ремонту ДП №9, коли весь обсяг високоякісного агломерату (виробництва АЦ №2) був перенаправлений на піч №8. Аналіз техніко-економічних показників у базовому (стандартна шихта) та дослідному періодах показав наступне:

- Зміна якості шихти: У дослідному періоді вміст заліза у рудній частині шихти зріс з $55,43$ % до $56,00$ %, а середньозважений вміст дріб'язку (фракція $0\text{--}5$ мм) знизився з $14,26$ % до $8,18$ %.

- Вплив на продуктивність: Завдяки покращенню газопроникності стовпа шихти вдалося збільшити витрату дуття на $287\text{ м}^3/\text{хв}$. Це призвело до зростання добової продуктивності печі з 4672 до 5426 т/добу (приріст склав $13,9$ %).

- Економія палива: Питома витрата коксу знизилася на 19,2 кг/т чавуну (з 471,2 до 452 кг/т), що становить 4,2 % економії.

Аналогічні результати були отримані на ДП №6 (2000 м³), де перехід на якісний агломерат забезпечив приріст продуктивності на 18,6 % (722 т/добу) та зниження витрати коксу на 49,9 кг/т.

7. Розрахункова ефективність використання локальних спеків на потужній печі (ДП №9, 5000 м³)

Для доменної печі №9 було виконано моделювання роботи на перспективній сировині — офлюсованих локальних спеках з підвищеним вмістом заліза та залишковим вуглецем.

Таблиця. 2.8.

Техніко-економічні показники роботи доменної печі об'ємом 5000 м³
ПАТ “АрселорМіттал Кривий Ріг” при використанні в шихті локальних
спеків з підвищеним вмістом заліза та залишковим вуглецем

Показники	ДП-9			
	Періоди		±К, кг/т	±П, т/сут.
	Б	Р		
1	2	3	4	5
Тривалість періоду, діб.	31			
Продуктивність, т/доб.	9826			
Приведена продуктивність, т/доб.	9826	11278		+1452,0
Витрата коксу (К), кг/т	427,0			
Приведена витрата коксу, кг/т	427,0	363,0	-64,0	
Витрата антрациту (А), кг/т	56	56		
Витрата залишкового вуглецю, кг/т	0	32,5	-26,0	
Дуття: витрата, м³/хв тист, кПа (надл.) температура, °С	7812 337 1090	7812 337 1090		
Витрата природного газу, м³/т	87,1	87,1		
Вміст кисню в дутті, %	30,5	30,5		
Поточні простої/тихий хід, %	0,83/0,03	0,83/0,03		
Вихід шлаку, кг/т	402	350		
Вміст Fe у всій шихти, %	55,0	60,0	-21,0	+789,0

1	2	3	4	5
Колошниковий газ: тиск, кПа (надл.) температура, °C вміст %: CO CO ₂ H ₂	139 93 30,0 18,4 6,2	139 93 30,0 18,4 6,2		
Аналіз чавуну, %: Si Mn S P	0,84 0,30 0,019 0,076	0,84 0,30 0,019 0,076		
Основність шлаку, од.	1,22	1,22		
Витрата, кг/т: агломерат АФ №1 агломерат АФ №2 окатиші ПГЗК локальні спеки скрап металічний щлак збагачений вапняк	134,4 1192 300,3 0 51,3 56,4 28,0	0 0 0 1626,7 51,3 56,4 0	-6,0	+138,0
Якість коксу, %: зола сірка M ₂₅ /M ₁₀ +80 мм -25 мм CSR/CRI	11,2 0,63 87,6/7,0 7,9 3,6 54,9/31,3	11,2 0,63 87,6/7,0 7,9 3,6 54,9/31,3		
Середньозважена фракція -5 мм, %	8,34	3,3	-11,0	+525,0

Таблиця 2.9.

Техніко-економічні показники роботи доменної печі об'ємом 5000 м³

ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" при вдуванні ПВП та використанні в шихті локальних спеків з підвищеним вмістом заліза та залишковим вуглецем

Показники	Періоди		±К, кг/т	±П, т/сут.
	Б	Р		
1	2	3	4	5
Тривалість періоду, діб.	31			
Продуктивність, т/доб.	9052			
Приведена продуктивність, т/доб.		10025		+973,0
Витрата коксу (К), кг/т	408,2			
Приведена витрата коксу, кг/т		357,2	-51	

1	2	3	4	5
Витрата коксового горішку (КО), кг/т	10,1	10,1		
Витрата ПВК, кг/т	92,0	92,0		
Витрата залишкового вуглецю, кг/т	0	33,52	-26,8	
Дуття: витрата, м ³ /хв тист, кПа (надл.) температура, °С	7633 334 1015	7633 334 1015		
Витрата природного газу, м ³ /т	7,4	7,4		
Вміст кисню в дутті, %	24,5	24,5		
Поточні простої/тихий хід, %	3,07/0,26	3,07/0,26		
Вихід шлаку, кг/т	429,5	350		
Вміст Fe у всій шихті, %	56,32	60,0	-15,02	+566,0
Колошниковий газ: тиск, кПа (надл.) температура, °С вміст %: CO CO ₂ H ₂	143 133 23,1 21,7 3,9	143 133 23,1 21,7 3,9		
Аналіз чавуну, %: Si Mn S P	0,68 0,16 0,016 0,082	0,68 0,16 0,016 0,082		
Основність шлаку, од.	1,11	1,11		
Витрата, кг/т: агломерат АФ №1 агломерат АФ №2 окатиші ПГЗК локальні спеки скрап металічний цлак збагачений	76,0 1290,0 310,6 0 11,3 45,3	0 0 0 1676,6 11,3 45,3		
Якість коксу, %: зола сірка M ₂₅ /M ₁₀ +80 мм -25 мм CSR/CRI	10,4 0,5 88,6/6,6 5,5 3,3 61,6/29,4	10,4 0,5 88,6/6,6 5,5 3,3 61,6/29,4		
Середньозважена фракція -5 мм, %	7,8	3,3	-9,18	+407,0

Порівняння проводилося з кращим базовим періодом роботи печі. Результати розрахунків (наведені в Таблицях 2.8 та 2.9) свідчать про колосальні резерви ефективності:

- **Підвищення вмісту заліза:** Використання локальних спеків дозволяє підняти вміст заліза у всій шихті з **55,0 %** до **60,0 %**.

- **Зниження дріб'язку:** Вміст фракції -5 мм у шихті зменшується з **8,34 %** до **3,3 %**.

- **Економічний ефект:** Комплексне покращення якості сировини забезпечує:

- ✓ Зростання приведеної продуктивності на **1452 т/добу** (з 9826 до 11278 т/добу).

- ✓ Зниження приведеної питомої витрати коксу на **64 кг/т** (з 427,0 до 363,0 кг/т).

Навіть в умовах вдування ПВП (пиловугільного палива), перехід на таку якісну сировину дозволяє додатково знизити витрату коксу на **51 кг/т** та підвищити продуктивність на **973 т/добу**.

2.2. Математичне моделювання впливу якісних характеристик коксу на енергетичні показники плавки

Методологія дослідження та побудова багатofакторних моделей

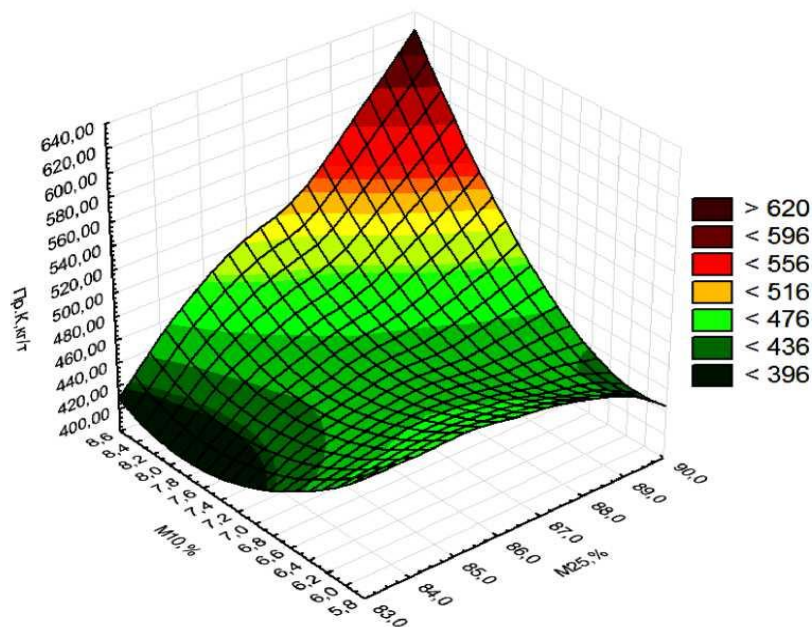


Рис. 3.1. Тривимірний графік впливу M_{25} і M_{10} на ПрК (ПрК – відстань зважених найменших квадратів)

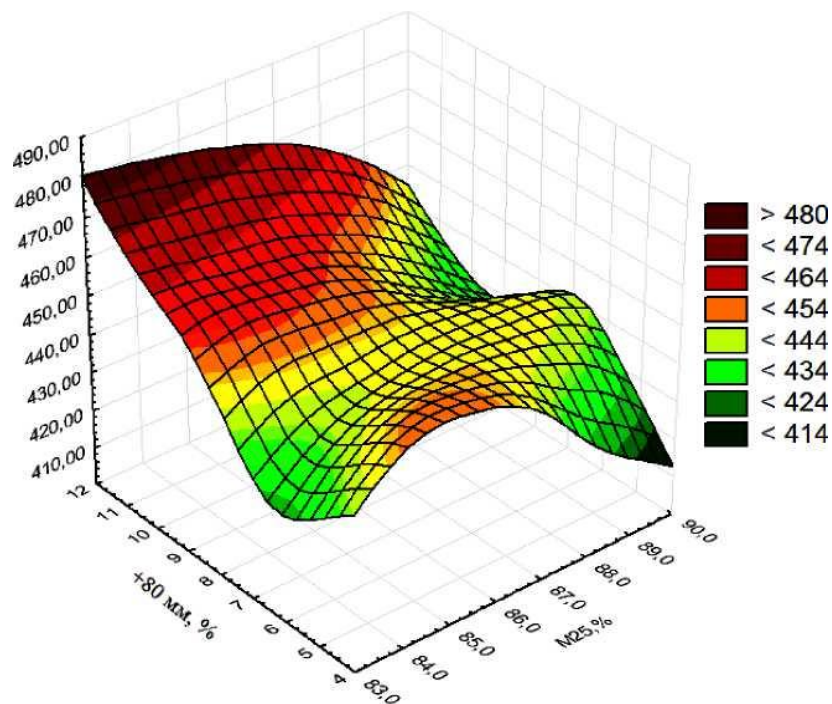


Рис. 3.2. Тривимірний графік впливу M_{25} і +80 мм на ПрК (відстань зважених найменших квадратів).

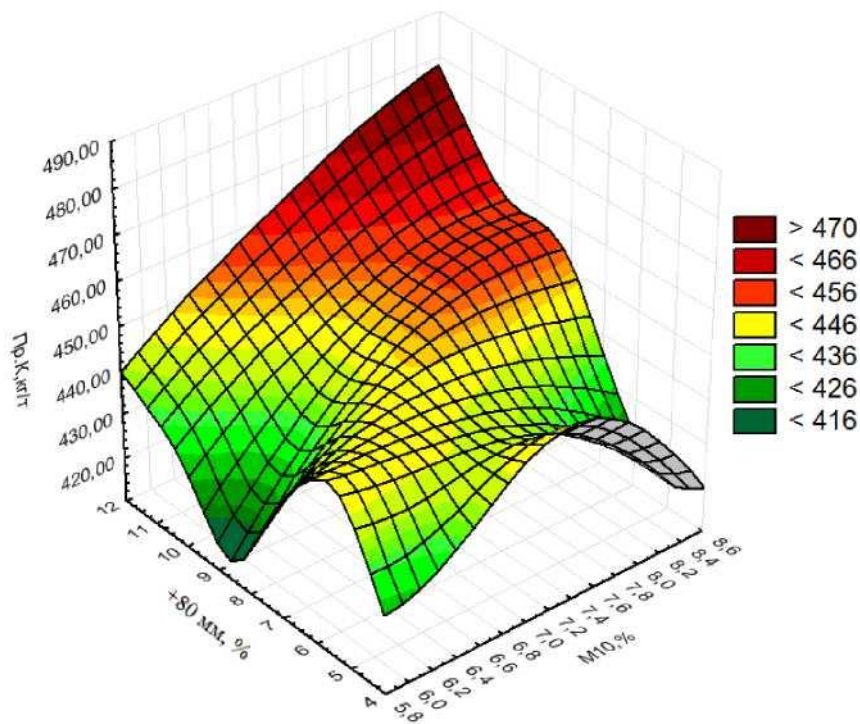


Рис. 3.3. Тривимірний графік впливу M_{10} і $+80$ на PrK (PrK – відстань зважених найменших квадратів)

Ефективність доменної плавки значною мірою залежить від стабільності та рівня якісних характеристик коксу. Складність оцінки цього впливу в реальних виробничих умовах полягає у тому, що на показники печі одночасно діє безліч факторів, і виділити "чистий" вплив окремого параметра (наприклад, тільки міцності M_{25}) без використання спеціального математичного апарату неможливо.

Для вирішення цього завдання в роботі було проведено статистичний аналіз усереднених помісячних даних роботи доменної печі №9 корисним об'ємом 5000 м³ ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» за 6-річний період. В якості цільової функції було обрано **приведену питому витрату коксу (PrK)**, яка вже скоригована на зміни дуттьового режиму, температури дуття, складу шихти тощо, що дозволяє ізолювати вплив саме якості коксу.

В ході дослідження було побудовано тривимірні графічні моделі поверхонь відгуку, що відображають спільний вплив пар параметрів на витрату коксу:

1. **Вплив міцності (M_{25}) та стираності (M_{10})** (див. Рис. 3.1).

2. **Вплив міцності (M_{25}) та вмісту великої фракції (+80 мм)** (див. Рис. 3.2).

3. **Вплив стираності (M_{10}) та вмісту фракції (+80 мм)** (див. Рис. 3.3).

Аналіз цих поверхонь показав складний нелінійний характер залежностей, що ускладнює оперативне прийняття рішень технологами. Тому для отримання кількісних залежностей були використані методи математичної статистики: класичний метод найменших квадратів (МНК) та спеціалізований метод відновлення одновимірних залежностей (МВОЗ).

Розрахунок лінійних багатофакторних рівнянь регресії дозволив отримати такі математичні моделі:

- За методом МНК:

$$\text{PrK} = 532,02 - 1,19 \cdot M_{25} + 0,78 \cdot M_{10} + 1,84 \cdot (+80)$$

- За методом МВОЗ:

$$\text{PrK} = 492,46 - 0,75 \cdot M_{25} + 2,15 \cdot M_{10} + 0,31 \cdot (+80)$$

Обидві моделі мають близькі показники точності (середня помилка 1,73–1,91 %), проте наявність вільного члена рівняння, який акумулює вплив інших факторів, не дозволяє використовувати ці формули для точного розрахунку економії від зміни одного конкретного показника. Це зумовило необхідність переходу до побудови та аналізу **однофакторних** залежностей, які детально розглядаються далі.

Оцінка впливу показника міцності на удар (M_{25})

Для отримання більш точної картини впливу міцності коксу на його витрату, із загального масиву даних (71 місяць роботи печі) було виключено періоди з екстремальними відхиленнями (помилки обліку, аварійні режими), що відрізнялися від середнього значення більше ніж на $\pm 3\sigma$. Це дозволило скоротити вибірку до 47 місяців, що забезпечило вищу достовірність апроксимації.

Аналіз графічної залежності приведеної витрати коксу (ПрК) від показника M_{25} (представленої на Рис. 3.4) виявив нелінійний характер зв'язку, який найкраще описується поліномом третього ступеня.

Залежність ПрК від показника M_{25} (47 місяців). Там же наведені розрахункові рівняння квадратичного (суцільна лінія) і кубічного поліному (пунктирна).

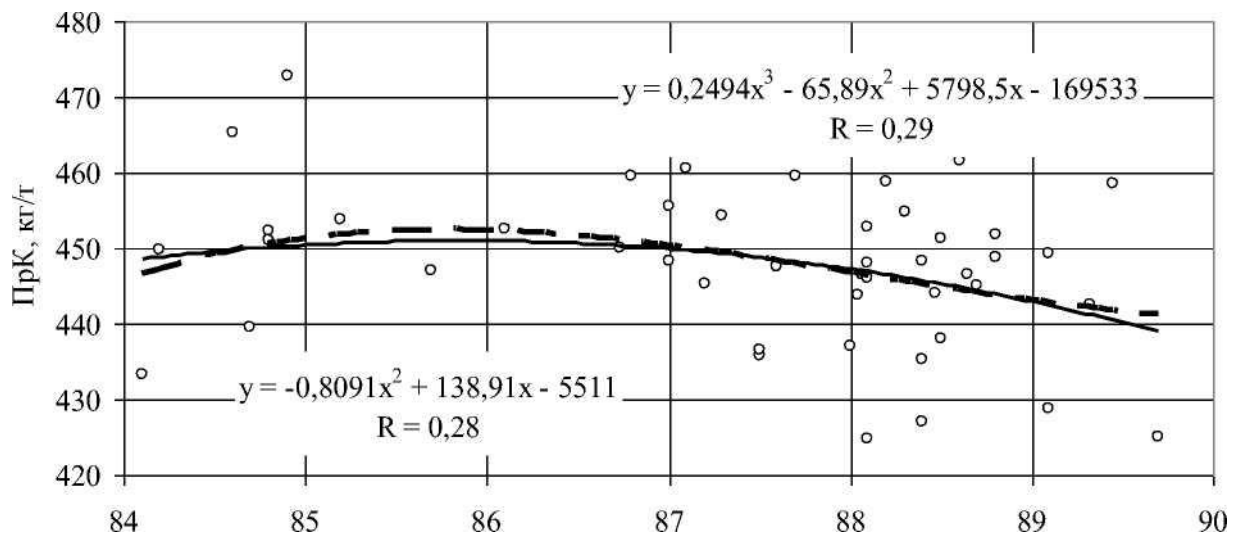


Рис. 3.4. Залежність приведеної витрати коксу від міцності M_{25}

Математична обробка цієї кривої дозволила зробити важливі технологічні висновки:

1. **Зона слабого впливу:** В інтервалі значень M_{25} від **84 % до 87 %** крива є досить пологою. Це означає, що в цьому діапазоні підвищення міцності коксу не дає суттєвого зниження його витрати, оскільки, ймовірно, інші фактори (наприклад, стиранність) мають домінуючий вплив.

2. **Зона сильного впливу:** В інтервалі **87–90 %** спостерігається різке падіння кривої витрати, що свідчить про високу ефективність підвищення міцності саме в цьому діапазоні.

Для кількісної оцінки ефекту було використано розрахункове рівняння регресії для кубічного полінома:

$$\text{ПрК} = 0,2494 \cdot M_{25}^3 - 65,89 \cdot M_{25}^2 + 5798,5 \cdot M_{25} - 169533$$

Підстановка конкретних значень у це рівняння дала такі результати:

- При $M_{25} = 88,0\%$ розрахункова витрата коксу становить **442,0 кг/т**.
- При $M_{25} = 89,0 \%$ витрата знижується до **438,1 кг/т**.

Таким чином, у діапазоні високої міцності (88–89 %) підвищення показника M_{25} всього на **1 %** забезпечує зниження питомої витрати коксу на **3,9 кг/т** чавуну.

Цей результат є значно вищим, ніж той, що дає спрощена лінійна модель (МНК), де коефіцієнт склав лише **1,57 кг/т**. Це пояснюється тим, що лінійна модель "усереднює" ефект по всьому діапазону, занижуючи реальну вигоду від роботи на високоякісному коксі. Отже, для сучасних умов роботи потужних печей слід орієнтуватися саме на нелінійні моделі, які підтверджують високу економічну доцільність боротьби за кожну десятку частку відсотка міцності M_{25} понад рівень 87 %.

Аналіз впливу показника стираності (M_{10}) на витрату коксу

На відміну від міцності на удар (M_{25}), залежність приведеної витрати коксу від показника стираності (M_{10}) має інший характер. Аналіз графічної залежності (Рис. 3.5) показав, що експериментальні точки досить щільно групуються навколо прямої лінії. Це підтверджується тим, що криві, побудовані за поліномами другого та третього ступенів, практично збігаються з лінійною регресією.

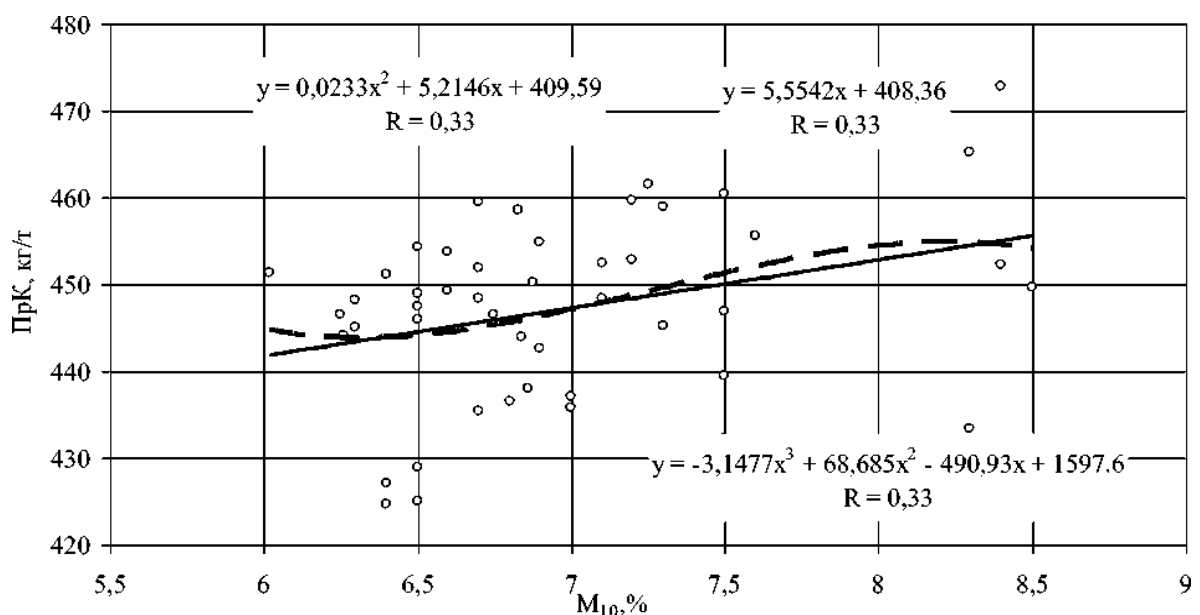


Рис. 3.5. Залежність приведеної витрати коксу від стираності M_{10}

Це свідчить про те, що в робочому діапазоні значень M_{10} (від 6,0 % до 8,5 %) вплив стираності на витрату палива є **лінійним та стабільним**: кожне погіршення якості на однакову величину призводить до однакового зростання витрат.

Для розрахунку економічного ефекту було використано отримане рівняння регресії:

$$\text{PrK}(M_{10}) = 408,36 + 5,5542 \cdot M_{10}$$

Розрахунок зміни витрати коксу при погіршенні показника стираності на 1 % (з 6,5 % до 7,5 %) дає такі результати:

1. При $M_{10} = 6,5$ %: $\text{PrK} = 408,36 + 5,5542 \cdot 6,5 = 444,46$ кг/т.
2. При $M_{10} = 7,5$ %: $\text{PrK} = 408,36 + 5,5542 \cdot 7,5 = 450,02$ кг/т.
3. **Різниця:** $450,02 - 444,46 = 5,56$ кг/т.

Цей результат практично ідеально збігається з коефіцієнтом, отриманим методом найменших квадратів (**5,57 кг/т**).

Висновки по M_{10} :

Отримані дані дозволяють стверджувати, що показник стираності (M_{10}) має більш вагомий вплив на ефективність плавки, ніж міцність на удар (M_{25}). Зниження стираності на 1 % дає економію коксу в 5,56 кг/т, тоді як підвищення міцності на 1 % (у лінійному наближенні) — лише близько 1,57–3,9 кг/т (залежно від методу оцінки). Це пояснюється фізикою процесу: продукти стирання (коковий дріб'язок) безпосередньо забивають пористості у стовпі шихти, різко погіршуючи газопроникність, що змушує форсувати дуття і збільшувати витрати палива.

Вплив фракційного складу коксу (вміст класу +80 мм)

Окремим завданням дослідження було визначення впливу вмісту надмірно великих шматків коксу (клас +80 мм) на ефективність плавки.

Графічний аналіз залежності (Рис. 3.6) показав, що криві, побудовані за поліномами другого та третього ступенів, розташовуються дуже близько одна до одної, а також до лінійної апроксимації.

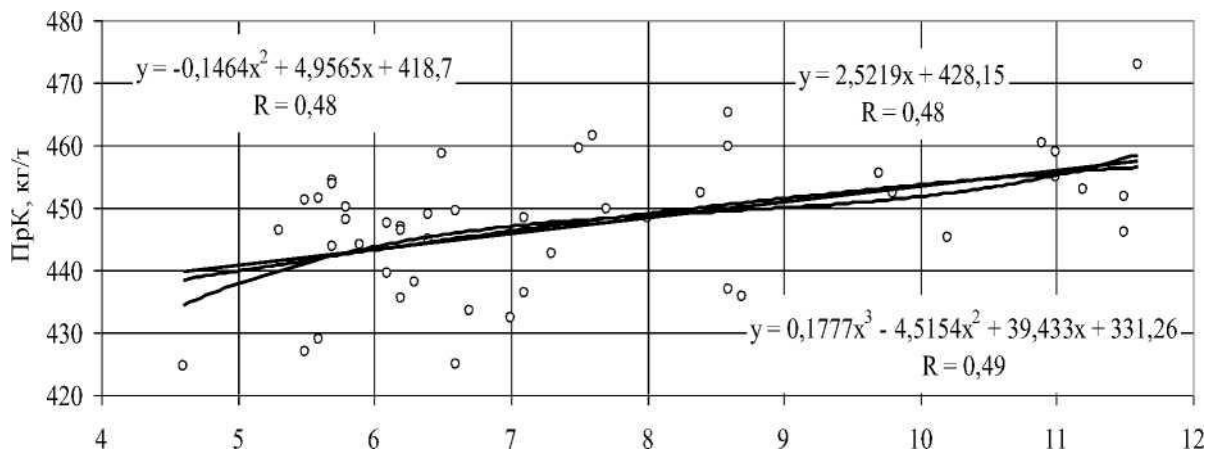


Рис. 3.6. Залежність приведеної витрати коксу від вмісту класу +80 мм

Для спрощення розрахунків та отримання зручної для технологів формули була обрана лінійна модель. Рівняння регресії має вигляд:

$$\text{PrK}(+80) = 428,15 + 2,5219 \cdot (+80)$$

Розрахунок впливу зміни вмісту цієї фракції на **1 %** дає наступні результати:

1. При вмісті фракції +80 мм = **5 %**: $\text{PrK} = 428,15 + 2,5219 \cdot 5 = 440,8$ кг/т.
2. При вмісті фракції +80 мм = **6 %**: $\text{PrK} = 428,15 + 2,5219 \cdot 6 = 443,3$ кг/т.
3. **Різниця**: $443,3 - 440,8 = 2,5$ кг/т.

Перевірка на інших інтервалах (збільшення з 10 % до 11 %) підтвердила стабільність цього коефіцієнта — **2,5 кг/т**.

Отриманий результат свідчить про те, що збільшення кількості фракції +80 мм призводить до зростання питомої витрати коксу. Це пояснюється тим, що надмірно великі шматки коксу схильні до інтенсивного розтріскування під дією термічних напружень та механічних навантажень всередині печі. Утворюючи неконтрольований дріб'язок безпосередньо в горні, вони

погіршують газопроникність нижньої зони печі значно сильніше, ніж якби цей кокс був попередньо подрібнений та розсортований на фракції 40–60 мм.

Важливо зазначити, що отриманий коефіцієнт впливу (**2,5 кг/т**) суттєво перевищує застарілі нормативи Міністерства чорної металургії СРСР (табл. 1.2), де цей вплив оцінювався лише у **0,89 кг/т**. Це вказує на те, що сучасні потужні доменні печі (об'ємом 5000 м³) значно чутливіші до однорідності гранулометричного складу коксу, і вимога до звуження діапазону крупності є економічно обґрунтованою.

Порівняльна оцінка результатів та висновки

Для верифікації отриманих даних було проведено порівняння коефіцієнтів впливу якості коксу на його питому витрату, розрахованих різними методами:

1. **За рівняннями кореляції** (нелінійні моделі, вибірка 47 місяців) — результати, отримані в даному дослідженні.
2. **За методом найменших квадратів (МНК)** — лінійні моделі за весь період.
3. **За нормативами Міністерства чорної металургії (МЧМ)** — традиційні коефіцієнти, що використовувалися для планування (Табл. 1.2).

Зведені результати порівняльного аналізу представлені в Таблиці 2.4.

Таблиця 2.4. Порівняння впливу зміни показників якості коксу на 1 % на приведену витрату коксу (ПрК)

Джерело розрахунку (Метод)	Зміна витрати коксу (кг/т) при погіршенні показника на 1 %		
	Міцність (M ₂₅) ↑	Стираність (M ₁₀) ↓	Фракція +80 мм ↓
1. Розрахунок за нелінійними моделями (поточне дослідження)	-3,9	+5,6	+2,5
2. Розрахунок за методом МНК (лінійний)	-1,57	+5,57	+2,0
3. Норматив МЧМ (традиційний)	-2,67	+12,45	+0,89

Аналіз розбіжностей:

1. **По M_{10} :** Традиційні нормативи суттєво завищували вплив стираності (12,45 кг/т), ймовірно, з метою стимулювання коксохіміків. Реальні виробничі дані показують вплив на рівні **5,6 кг/т**.

2. **По +80 мм:** Нормативи недооцінювали шкоду від великих шматків коксу (0,89 кг/т). Дослідження на сучасній печі великого об'єму (5000 м³) довело, що реальний негативний ефект у **2,8 рази вищий** (2,5 кг/т). Це підтверджує тезу про те, що для потужних печей однорідність гранулометрії є дуже важливим.

3. **По M_{25} :** Нелінійна модель показала найвищий потенціал економії (**3,9 кг/т**) у зоні високих значень міцності, що робить боротьбу за цей показник економічно виправданою.

2.3. Дослідження впливу стабільності якості коксу та ефективності заміщення його альтернативними видами палива

Вплив нестабільності якісних показників коксу на енергоємність плавки

В умовах інтенсифікації доменного виробництва, особливо при вдуванні пиловугільного палива (ПВП), критичного значення набувають не лише абсолютні значення показників якості коксу, а й їх стабільність у часі. Коливання фізико-хімічних властивостей палива призводять до дестабілізації теплового стану горна, що змушує технологічний персонал підтримувати завищений рівень нагріву печі (резерв тепла), що веде до перевитрат енергоресурсів.

Для кількісної оцінки цього впливу в роботі було проаналізовано роботу доменної печі №9 (5000 м³) у два періоди:

1. **Базовий період:** Робота лише на природному газі.
2. **Дослідний період:** Освоєння технології вдування ПВП (витрата вугілля 0–135 кг/т).

В якості критерію стабільності використовувався **коефіцієнт варіації** ($V\sigma$), який розраховувався для вмісту сірки (S), золи (A), міцності (M_{25}), стираності (M_{10}) та гарячої міцності (CSR).

Результати математичного моделювання:

За допомогою методу відновлення одновимірних залежностей (МВОЗ) були отримані рівняння регресії, що описують залежність витрати коксового еквіваленту (KE) від коефіцієнтів варіації якості коксу в умовах вдування ПВП.

Аналіз отриманих рівнянь показав, що доменна піч з ПВП надзвичайно чутлива до коливань якості:

- Залежність від коливань гарячої міцності (CSR):

$$KE = 506,27 + 5,5334 \cdot V\sigma(CSR)$$

Коефіцієнт кореляції $k = 0,99$ свідчить про майже функціональний зв'язок. Це означає, що будь-яка нестабільність CSR миттєво конвертується у перевитрату палива.

- Залежність від коливань стираності (M_{10}):

$$KE = 507,37 + 1,4069 \cdot V\sigma(M_{10})$$

Коефіцієнт кореляції $k = 0,98$.

- Залежність від коливань сірки (S):

$$KE = 505,63 + 1,1777 \cdot V\sigma(S)$$

На основі цих моделей було розраховано "ціну" нестабільності. Встановлено, що зменшення коефіцієнта варіації ($V\sigma$) на **1 %** дозволяє скоротити витрату палива на такі величини (див. Таблицю 3.13 джерела):

Таблиця 3.13.

Вплив варіації якісних характеристик коксу на коксовий еквівалент

Зменшення коефіцієнту варіації на 1 %	Скорочення витрат коксового еквіваленту, кг/т
$V\sigma(S)$	1,37

$V_{\sigma}(A)$	1,50
$V_{\sigma}(M_{25})$	4,23
$V_{\sigma}(M_{10})$	1,38
$V_{\sigma}(CSR)$	5,33

При роботі з ПВП найвагомішим фактором є стабільність післяреакційної міцності (CSR). Зниження коливань цього показника дає найбільший економічний ефект (5,33 кг/т на 1 % стабілізації), що перевищує ефект від стабілізації зольності чи сірки.

Порівняльний аналіз ефективності технологій вдування ПВП та завантаження антрациту

В умовах дефіциту та високої вартості коксу стратегічним напрямком розвитку доменного виробництва є заміщення частини твердого палива альтернативними енергоносіями. На ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» на доменній печі №9 (5000 м³) були послідовно реалізовані дві технології: завантаження кускового антрациту через колошник (2003–2006 рр.) та вдування пиловугільного палива (ПВП) через фурми (з 2016 р.). Це створило унікальну базу даних для порівняння їхньої ефективності.

1. Економічні та технологічні передумови

Важливим фактором економічного порівняння є вартість енергоносіїв. Вугілля для ПВП (енергетичних марок) зазвичай є значно дешевшим за сортовий антрацит, який є дефіцитним і дорогим видом палива. Тому, навіть при близьких показниках витрати коксу (у кг/т), собівартість чавуну при технології ПВП буде нижчою за рахунок різниці в ціні вдуваного палива. Ефективність використання антрациту доцільно розглядати переважно в періоди різких цінових коливань на ринку коксівного вугілля або при неможливості капітального будівництва установок ПВП.

- **Технологія ПВП:** Дозволяє заміщувати значні обсяги коксу (до 200–250 кг/т), однак потребує великих капітальних витрат на будівництво

помольних комплексів та інжекційних установок. Економічна ефективність досягається лише при стабільних витратах ПВП понад 150–200 кг/т.

- **Технологія використання антрациту:** Дозволяє заміщувати 70–90 кг/т коксу (з коефіцієнтом заміни 0,8–1,0 кг/кг). Головна перевага — відсутність потреби у значних капітальних вкладеннях, оскільки антрацит подається через існуючу систему шихтоподачі. Обмеженням є необхідність використання спеціальних режимів завантаження для запобігання погіршенню газопроникності.

2. Аналіз виробничих показників (ДП №9)

Для коректного порівняння було обрано періоди роботи печі з максимальними витратами антрациту та ПВП, а також періоди з мінімальною витратою коксу.

Порівняння при максимальних навантаженнях:

- Порівнювалися показники роботи за лютий 2006 року (антрацит 72,8 кг/т) та листопад 2016 року (ПВП 101,1 кг/т).

- Фактична витрата коксу при вдуванні ПВП була нижчою (418,2 кг/т проти 459,7 кг/т).

- Однак, **приведена витрата коксу** (після виключення впливу інших факторів) виявилася майже однаковою: **458,7 кг/т** для ПВП проти **459,7 кг/т** для антрациту. Це свідчить про те, що при витратах ПВП на рівні ~100 кг/т технологія не демонструє суттєвої переваги над антрацитом через нестабільність процесу.

- Порівняння при мінімальних витратах коксу (Найкращі періоди):

- Було співставлено роботу печі у вересні 2005 року (антрацит) та травні 2016 року (ПВП).

- У 2005 році при витраті антрациту **57,2 кг/т** приведена витрата коксу становила **400,1 кг/т**.

- У 2016 році при витраті ПВП **92,0 кг/т** приведена витрата коксу склала **408,5 кг/т**.

Висновок: У кращі періоди технологія завантаження антрациту забезпечувала навіть **нижчу** приведену витрату коксу (на 8,4 кг/т), ніж технологія ПВП на етапі освоєння.

3. Причини різної ефективності

Аналіз показав, що ефективність ПВП стримується жорсткими вимогами до якості коксу. У періоди використання антрациту піч працювала на коксі з показником $CSR \approx 44,7\%$, тоді як для ПВП використовувався кокс із $CSR \approx 61,6\%$. Незважаючи на кращий кокс, технологія ПВП не дала очікуваного прориву на початкових етапах через розлад газодинаміки (розвиток периферійного ходу) та технічні проблеми з обладнанням.

Натомість, технологія антрациту, яка передбачає його завантаження в суміші з рудними матеріалами в проміжну зону колошника, дозволяла ефективно утилізувати вуглець без порушення газопроникності "коксових вікон" у зоні когезії.

Розрахунок економічних втрат від нестабільності та висновки щодо вибору технології

Кількісна оцінка впливу коливань якості коксу на витрату палива (коксового еквіваленту) при вдуванні ПВП, виконана на основі регресійних моделей, наведена в Таблиці 2.5. Ці дані демонструють, що стабілізація процесу є потужним резервом економії.

Таблиця 2.5. Вплив підвищення стабільності якості коксу (зменшення коефіцієнта варіації $V\sigma$ на 1 %) на скорочення витрат палива

Показник якості коксу, за яким зменшується коливання ($V\sigma$)	Скорочення витрати коксового еквіваленту, кг/т чавуну
Вміст сірки (S)	1,37
Вміст золи (A^d)	1,50
Механічна міцність (M_{25})	4,23
Стираність (M_{10})	1,38

Показник якості коксу, за яким зменшується коливання ($V\sigma$)	Скорочення витрати коксового еквіваленту, кг/т чавуну
Гаряча міцність (CSR)	5,33

Дані таблиці свідчать, що при роботі з ПВП пріоритетом №1 є стабілізація **післяреакційної міцності (CSR)**. Зниження розкиду значень цього показника всього на 1 % дає економію 5,33 кг палива на тонну чавуну, що значно перевищує ефект від стабілізації хімічного складу.

Щодо вибору технології заміщення коксу, порівняння кращих періодів роботи ДП №9 (Таблиця 2.6) показує, що технологія завантаження антрациту може бути конкурентною.

Таблиця 2.6. Порівняння техніко-економічних показників роботи доменної печі об'ємом 5000 м³ при мінімальних витратах коксу (Антрацит vs ПВП)

Показники	Період завантаження антрациту (Вересень 2005)	Період вдування ПВП (Травень 2016)
Продуктивність, т/добу	7831	9052
Витрата антрациту, кг/т	57,2	0
Витрата ПВП, кг/т	0	92,0
Фактична витрата коксу, кг/т	400,1	408,2
Приведена витрата коксу, кг/т	400,1	408,5

Як видно з таблиці, у найкращий період використання антрациту приведена витрата коксу була на **8,4 кг/т нижчою**, ніж при використанні ПВП. Це пояснюється тим, що антрацит, завантажений у суміші з рудою, не погіршує газопроникність коксової насадки в зоні плавлення так сильно, як це може робити незгоріле вугільне паливо при нестабільному ході печі.

3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ЩОДО ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ДОМЕННОГО ВИРОБНИЦТВА

3.1. Оптимізація газодинамічного режиму роботи печі засобами управління «знизу» (параметри дуття та діаметр фурм)

Обґрунтування енергетичного підходу до вибору параметрів дуття

Підвищення ефективності доменної плавки за рахунок використання високоякісної сировини (зі зниженим вмістом дріб'язку та стабільним хімічним складом) неминуче призводить до зміни газодинамічних умов у печі. Покращення газопроникності стовпа шихти створює передумови для інтенсифікації плавки, однак реалізація цього потенціалу можлива лише за умови раціональної організації газорозподілу в нижній зоні печі — у фурмених вогнищах.

Традиційно головним інструментом управління роботою горна «знизу» вважався підбір діаметра повітряних фурм для забезпечення необхідної **кінетичної енергії дуття (E_k)**. Існувало усталене уявлення, що збільшення кінетичної енергії (шляхом зменшення діаметра фурм) автоматично подовжує зону горіння і забезпечує глибше проникнення газів до центру печі, активізуючи осьову зону.

Проте, аналіз досвіду роботи доменних печей ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» (зокрема ДП №8 об'ємом 2700 м³) показав, що цей підхід часто дає помилкові результати. Практичні вимірювання (зондування горна) довели, що при сталій величині кінетичної енергії на фурмах різного діаметра розміри зон горіння суттєво відрізняються: перед фурмами більшого діаметра зона розпушення завжди більша. Більше того, у багатьох випадках штучне підвищення кінетичної енергії (зменшення перетину фурм) призводило не до активізації центру, а навпаки — до розвитку периферійного ходу газів і розладу печі.

Це пояснюється тим, що кінетична енергія є лише частиною загальної енергії потоку. При зменшенні діаметра фурм зростає швидкість витоку (і кінетична складова), але водночас різко зростають втрати тиску в фурменому приладі, що зменшує потенційну енергію потоку (енергію тиску).

Тому для коректного розрахунку параметрів дуття при переході на якісну сировину пропонується використовувати показник **повної механічної енергії потоку комбінованого дуття ($E_{\text{пм кд}}$)**. Цей показник враховує як кінетичну енергію руху маси дуття, так і потенційну енергію тиску, з яким дуття надходить у горн. Саме сума цих енергій визначає реальну здатність струменя формувати зону циркуляції (зону горіння) необхідного розміру, що забезпечує стабільне сходження шихтових матеріалів ².

Ігнорування цього фактору при модернізації режимів дуття може призвести до того, що піч перестане «брати» дуття, незважаючи на високу якість завантажуваної сировини.

Аналіз негативного досвіду зменшення діаметра фурм при покращенні якості шихти

Практичне підтвердження тези про пріоритет повної механічної енергії над кінетичною було отримано під час промислового експерименту на доменній печі №8 (корисний об'єм 2700 м³). Метою експерименту було підвищення газодинамічної активності центру горна шляхом зменшення діаметра повітряних фурм зі **165 мм до 140 мм**. Експеримент проводився в умовах, коли на піч почали подавати шихтові матеріали покращеної якості, що теоретично мало б сприяти інтенсифікації плавки.

У базовому періоді (робота на фурмах 165 мм) піч працювала на шихті з середньозваженим вмістом дріб'язку (фракція 0-5 мм) на рівні 14,43 %, а якість коксу характеризувалася міцністю $M_{25} = 83,9$ % та стираністю $M_{10} = 8,8$ %.

У дослідному періоді (перехід на фурми 140 мм) якість сировини суттєво покращилася:

- Вміст дріб'язку в агломераті знизився до **9,1 %**.

- Міцність коксу M_{25} зросла до **87,3 %**, а стиранисть M_{10} покращилася до **7,6 %**.

Згідно з класичними уявленнями, покращення якості сировини у поєднанні зі збільшенням швидкості витоку дуття мало б призвести до різкого зростання продуктивності. Розрахунок параметрів дуття показав, що при зменшенні діаметра фурм **кінетична енергія потоку (E_k) зросла колосально — на 64,8 %** (з 131,7 до 217,1 кДж/с).

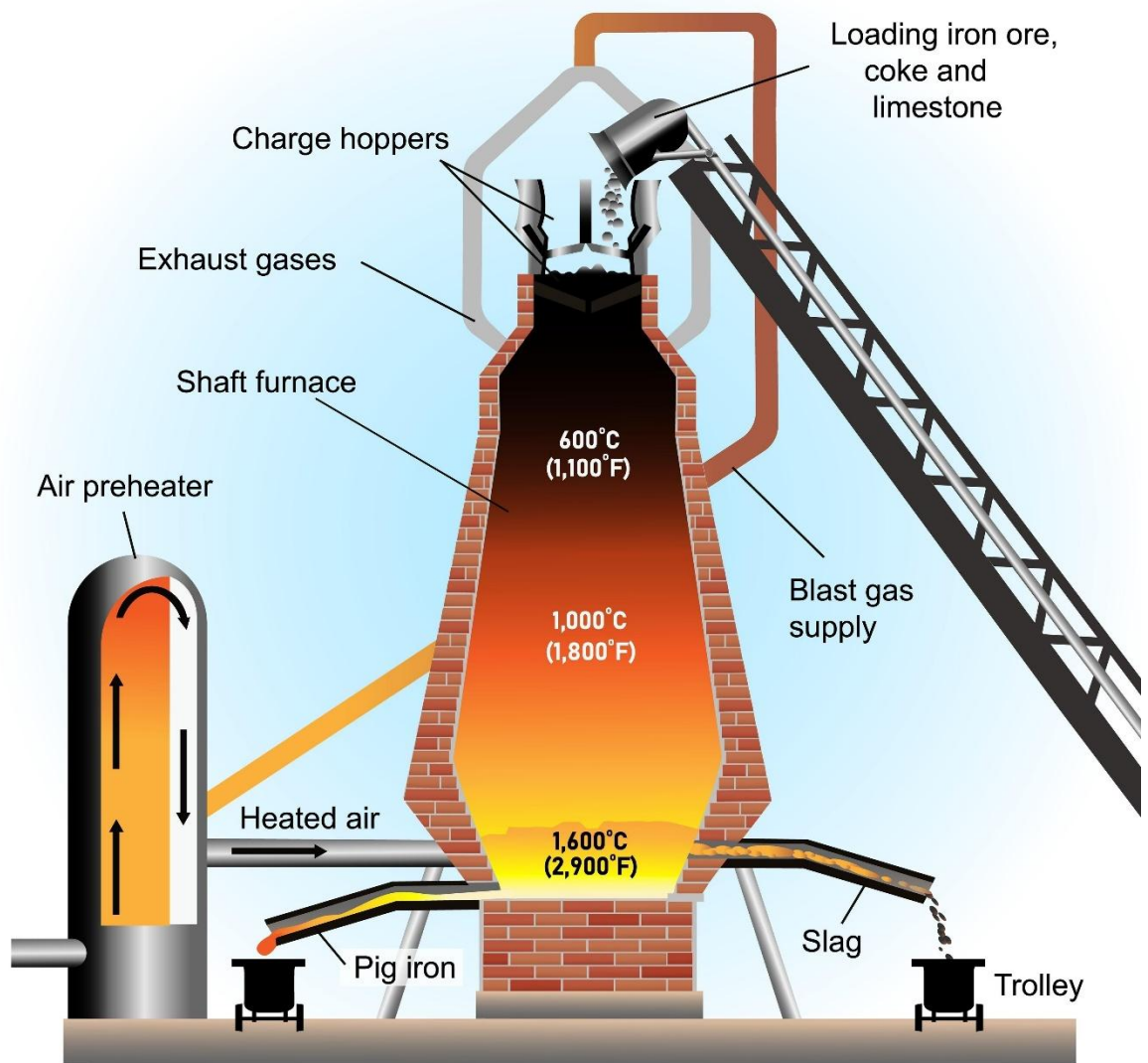
Проте фактичні результати виявилися протилежними очікуванням:

1. **Зниження продуктивності:** Приведена продуктивність печі впала на **374 т/добу** порівняно з базовим періодом.

2. **Зростання витрати палива:** Приведена питома витрата коксу зросла на **23 кг/т** чавуну.

3. **Технологічні обмеження:** Через різке зростання гідравлічного опору фурм малого діаметра повітродувні машини не змогли підтримувати необхідний тиск, що призвело до падіння витрати дуття на 150–200 м³/хв.

Аналіз енергетичних показників за запропонованою методикою виявив справжню причину невдачі. Незважаючи на ріст кінетичної складової, **повна механічна енергія потоку комбінованого дуття ($E_{\text{пм кд}}$)** збільшилася всього на **1,7 %** (через втрати тиску), а найважливіший показник — **повна механічна енергія горнового газу ($E_{\text{пм гг}}$)**, який відповідає за глибину проникнення газу в центр, навіть зменшилася з 4050,0 до 3978,7 кДж/с.



Це призвело до того, що довжина зони горіння не збільшилася, а газовий потік не зміг «пробити» центр печі, змістившись до периферії. Таким чином, навіть високоякісна сировина не змогла компенсувати помилку у виборі параметрів дуття. Цей досвід доводить, що для печей даного типу (об'ємом 2700 м³ в умовах АМКР) зменшення діаметра фурм нижче **165 мм** є недоцільним, оскільки це знижує загальний енергетичний потенціал горнового газу.

Методика визначення раціональної довжини зони горіння

Для розробки надійного алгоритму управління газодинамікою «знизу» було проведено статистичний аналіз результатів 51-го зондування горнів

доменних печей різного об'єму (675–5000 м³). Метою аналізу було встановлення найбільш достовірного критерію, що визначає довжину окислювальної зони (зони циркуляції) перед фурмами.

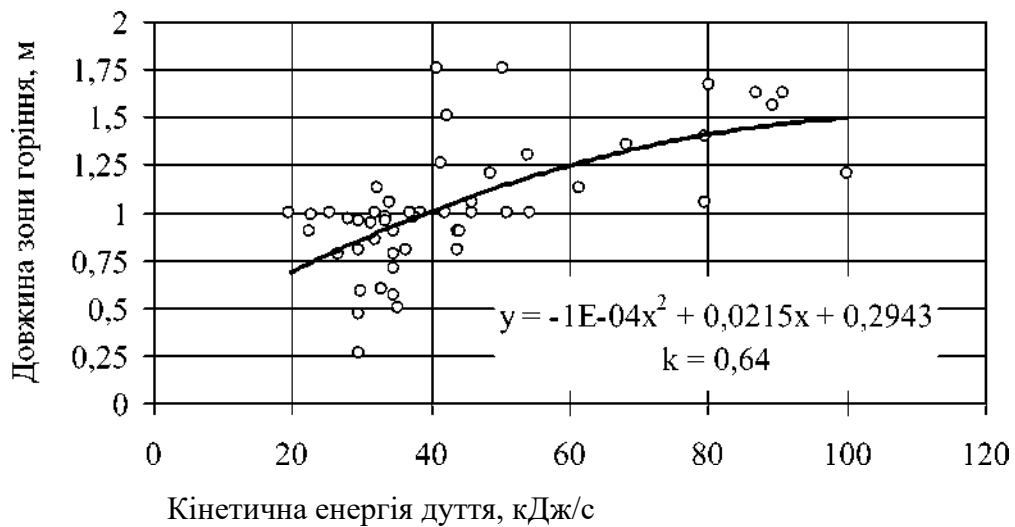


Рис. 6.14. Залежність довжини зони горіння від кінетичної енергії потоку дуття, що витікає з фурми доменної печі

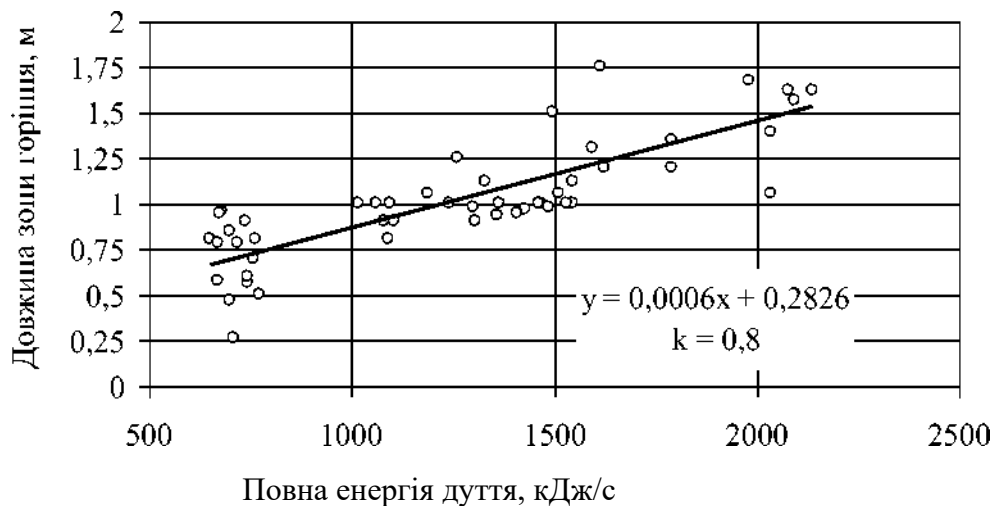


Рис. 6.15. Залежність довжини зони горіння від повної механічної енергії потоку дуття, що витікає з фурми доменної печі

Порівняння тісноти зв'язку між довжиною зони горіння та різними енергетичними параметрами дуття показало такі результати:

1. **Швидкість витоку дуття:** Має найменшу кореляцію з довжиною зони.
2. **Кінетична енергія (E_k):** Коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,64$ (див. Рис. 6.14 джерела). Це свідчить про те, що кінетична енергія описує процес лише частково.

3. **Повна механічна енергія ($E_{\text{пм}}$):** Має найвищий коефіцієнт детермінації $R^2 = 0,75$ (див. Рис. 6.15).

Розрахунки за рівнянням, наведеним на рис. 6.15, показують, що довжина зони горіння на печі об'ємом 5000 м^3 при вдуванні природного газу дорівнювала $1,5 \text{ м}$ ($E_{\text{пм кд}} = 2034,8 \text{ кДж/с}$), а при вдуванні пиловугільного палива зменшилася до $1,2 \text{ м}$ ($E_{\text{пм кд}} = 1555,7 \text{ кДж/с}$).

Це дозволяє стверджувати, що саме **повна механічна енергія** є універсальним параметром для розрахунку необхідного діаметра фурм.

Фізична модель управління газорозподілом

Вибір оптимального значення енергії базується на теорії еліпсоїдів розпушення (Б.С. Фіалков). Зона горіння формує над собою простір, де матеріали рухаються з максимальною швидкістю. Лінії рівних швидкостей утворюють так звані «еліпсоїди розпушення».

- **Оптимальний режим:** Довжина зони горіння має бути такою, щоб еліпсоїди розпушення своїми краями торкалися внутрішніх стін профілю доменної печі (в зоні розпару та низу шахти) з нульовим градієнтом швидкості. Це забезпечує активну роботу периферії без утворення каналів та настилів, а також достатній прохід газів до центру.

- **Недостатня енергія (короткі зони):** Еліпсоїди зміщуються до стін, центр печі стає неактивним («мертвий стовп» або «тотерман» розростається), що веде до периферійного ходу.

- **Надлишкова енергія:** Призводить до надмірного розпушення центру і «заканалювання» осьової зони при неактивній периферії.

Практична рекомендація:

На основі розрахунків для умов роботи доменних печей ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» встановлено критичні значення повної механічної енергії комбінованого дуття ($E_{\text{пм кд}}$), нижче яких опускатися не можна:

- Для печей об'ємом **2000–2700 м^3** : $E_{\text{пм кд}} \geq 1500 \text{ кДж/с}$.
- Для печі об'ємом **5000 м^3** : $E_{\text{пм кд}} \geq 2000 \text{ кДж/с}$.

Забезпечення цих параметрів при переході на високоякісну сировину вимагає збереження діаметра фурм на рівні **165 мм** (для печей середнього об'єму) та **150 мм** (для печі 5000 м³) за умови повної кількості працюючих приладів.

3.2. Вдосконалення режимів завантаження шихти та керування газовим потоком «зверху»

Концепція «осьової віддушини» та технічні рішення для її формування

Вибір раціональних параметрів дуття («знизу») є лише половиною завдання. Для забезпечення високоефективної плавки необхідна узгоджена організація газодинаміки «зверху» — шляхом управління розподілом шихтових матеріалів на колошнику. Як показали дослідження, на сучасних потужних печах, що працюють з високою інтенсивністю, ключовим фактором стабільності є стан центральної (осьової) зони.

Обмеження традиційних методів контролю

Традиційно оптимальність завантаження оцінювали за складом газу (CO/CO₂) по радіусу колошника. Однак аналіз показує, що цей метод має суттєві обмеження. При високих рудних навантаженнях (понад 3,5 т/т коксу) склад газу наближається до рівноважного і перестає чітко відображати реальний розподіл матеріалів. Це створює ризик перевантаження окремих кільцевих зон рудою, що веде до локальних розладів ходу печі¹.

Формування «осьової віддушини»

Для забезпечення достатнього прогріву центру горна, який запобігає утворенню малорухливого «тотерману» (конуса з коксу та застиглого шлаку), одним з найважливішим є формування так званої осьової віддушини. Це центральна зона печі, куди завантажуються переважно кокс з мінімальною кількістю рудних матеріалів.

- **Вимоги:** Рудне навантаження в цій зоні має становити **0–2 т/т** коксу.
- **Функція:** Це створює канал з низьким аеродинамічним опором, через який гази з горна можуть вільно підніматися вгору, забезпечуючи температурний контроль центру.

Технічні рішення для двоконусних завантажувальних пристроїв

Враховуючи конструктивні відмінності агрегатів підприємства, розроблені рішення диференційовані в залежності від конструкції завантажувального пристрою печі.

На доменних печах, обладнаних сучасними безконусними завантажувальними пристроями (БЗП) лоткового типу (як ДП №9), формування віддушини досягається програмним шляхом (заданням кутів нахилу лотка). Однак для печей, обладнаних класичними двоконусними апаратами (більшість печей середнього об'єму), це є проблемою, оскільки вони не можуть прицільно вантажити кокс у центр.

Математичне моделювання розподілу шихти для безконусних завантажувальних пристроїв (БЗП)

Для сучасних доменних печей, обладнаних лотковими завантажувальними пристроями (як ДП №9), просте емпіричне підбирання кутів нахилу лотка є недостатнім через величезну кількість можливих комбінацій режимів. Оптимізація профілю засипу вимагає формалізації процесу через **математичне моделювання**.

Використано математичну модель, яка дозволяє прогнозувати розподіл рудного навантаження по радіусу ще до фактичного завантаження матеріалів у піч. Алгоритм розрахунку базується на наступних принципах :

1. **Вхідні параметри моделі:**
 - Характеристики матеріалів: насипна маса, кути природного укосу (які, як ми з'ясували в Розділі 1, суттєво відрізняються для агломерату, окатків та коксу).

- Параметри завантаження: маса порцій, кутові положення лотка (α), число обертів лотка на кожній станції.
- Геометрія печі: профіль колошника, рівень засипу (відстань від «технологічного нуля»).
- Динаміка: швидкість опускання шихти по радіусу печі (важливо для врахування зміщування шарів).

2. Розрахунок траєкторій:

Модель розраховує траєкторію руху потоку матеріалу після відриву від лотка шляхом вирішення системи диференціальних рівнянь руху тіла, кинутого під кутом до горизонту. Визначається точка зустрічі потоку з поверхнею попереднього шару шихти (координата радіуса).

3. Формування профілю (Ітераційний метод):

Матеріал, що падає, утворює фігуру обертання навколо осі печі. У вертикальному перерізі ця фігура описується як багатокутник, вершина якого лежить на траєкторії падіння, а сторони нахилені під кутом природного укосу матеріалу.

Розрахунок ведеться ітераційно:

- *Крок 1:* За вихідний профіль приймається горизонтальна лінія.
- *Крок 2:* Моделюється падіння першої порції (наприклад, коксу), формується новий профіль.
- *Крок 3:* Моделюється опускання матеріалів (враховується, що біля стін і в центрі швидкість опускання може бути різною).
- *Крок 4:* Моделюється падіння наступної порції (наприклад, агломерату) на вже викривлений профіль.

Цей процес повторюється до стабілізації профілю (зазвичай 2-3 повних цикли завантаження). Кінцевим результатом є епюра розподілу рудного навантаження по кільцевих зонах (див. приклад візуалізації на Рис. 5.8 джерела). Це дозволяє технологу точно запрограмувати «провал» рудного

навантаження в центрі (для формування віддушини) та сформувати «рудний гребінь» у потрібній зоні периферії.

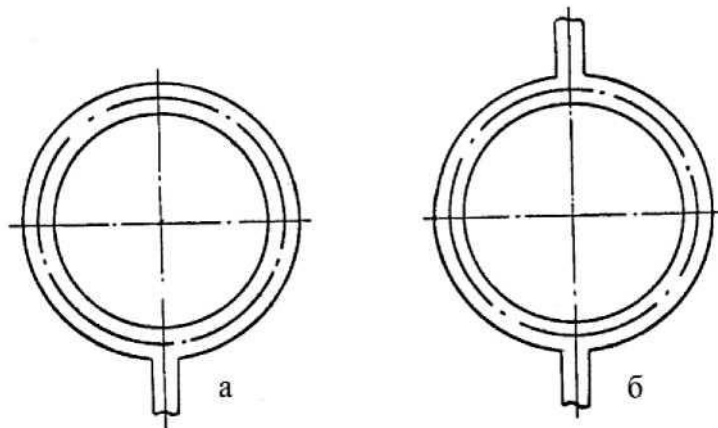


Рис. 5.8. Схеми варіантів підведення газу до кільцевої труби а - одностороннє підведення, б - двостороннє підведення

Розробка конструкції рухомих відбійних плит для регулювання радіального розподілу коксу

Як було зазначено раніше, формування розвиненої осьової зони («коксової віддушини») є критичним для стабільної роботи печі на пиловугільному паливі. Однак для доменних печей, обладнаних класичними двоконусними засипними апаратами (наприклад, з пелюстковим розподільником шихти або калібратором Тарасова), ця задача є технічно складною, оскільки траєкторія падіння матеріалів з великого конуса є фіксованою і спрямована переважно на периферію.

Для вирішення цієї проблеми в роботі запропоновано вдосконалену конструкцію колошника, оснащеного системою **рухомих відбійних решіток (плит)**. Це технічне рішення дозволяє гнучко керувати радіальним розподілом шихти без повної заміни дорогого завантажувального пристрою.

Конструктивні особливості:

Запропонована система складається зі сталевих литих плит, вмонтованих у захисні сегменти колошника. Плити виконані у вигляді решіток

з отворами певного калібру. Головною особливістю є наявність приводу (гідроциліндрів), що дозволяє змінювати кут нахилу плит відносно горизонту.

Принцип роботи системи:

Технологія завантаження з використанням рухомих плит реалізується за таким алгоритмом:

1. Завантаження залізорудної частини (Агломерат/Окатки):

При подачі в піч рудних матеріалів (цикл АА↓) штоки гідроциліндрів втягуються, і відбійні решітки займають вертикальне положення.

- *Результат:* Матеріал сходить з великого конуса, не зустрічаючи перешкод, і лягає у проектну зону — на периферію колошника. Це дозволяє формувати біля стін «рудний гребінь», який захищає холодильники від перегріву та запобігає надмірному розвитку периферійного ходу газів.

2. Завантаження коксу (цикл КК↓):

Перед скиданням коксу гідроциліндри висуваються, встановлюючи відбійні решітки під кутом 38–45° до горизонту.

- *Обґрунтування кута:* Цей кут вибрано таким чином, щоб він був рівним або більшим за критичний кут тертя кусків коксу об матеріал решітки (жароміцну сталь).

- *Результат:* Великі шматки коксу, падаючи з конуса, вдаряються об похилу поверхню решітки. Завдяки кінетичній енергії удару вони відбиваються і змінюють траєкторію, спрямовуючись до **центру печі**. Таким чином формується потужна центральна коксова лінза («віддушина»), необхідна для проходу газів.

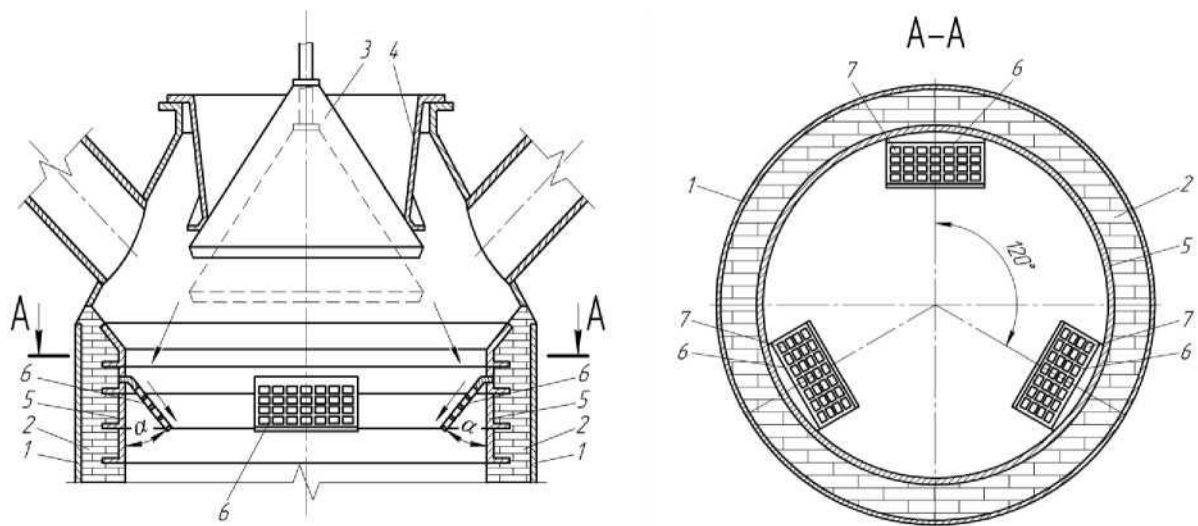


Рис. 5.10. Загальний вид колошника з засипним апаратом доменної печі

Доменна піч включає сталевий герметичний кожух 1, що складається з ряду циліндричних і конічних поясів, змонтовані на внутрішній поверхні кожуха холодильники (на рис. 5.10 наведена верхня не охолоджувана зона доменної печі); вогнетривку футеровку 2; встановлений на колошнику печі двохконусний засипний апарат з ПРШ або КТ (на рис. 5.10 показані тільки великий конус 3 і його чаша 4). Для забезпечення центрального розподілу газового потоку в печі необхідно забезпечити завантаження в центр колошника печі крупних кусків коксу (+60 мм), внутрішня частина колошника печі виконана зі сталевих литих плит 5, які оснащені відбійними решітками 6, установленими під кутом $\geq 38-45$ градусів до горизонту, рівним або більшим ніж критичний кут тертя коксу об матеріал (жароміцну і зносостійку сталь) відбійної решітки 6 з отворами 7. Отвори 7 відбійної решітки 6 виконані більшими, ніж найбільший кусок агломерату, але меншими ніж крупні куски коксу. Це необхідно для того, щоб агломерат завантажувався на периферію печі, не посилюючи периферійний газовий потік.

Ефект сегрегації (просіювання):

Важливим нюансом конструкції є наявність отворів у решітках. Розмір отворів підбирається так, щоб бути більшим за розмір шматків дрібного агломерату, але меншим за кондиційний кокс. Це забезпечує додатковий технологічний ефект:

- Якщо в порції коксу є дріб'язок, він просипається крізь отвори решітки і падає на периферію (де він не зашкодить газопроникності центру).
- Великий кондиційний кокс (+60 мм) не проходить в отвори, відбивається і потрапляє в центр.

Це дозволяє автоматично покращувати гранулометричний склад матеріалу саме в осьовій зоні, що є важливим для стабільності плавки при вдуванні ПВП.

Узагальнення методів управління та висновки

Інтеграція математичного моделювання та вдосконалених конструктивних елементів колошника дозволяє реалізувати стратегію активного управління розподілом шихти. На відміну від пасивного підходу, коли програма завантаження залишається незмінною протягом тривалого часу, запропонована методика передбачає динамічне коригування параметрів у відповідь на зміни якості сировини.

Ключові принципи управління «зверху»:

1. Пріоритет центральної зони:

В умовах використання високоякісної сировини та інтенсифікації плавки (особливо з ПВП) головним завданням завантаження є забезпечення стабільної газопроникності осьової зони. Розрахункове рудне навантаження в центральному кільці колошника повинно підтримуватися на рівні 0–2 т/т коксу. Це гарантує наявність «коксової віддушини», через яку надлишкові гази можуть виходити, не порушуючи рівність сходу шихти біля стін.

2. Диференційований підхід до завантажувальних пристроїв:

Для печей великого об'єму (ДП №9, 5000 м³): Оскільки піч обладнана безконусним завантажувальним пристроєм (БЗП) лоткового типу, формування «осьової віддушини» реалізується виключно **програмним шляхом** — через зміну кутів нахилу лотка згідно з розробленим математичним алгоритмом (див. п. 3.2.1).

Для печей середнього об'єму (ДП №6, №8): Ці агрегати обладнані класичними конусними апаратами, які не дозволяють прицільно вантажити кокс у центр. Саме для таких печей пропонується **конструктивне рішення** — встановлення рухомих відбійних решіток на колошнику, які механічно перенаправляють потік коксу до осі печі.

Критерій ефективності:

Ефективність обраного режиму завантаження оцінюється не лише за складом колошникового газу (який може бути неінформативним при високих навантаженнях), а за комплексом параметрів: перепад тиску «гаряче дуття — колошник», температура периферійних газів та стабільність опускання шихти.

3.3. Розробка системи динамічного управління газодинамічним режимом печі на основі енергетичних критеріїв.

Розробка алгоритму управління доменною плавкою в умовах змінної якості сировини базується на необхідності синхронізації двох зустрічних потоків: опускання стовпа шихтових матеріалів («зверху») та підйому горнових газів («знизу»). Як було доведено в попередніх розділах, традиційні методи контролю (за складом газу або перепадом тиску) є інерційними і не завжди відображають реальний стан нижньої зони печі, особливо при використанні пиловугільного палива.

Тому в основу розроблюваного алгоритму покладено енергетичний підхід. Ключовим параметром, що пов'язує якість сировини з режимом дуття, обрано повну механічну енергію горнового газу ($E_{\text{пм гг}}$). Цей параметр інтегрує в собі вплив кількості дуття, його температури, тиску, складу (збагачення киснем, ПВП) та об'єму газів, що утворюються.

Для реалізації алгоритму в АСУ ТП доменної печі необхідно в режимі реального часу розраховувати енергетичні показники за формулами, адаптованими до умов вдування ПВП та природного газу:

1. Повна механічна енергія комбінованого дуття ($E_{\text{пм кд}}$) — характеризує кінетичні та потенційні можливості струменя формувати зону горіння необхідної довжини:

$$E_{\text{пм кд}} = \frac{\rho_{\text{см}} \cdot Q_{\text{см}}^3 \cdot T_{\text{см}}}{2 \cdot n^2 \cdot S_{\text{ф}}^2 \cdot P_{\text{д}}} \cdot \frac{\rho_{\text{см}} \cdot Q_{\text{см}} \cdot T_{\text{см}}}{T_{\text{д}}} \cdot \frac{P_{\text{д}}}{\rho_{\text{д}}}$$

де $Q_{\text{см}}$, $T_{\text{см}}$, $\rho_{\text{см}}$ — відповідно витрата, температура та густина газоповітряної суміші; n — кількість фурм; $S_{\text{ф}}$ — площа перерізу фурми; $P_{\text{д}}$ — тиск дуття.

2. Повна механічна енергія горнового газу ($E_{\text{пм гг}}$) — визначає здатність газу долати опір стовпа шихти і проникати в центр горна:

$$E_{\text{пм гг}} = 371,2 \cdot \frac{Q_{\text{гг}} \cdot T_{\text{м}}}{n} + 68877,6 \cdot \frac{\rho_{\text{см}} \cdot Q_{\text{см}}^3 \cdot T_{\text{см}}^2}{n^3 \cdot S_{\text{ф}}^2 \cdot P_{\text{д}}^2}$$

де $Q_{\text{гг}}$ — вихід горнового газу; $T_{\text{м}}$ — теоретична температура горіння.

Фізичний зміст алгоритму:

Зміна якості сировини (наприклад, підвищення міцності коксу або покращення гранулометрії агломерату) змінює газопроникність стовпа шихти. Це призводить до зміни тиску дуття ($P_{\text{д}}$) і можливості печі приймати дуття ($Q_{\text{см}}$). Відповідно, змінюються значення енергій $E_{\text{пм кд}}$ та $E_{\text{пм гг}}$.

- Якщо енергія горнового газу **падає**, потік газу не доходить до центру, температура осьової зони знижується, виникає ризик утворення «тотерману» (малорухливого конуса в центрі горна).

- Якщо енергія **надмірно зростає**, виникає каналний хід по центру, що знижує ступінь використання газу і збільшує витрату коксу.

Завдання алгоритму — компенсувати ці відхилення шляхом зміни параметрів завантаження (радіуса подачі коксу) у відповідь на зміну енергетичного стану горна.

Логіка регулювання: Взаємозв'язок енергії горнового газу та радіуса «віддушини»

Ключовим елементом розробленого алгоритму є встановлення функціонального зв'язку між енергетичним потенціалом газового потоку, що формується у фурмених вогнищах («знизу»), та аеродинамічним опором стовпа шихти в центральній зоні, який формується системою завантаження («зверху»).

Як показник стану «низу» використовується розрахована повна механічна енергія горнового газу ($E_{\text{пм гт}}$). Як інструмент впливу «зверху» використовується радіус осьової «віддушини» ($R_{\text{від}}$) — радіус центральної зони колошника, в яку завантажуються переважно кокс (або кокс із незначною добавкою рудних матеріалів), що створює канал з високою газопроникністю.

Логіка управління базується на наступних фізичних принципах:

1. Підвищення енергії горнового газу ($E_{\text{пм гт}} \uparrow$).

Якщо внаслідок покращення якості коксу (зростання міцності M_{25} , CSR) або оптимізації дуттьових параметрів (підвищення тиску, витрати) розрахункова енергія $E_{\text{пм гт}}$ зростає, це означає, що газовий потік набуває більшої здатності долати опір шихти і проникати вглиб горна.

Якщо надмірна енергія при відкритому центрі призведе до канального ходу газів, зниження ступеня використання хімічної енергії (CO) і зростання температури колошникового газу.

Необхідно зменшити радіус осьової «віддушини» ($R_{\text{від}} \downarrow$). Тобто, звузити центральну коксову лінзу і «притиснути» центр рудним навантаженням. Це дозволить ефективніше використати надлишкову енергію газів для відновлення руди, підвищити вміст CO_2 у газі та знизити витрату коксу без загрози розладу ходу печі.

2. Зниження енергії горнового газу ($E_{\text{пм гт}} \downarrow$).

Коли кість сировини погіршується (зростає вміст дріб'язку, падає міцність коксу) або знижуються параметри дуття (витрата, тиск), енергія $E_{\text{пм гт}}$ падає. Газовий потік втрачає здатність досягати осі печі і зміщується до периферії.

Якщо центральна зона горна перестає оброблятися гарячими газами, температура в ній падає. Це створює умови для формування «тотерману» — малорухливого конуса з коксу та в'язкого шлаку, що призводить до втрати дренажної здатності горна і аварійних ситуацій.

Необхідно негайно збільшити радіус осьової «віддушини» ($R_{\text{від}} \uparrow$). Розширення зони, вільної від руди, знижує аеродинамічний опір центру, полегшуючи доступ навіть ослабленому газовому потоку до осі печі. Це дозволяє підтримати температуру в центрі горна на безпечному рівні.

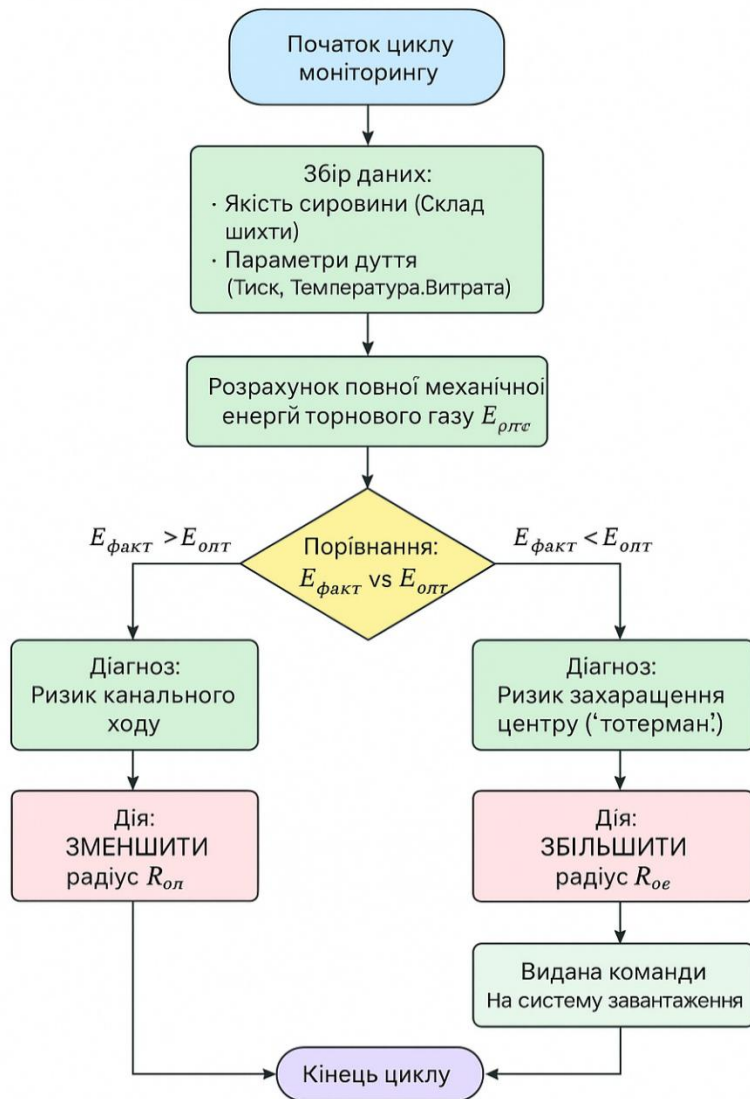
Кількісна закономірність регулювання:

На основі обробки масиву даних промислових випробувань на доменній печі №9 (5000 м³) було виведено емпіричний коефіцієнт корекції, який рекомендується використовувати в алгоритмах АСУ ТП:

Зміна повної механічної енергії горнового газу на кожні 100 кДж/с вимагає коригування радіуса осьової «віддушини» у зворотному напрямку в середньому на 0,06 м.

Ця залежність є універсальною для печей даного типу і дозволяє технологу або автоматичній системі проактивно реагувати на зміни умов плавки, не чекаючи погіршення хімічного складу чавуну або розладу ходу печі.

Алгоритм узгодженого управління газодинамічним режимом ДП



Практична реалізація алгоритму на доменній печі великого об'єму (ДП №9)

Ефективність запропонованого алгоритму узгодженого управління була перевірена в ході промислових досліджень на доменній печі №9 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг». Дослідження охоплювали три періоди з різними якісними характеристиками агломерату, що дозволило перевірити реакцію системи на зміни газопроникності шихти.

Основні техніко-економічні показники роботи печі та параметри регулювання наведені в Таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. Показники роботи доменної печі корисним об'ємом 5000 м³ при реалізації алгоритму узгодженого управління

Показники	Період 1 (Базовий)	Період 2 (Покращення сировини)	Період 3 (Погіршення сировини)
Продуктивність, т/добу	9826	9922	9784
Витрата коксу, кг/т	426,8	423,9	428,4
Радіус осьової «віддушини», м	2,0	1,8	2,3
Вміст дріб'язку (-5 мм) в агломераті, %	8,05	7,50	9,89
Витрата дуття, м ³ /хв	7812	8400	7540
Повна енергія горнового газу ($E_{\text{пм гг}}$), кДж/с	5113,7	5657,9	4871,8

Аналіз роботи алгоритму по періодах:

1. Період 1 (Визначення оптимуму):

Розрахунковим шляхом було встановлено, що для стабільних умов (вміст дріб'язку ~8,05 %) оптимальне значення повної механічної енергії горнового газу становить 5113,7 кДж/с. Цьому енергетичному рівню відповідав радіус осьової «віддушини» 2,0 м, який забезпечував стабільний схід шихти та високу продуктивність (9826 т/добу).

2. Період 2 (Реакція на покращення якості):

Внаслідок покращення якості агломерату (зниження вмісту дріб'язку до 7,50 %) газопроникність стовпа шихти зросла. Це дозволило форсувати режим: витрату дуття збільшили до 8400 м³/хв. В результаті повна енергія горнового газу різко зросла до 5657,9 кДж/с.

- *Дія алгоритму:* Зростання енергії створило ризик надмірного розвитку осьового ходу газів (канального ходу). Для компенсації цього явища, згідно з алгоритмом, радіус осьової «віддушини» було **зменшено до 1,8 м**.

- *Результат:* Це дозволило ефективніше використати енергію газів, знизити витрату коксу до **423,9 кг/т** і досягти максимальної продуктивності (9922 т/добу).

3. Період 3 (Реакція на погіршення якості):

У цьому періоді якість агломерату погіршилася (вміст дріб'язку зріс до 9,89 %), що призвело до зростання аеродинамічного опору. Витрата дуття впала до 7540 м³/хв, а повна енергія горнового газу знизилася до критичного рівня 4871,8 кДж/с.

- *Дія алгоритму:* Низька енергія потоку загрожувала втратою активності центру і утворенням «тотерману». Для порятунку ситуації радіус осьової «віддушини» було **збільшено до 2,3 м**.

- *Результат:* Розширення зони зі зниженим рудним навантаженням дозволило ослабленому газовому потоку досягти центру купола. Завдяки цьому вдалося утримати продуктивність на високому рівні (9784 т/добу) і уникнути розладу ходу печі, незважаючи на погіршення сировини.

Цей експеримент підтвердив, що динамічне коригування радіуса завантаження коксу в залежності від розрахункової енергії газів дозволяє стабілізувати тепловий стан печі в умовах коливання якості шихти.

Особливості роботи алгоритму в умовах вдування ПВП та роль якості коксу

Особливої актуальності розроблений алгоритм набуває при впровадженні технології вдування пиловугільного палива (ПВП). Як показав аналіз траєкторій руху газів, заміна природного газу на вугільний пил суттєво змінює аеродинаміку горна.

1. Механізм стабілізації при ПВП:

При переході на ПВП, навіть за умови збереження загальної інтенсивності плавки, спостерігається тенденція до скорочення довжини окислювальних зон (зон горіння) перед фурмами. Це призводить до зниження повної механічної енергії горнового газу і, як наслідок, до перерозподілу газового потоку до стінок печі (розвиток периферійного ходу).

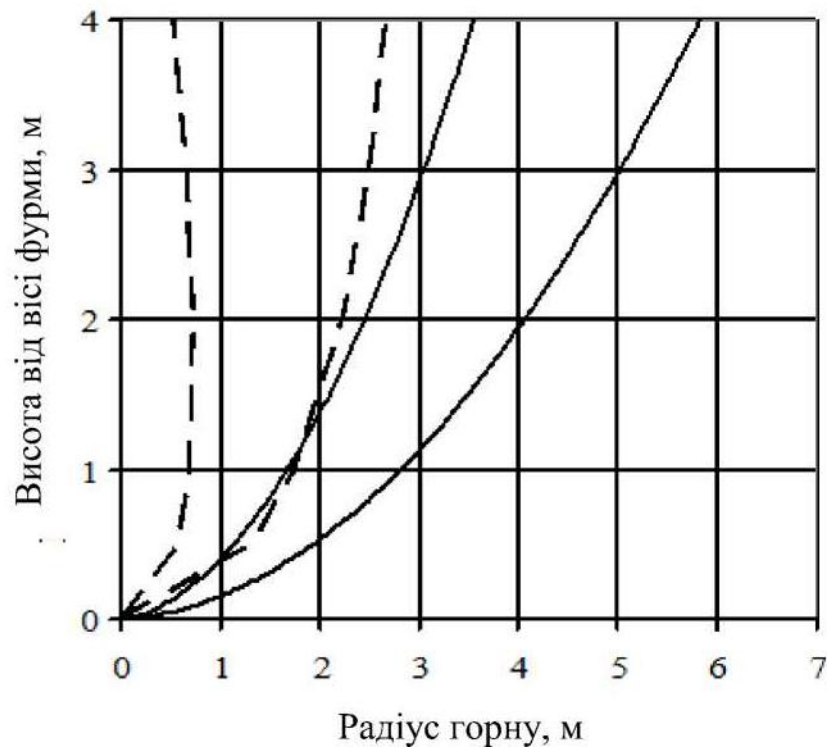


Рис. . Траєкторії потоку дуття-газу в доменній печі

- **Проблема:** Зменшення енергії потоку означає, що газу важче «пробити» стовп шихти до центру. Центр охолоджується, погіршується дренаж рідких продуктів плавки.
- **Робота алгоритму:** Система фіксує зниження розрахункового показника $E_{\text{пм гт}}$. Алгоритм формує команду на збільшення радіуса «осьової віддушини».
- **Ефект:** Розширення центральної зони, завантаженої крупним коксом, штучно знижує газодинамічний опір центру. Це створює ефект «тяги», примусово зтягуючи ослаблений газовий потік від стінок до осі печі. Таким чином відновлюється нормальний розподіл температур по радіусу, незважаючи на специфіку горіння ПВП.

2. Обмеження алгоритму: Фактор міцності коксу

Важливо розуміти, що будь-який алгоритм керування розподілом шихти є ефективним лише за умови збереження фізичної цілісності коксової насадки. Кокс у центрі печі (в зоні «віддушини») виконує роль дренажного каналу.

- **Вимога:** Для ефективної роботи алгоритму кокс повинен мати високу гарячу міцність (CSR 55–60%) і низьку стиранність ($M_{10} < 7 \%$).
- **Ризик низької якості:** Якщо в піч завантажується кокс низької якості (наприклад, $CSR < 40\%$), він руйнується під дією ваги стовпа шихти і лужних сполук ще до приходу в горн. У цьому випадку в центрі печі замість проникного стовпа великих шматків утворюється щільна маса дріб'язку і пилу («сміттєвий тотерман»).
- **Блокування алгоритму:** У такій ситуації збільшення радіуса «віддушини» (команда алгоритму) не дасть результату, оскільки дрібний кокс не пропускати газ, навіть якщо туди не вантажити руду. Тому алгоритм містить **блок обмежень**: коригування радіуса завантаження є доцільним лише тоді, коли показники міцності коксу знаходяться в межах технологічної норми. При різкому падінні якості коксу пріоритетом стає не регулювання завантаження, а зниження інтенсивності дуття та промивка горна.

3. Компенсація коливань якості:

Математичне моделювання показало, що алгоритм дозволяє компенсувати коливання якості коксу в певних межах. Наприклад, зниження міцності M_{25} на 1–2 % можна нівелювати зміною програми завантаження, утримуючи стабільний перепад тиску. Однак, як було встановлено в Розділі 2, зниження коефіцієнта варіації якості коксу на 1 % саме по собі дає економію 5,33 кг/т палива, що підтверджує: алгоритм управління є інструментом тонкого налаштування, а фундаментом ефективності залишається стабільність сировини.

Алгоритм взаємодії «Верх–Низ»

Забезпечення високої ефективності доменної плавки при змінній якості сировини неможливе без узгодження параметрів завантаження («верх») та дуття («низ»). Ключовим параметром узгодження є повна механічна енергія горнового газу ($E_{\text{пм гг}}$), яка визначає глибину проникнення газового потоку до центру печі, та радіус осьової «віддушини» (зони зі зниженим рудним навантаженням).

Розроблений алгоритм управління базується на принципі динамічної рівноваги і передбачає наступні кроки:

1. **Визначення базового стану:** Для конкретних умов (якість коксу, агломерат, продуктивність) визначаються оптимальні значення $E_{\text{пм гг}}$ та радіуса віддушини, при яких піч працює стабільно з мінімальною витратою коксу.

2. **Моніторинг змін:** При зміні якості сировини (наприклад, покращення гранулометрії агломерату або зміна міцності коксу) відбувається зміна газопроникності, що впливає на витрату дуття та тиск, а отже — на енергію горнового газу.

3. **Коригуюча дія:**

- Якщо внаслідок зміни умов **повна енергія горнового газу зростає** (газ активніше йде в центр), необхідно **зменшити радіус осьової віддушини**. Це дозволить «притиснути» центр рудним навантаженням, підвищити ступінь використання газу (CO_2) і знизити витрату коксу, не порушуючи хід печі.
- Якщо **повна енергія горнового газу падає** (центр стає неактивним, загроза захаращення), необхідно негайно **збільшити радіус осьової віддушини**. Це полегшить прохід газів і відновить нагрів осьової зони.

3.4 Результати розробки технологічних рішень щодо підвищення ефективності доменного виробництва

На основі промислових досліджень встановлено емпіричне правило регулювання: зміна величини повної механічної енергії горнового газу на 100

кДж/с вимагає коригування радіуса осьової «віддушини» у відповідному напрямку в середньому на 0,06 м.

Застосування цього алгоритму на ДП №9 дозволило в умовах нестабільної сировини утримувати продуктивність на рівні 9784–9922 т/добу.

1. Оптимізація дуттьового режиму («Знизу»):

Доведено, що традиційний підхід до вибору параметрів дуття, який базується виключно на підтримці заданої кінетичної енергії струменя, є недостатнім і часто помилковим в сучасних умовах. Головним критерієм ефективності роботи фурмених вогнищ визначено повну механічну енергію потоку комбінованого дуття ($E_{\text{пм кд}}$) та горнового газу ($E_{\text{пм гг}}$). Встановлено критичні значення енергії, нижче яких порушується газодинаміка центру печі: для печей об'ємом 2000–2700 м³ — не менше 1500 кДж/с, для печі 5000 м³ — не менше 2000 кДж/с.

2. Вибір діаметра повітряних фурм:

На основі аналізу негативного досвіду експлуатації печі №8 встановлено недоцільність зменшення діаметра повітряних фурм до 140 мм. Таке зменшення, хоча і призводить до зростання кінетичної енергії на 64,8 %, фактично знижує повну механічну енергію горнового газу через значні втрати тиску, що погіршує прохідність газів до центру. Рекомендовано підтримувати діаметр фурм на рівні не менше 165 мм для печей середнього об'єму та 150 мм для печей великого об'єму при збереженні повної кількості працюючих приладів (40–42 шт.).

3. Вдосконалення системи завантаження («Зверху»):

Для забезпечення стабільної роботи печі на інтенсивних режимах з використанням ПВП обґрунтовано необхідність формування «осьової віддушини» — центральної зони колошника з мінімальним рудним навантаженням (0–2 т/т коксу). Для доменних печей, обладнаних класичними двоконусними засипними апаратами, розроблено вдосконалену конструкцію

колошника з рухомими відбійними решітками. Встановлення решіток під кутом $38\text{--}45^\circ$ при завантаженні коксу дозволяє примусово направляти великі шматки палива в центр печі, формуючи газопроникну коксову лінзу, що раніше було можливо лише на лоткових апаратах.

4. Алгоритм узгодженого управління:

Розроблено та апробовано алгоритм синхронізації параметрів «верх» (завантаження) і «низ» (дугтя). Встановлено кількісну закономірність: зміна повної механічної енергії горнового газу на 100 кДж/с вимагає коригування радіуса осьової «віддушини» у зворотному напрямку в середньому на $0,06\text{ м}$. Впровадження цього алгоритму дозволяє оперативно адаптувати газодинамічний режим печі до коливань якості сировини, запобігаючи як канальному ходу, так і захаращенню горна.

4. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

4.1. Мета та вихідні дані для економічного розрахунку

Метою даного розділу є визначення економічної доцільності впровадження комплексу технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності доменного виробництва. Проектні рішення включають перехід на використання офлюсованих локальних спеків, оптимізацію газодинамічного режиму та модернізацію системи завантаження (встановлення рухомих відбійних плит) на доменній печі №9 корисним об'ємом 5000 м³.

Економічний ефект досягається за рахунок:

1. Зниження питомої витрати дороговартісного коксу.
2. Збільшення продуктивності печі (економія на умовно-постійних витратах).
3. Оптимізації складу шихти (виведення сирого вапняку).

Для розрахунку прийнято порівняння техніко-економічних показників (ТЕП) у базовому та проектному періодах. Вихідні дані для розрахунку, отримані в ході досліджень (Розділ 2 та 3), наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні вихідні параметри роботи ДП №9

Показник	Од. вим.	Базовий період	Проектний період	Зміна (+/-)
1. Річний обсяг виробництва чавуну	тис. т	3304,0	3660,1	+356,1
2. Коефіцієнт використання корисного об'єму (КВКО)	м³/т·добу	0,552	0,498	-0,054
3. Питома витрата коксу	кг/т	408,2	357,2	-51,0
4. Питома витрата ПВП	кг/т	92,0	92,0	0
5. Питома витрата природного газу	м³/т	7,4	7,4	0

4.2. Розрахунок річних витрат на сировину та основні матеріали

Витрати на сировину є основною статтею собівартості чавуну. У проектному варіанті відбувається заміна традиційної шихти (агломерат + окатки) на офлюсовані локальні спеки, що дозволяє вивести з шихти сирий вапняк та знизити витрату коксу.

Розрахунок витрат на сировину та матеріали на 1 тону чавуну та на річний випуск наведено в таблиці 4.2. Ціни на матеріали прийняті на рівні діючих ринкових цін.

Таблиця 4.2 – Розрахунок витрат на сировину, основні матеріали та паливо

Найменування ресурсу	Ціна, грн/т (без ПДВ)	Базовий період Норма, кг/т	Сума, грн/т	Проектний період Норма, кг/т	Сума, грн/т
1. Залізородна сировина:					
Агломерат офлюсований	3 200	1290,0	4128,00	—	—
Окатки залізородні	3 850	310,6	1195,81	—	—
Локальні спеки (офлюсовані)	3 450	—	—	1620,0	5589,00
Скрап металевий	8 500	11,3	96,05	11,3	96,05
Шлак збагачений	150	45,3	6,80	—	—
2. Флюси:					
Вапняк	450	45,3	20,39	—	—
3. Паливо:					
Кокс доменний (сухий)	12 500	408,2	5102,50	357,2	4465,00
Коксовий горішок	4 200	10,1	42,42	10,1	42,42
ПВП (вугільний пил)	4 800	92,0	441,60	92,0	441,60

Найменування ресурсу	Ціна, грн/т (без ПДВ)	Базовий період Норма, кг/т	Сума, грн/т	Проектний період Норма, кг/т	Сума, грн/т
РАЗОМ матеріальні витрати ($C_{\text{мат}}$)			11 033,57		10 634,07

Аналіз таблиці 4.2:

Як видно з розрахунку, впровадження локальних спеків дещо здорожчує залізорудну частину шихти (5589 грн проти 5323 грн у базі), оскільки локальні спеки є більш високоякісним та дорогим продуктом. Проте, це перекривається значною економією на коксі.

- Витрати на кокс у базовому варіанті: 5 102,50 грн/т.
- Витрати на кокс у проектному варіанті: 4 465,00 грн/т.
- Економія на коксі: 637,50 грн/т.

Крім того, економія досягається за рахунок виведення з шихти вапняку та збагаченого шлаку.

Загальна економія матеріальних витрат на 1 т чавуну становить:

$$\Delta C_{\text{мат}} = 11033,57 - 10634,07 = 399,50 \text{ грн/т}$$

4.3. Розрахунок витрат на енергетичні ресурси

Доменне виробництво є енергоємним. Окрім палива (коксу, ПВП), піч споживає значну кількість електроенергії (для роботи скіпових підйомників, систем аспірації, насосів, нової гідравлічної системи плит), технічної води (для охолодження) та кисню для збагачення дуття.

Розрахунок річних витрат на енергоресурси ($C_{\text{ен}}$) виконується на основі питомих норм споживання на 1 тонну чавуну та планового обсягу виробництва (3 660,1 тис. т).

Таблиця 4.3 – Розрахунок річних витрат на енергетичні ресурси (Проектний варіант)

№ з/п	Найменування енергоресурсу	Од. вим.	Ціна за од., грн	Питома норма витрати (на 1 т)	Річна потреба (тис. од.)	Вартість, тис. грн
1.	Електроенергія (виробнича)	кВт·год	5,20	38,0	139 083,8	723 235,8
2.	Технічна вода (оборотний цикл)	м³	8,50	25,0	91 502,5	777 771,3
3.	Кисень технологічний	м³	4,50	110,0	402 611,0	1 811 749,5
4.	Природний газ (як добавка)	м³	15,00	7,4	27 084,7	406 270,5
5.	Стиснене повітря (КВПіА)	м³	1,20	15,0	54 901,5	65 881,8
Всього витрат на енергію					3 784 908,9	

Питомі витрати енергії на 1 т чавуну:

$$C_{\text{ен.пит}} = \frac{3\,784\,908\,900}{3\,660\,100} = 1034,1 \text{ грн/т}$$

4.4. Розрахунок фонду оплати праці та відрахувань на соціальні заходи

Впровадження нових технологій (рухомі плити, алгоритм управління) не потребує збільшення чисельності персоналу, проте вимагає підвищення кваліфікації операторів. Розрахунок фонду оплати праці (ФОП) виконується для технологічного персоналу, що безпосередньо обслуговує ДП №9. Режим роботи – безперервний (4 зміни).

Таблиця 4.4 – Штатний розпис та розрахунок річного фонду оплати праці

Категорія персоналу	Кількість штатних одиниць (4 зміни)	Місячний оклад, грн	Річний фонд осн. з/п, грн	Доплати та премії (40%), грн	Річний ФОП разом, грн
Начальник дільниці печі	1	45 000	540 000	216 000	756 000
Майстер зміни (технолог)	4	35 000	1 680 000	672 000	2 352 000
Газівник доменної печі	8	28 000	2 688 000	1 075 200	3 763 200
Горновий доменної печі	16	32 000	6 144 000	2 457 600	8 601 600
Машиніст шихтоподачі	8	22 000	2 112 000	844 800	2 956 800
Слюсар-ремонтник (гідравліка)	4	25 000	1 200 000	480 000	1 680 000
Електромонтер	4	25 000	1 200 000	480 000	1 680 000
Оператор ПУ (АСУ ТП)	4	26 000	1 248 000	499 200	1 747 200
РАЗОМ	49		16 812 000	6 724 800	23 536 800

Розрахунок відрахувань на соціальні заходи (ЄСВ):

Згідно з чинним законодавством, ставка Єдиного соціального внеску становить 22%.

$$C_{\text{ЄСВ}} = \text{ФОП} \times 0,22$$

$$C_{\{\text{ЄСВ}\}} = 23\,536\,800 \times 0,22 = 5\,178\,096 \text{ грн/рік}$$

Питомі витрати на оплату праці (на 1 т чавуну):

Оскільки річний обсяг виробництва зріс, питома вага зарплати в собівартості зменшується (ефект масштабу).

$$C_{\text{зп.пит}} = \frac{23\,536\,800 + 5\,178\,096}{3\,660\,100} = \frac{28\,714\,896}{3\,660\,100} = 7,85 \text{ грн/т}$$

Низька питома вага зарплати (менше 1%) є характерною для високопродуктивних доменних печей великого об'єму.

4.5. Розрахунок амортизаційних відрахувань та витрат на утримання обладнання

Для реалізації проектних рішень (встановлення рухомих відбійних плит, монтаж гідроприводу та системи автоматизації) необхідні капітальні інвестиції. Ці витрати переносяться на собівартість продукції через амортизацію.

1. Визначення суми капітальних інвестицій ($K_{\text{кап}}$):

Вартість модернізації розрахована на основі ринкових цін на обладнання та будівельно-монтажні роботи.

- Виготовлення та монтаж плит колошника (металоконструкції, литво): 58,0 млн грн.
- Гідравлічна система та маслостанція: 24,5 млн грн.
- Система автоматизації (КВПіА, контролери, ПЗ): 8,2 млн грн.
- Проектні та пусконаладжувальні роботи: 14,0 млн грн.
- Разом капітальні вкладення ($K_{\text{кап}}$): 104,7 млн грн.

2. Розрахунок амортизації:

Приймаємо прямолінійний метод нарахування амортизації. Термін корисного використання обладнання — 10 років (3-тя група основних засобів, річна норма 10%).

Річна сума амортизації нових фондів ($A_{\text{нов}}$):

$$A_{\text{нов}} = K_{\text{кап}} \times 0,10 = 104,7 \times 0,1 = 10,47 \text{ млн грн/рік}$$

3. Витрати на поточні ремонти та утримання:

Приймаються у розмірі 5% від вартості нового обладнання:

$$C_{\text{рем}} = 104,7 \times 0,05 = 5,235 \text{ млн грн/рік}$$

4.6. Калькуляція виробничої собівартості чавуну

На основі розрахованих у попередніх пунктах витрат (на сировину, енергію, зарплату, амортизацію) складаємо планову калькуляцію собівартості 1 тонни чавуну для Базового та Проектного варіантів.

Зверніть увагу: Умовно-постійні витрати (цехові витрати, загальнозаводські витрати, стара амортизація) у сумі по цеху не змінюються, але їх питома вага на 1 т зменшується за рахунок росту обсягу виробництва на 10,8%.

Таблиця 4.5 – Калькуляція собівартості 1 тонни чавуну

№ з/п	Статті витрат	Базовий період (3304 тис. т)	Проектний період (3660,1 тис. т)	Економія (+), Перевитрата (-)
		грн/т	грн/т	грн/т
1.	Сировина та основні матеріали (ЗРС, флюси)	5489,47	5727,47	-238,00
2.	Паливо технологічне (Кокс, ПВП)	5544,10	4906,60	+637,50
3.	Разом матеріальні витрати (п. 4.2)	11 033,57	10 634,07	+399,50
4.	Енергетичні витрати (п. 4.3)	1045,00	1034,10	+10,90
5.	Основна та додаткова зарплата (п. 4.4)	7,12	6,43	+0,69
6.	Відрахування на соціальні заходи (ЄСВ 22%)	1,57	1,42	+0,15
7.	Амортизація основних засобів*	50,00	48,00	+2,00
8.	Витрати на утримання та ремонт обладнання	120,00	109,76	+10,24
9.	Загальновиробничі (цехові) витрати**	180,00	162,49	+17,51
10.	Виробнича собівартість	12 437,26	11 996,27	+440,99

У проектному варіанті сума амортизації зростає на 10,47 млн грн (за нове обладнання), але розподіляється на більший обсяг продукції, що разом із ефектом масштабу дає зниження питомої величини.

Загальновиробничі витрати в сумі є постійними, тому їх питома вага знижується пропорційно росту продуктивності (на 10,8%).

Аналіз собівартості: Впровадження запропонованих заходів дозволяє знизити виробничу собівартість 1 тонни чавуну на 440,99 грн. Головним фактором економії є зниження витрат на паливо (кокс), яке перекриває зростання вартості залізорудної сировини (використання більш дорогих локальних спеків). Також спостерігається позитивний ефект від розподілу умовно-постійних витрат на збільшений обсяг виробництва.

4.7. Розрахунок прибутку та рентабельності виробництва

Для оцінки фінансової ефективності проекту необхідно визначити виручку від реалізації продукції та прибуток. Оскільки доменний цех є частиною металургійного комбінату, для розрахунків приймаємо внутрішню розрахункову (трансфертну) або ринкову ціну на переробний чавун. Приймаємо ціну реалізації 1 тонни чавуну на рівні 13 500 грн/т (без ПДВ).

Розрахунок фінансових результатів для Базового та Проектного варіантів наведено в таблиці 4.6.

Таблиця 4.6 – Розрахунок фінансових результатів

№ з/п	Показник	Од. вим.	Базовий період	Проектний період	Відхилення (+/-)
1.	Обсяг виробництва продукції	тис. т/рік	3 304,0	3 660,1	+356,1
2.	Ціна реалізації 1 т чавуну	грн/т	13 500,00	13 500,00	0
3.	Виручка від реалізації (без ПДВ)	тис. грн	44 604 000,0	49 411 350,0	+4 807 350,0
4.	Повна собівартість 1 т (з табл. 4.5)	грн/т	12 437,26	11 996,27	-440,99

№ з/п	Показник	Од. вим.	Базовий період	Проектний період	Відхилення (+/-)
5.	Повна собівартість річного випуску	тис. грн	41 092 707,0	43 907 544,8	+2 814 837,8
6.	Валовий прибуток (ряд. 3 - ряд. 5)	тис. грн	3 511 293,0	5 503 805,2	+1 992 512,2
7.	Податок на прибуток (18%)	тис. грн	632 032,7	990 684,9	+358 652,2
8.	Чистий прибуток	тис. грн	2 879 260,3	4 513 120,3	+1 633 860,0
9.	Рентабельність продукції	%	8,55%	12,54%	+3,99 п.п.

Аналіз фінансових результатів:

Впровадження запропонованих заходів дозволяє:

1. Збільшити річний чистий прибуток цеху на 1 млрд 633,8 млн грн.
2. Підвищити рентабельність виробництва з 8,55% до 12,54%.
3. Зниження собівартості та ріст обсягів виробництва дають синергетичний ефект, що значно покращує фінансову стійкість підприємства.

4.8. Розрахунок терміну окупності та ефективності інвестицій

Ефективність капітальних вкладень оцінюється за строком їх окупності (Payback Period, PP) та коефіцієнтом ефективності. Джерелом повернення інвестицій є додатковий чистий прибуток, отриманий внаслідок реалізації проекту.

1. Вихідні дані для розрахунку:

- Капітальні інвестиції ($K_{\text{кап}}$): 104 700 тис. грн (з п. 4.5).
- Приріст чистого прибутку ($\Delta P_{\text{чист}}$): 1 633 860,0 тис. грн (з табл. 4.6).

2. Розрахунок терміну окупності ($T_{\text{ок}}$):

$$T_{\text{ок}} = \frac{K_{\text{кап}}}{\Delta P_{\text{чист}}}$$

$$T_{\text{ок}} = \frac{104\,700}{1\,633\,860} = 0,064 \text{ року}$$

Переведемо у місяці:

$$T_{\text{ок.міс}} = 0,064 \times 12 \approx 0,8 \text{ місяця}$$

3. Розрахунок коефіцієнта рентабельності інвестицій (ROI):

Показує, скільки прибутку приносить кожна гривня, вкладена в проект.

$$ROI = \frac{K_{\text{кап}}}{\Delta\P_{\text{чист}}} \times 100\%$$

$$ROI = \frac{1\,633\,860}{104\,700} \times 100 = 1560\%$$

4.9. Зведені техніко-економічні показники проекту

На основі виконаних розрахунків сформовано підсумкову таблицю, яка характеризує ефективність впровадження комплексу заходів (локальні спеки + рухомі плити + автоматизація) на доменній печі №9.

Таблиця 4.7 – Зведені показники економічної ефективності

№ з/п	Найменування показника	Одиниця виміру	Базовий період	Проектний період	Зміна (+/-)
1.	Річний обсяг виробництва чавуну	тис. т	3 304,0	3 660,1	+356,1
2.	Питома витрата коксу	кг/т	408,2	357,2	-51,0
3.	Виробнича собівартість 1 т чавуну	грн/т	12 437,26	11 996,27	-440,99
4.	Річна економія собівартості	тис. грн	—	—	1 614 067,5
5.	Валовий прибуток	тис. грн	3 511 293,0	5 503 805,2	+1 992 512,2
6.	Чистий прибуток (після оподаткування)	тис. грн	2 879 260,3	4 513 120,3	+1 633 860,0
7.	Рентабельність продукції	%	8,55	12,54	+3,99 п.п.
8.	Капітальні інвестиції ($K_{\text{кап}}$)	тис. грн	—	104 700,0	—
9.	Термін окупності проекту ($T_{\text{ок}}$)	міс.	—	0,8	—
10.	Коефіцієнт рентабельності інвестицій (ROI)	%	—	1560	—

Виконане техніко-економічне обґрунтування підтвердило високу ефективність запропонованих у дипломній роботі рішень. Комплекс заходів,

що включає перехід на офлюсовані локальні спеки, оптимізацію дуттьового режиму та модернізацію системи завантаження, дозволяє збільшити виробництво чавуну на 356,1 тис. тонн/рік (+10,8%).

Головним економічним результатом є зниження виробничої собівартості чавуну на 440,99 грн/т. Основну частку економії забезпечує скорочення питомої витрати коксу на 51,0 кг/т, що в грошовому еквіваленті перебиває збільшення витрат на більш якісну залізорудну сировину.

Реалізація проекту забезпечує приріст чистого прибутку підприємства на суму 1 млрд 633,9 млн грн на рік. Рентабельність виробництва чавуну в цеху зростає з 8,55% до 12,54%.

Проект потребує капітальних інвестицій у розмірі 104,7 млн грн (на виготовлення плит колошника та системи автоматизації). Завдяки значному економічному ефекту ці вкладення окупаються за екстремально короткий термін — менше 1 місяця роботи печі на проектних параметрах. Швидка окупність пояснюється тим, що відносно недорогою модернізація (104,7 млн грн) проводиться на агрегаті величезної потужності (5000 м³), де навіть незначне зниження питомих витрат (на 440 грн/т) при мільйонних обсягах виробництва генерує колосальний грошовий потік.

РОЗДІЛ 5 ОЦІНКА УМОВ ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКИ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

5.1. Аналіз небезпечних і шкідливих виробничих факторів при експлуатації доменної печі в умовах інтенсифікації плавки

Впровадження заходів з підвищення ефективності доменного виробництва, розглянутих у дипломній роботі (використання офлюсованих локальних спеків, оптимізація дуттьового режиму та вдування ПВП), вимагає детального аналізу умов праці. Технологічний процес виплавки чавуну на ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» супроводжується наявністю комплексу небезпечних та шкідливих виробничих факторів, класифікація яких наведена згідно з ГОСТ 12.0.003-74.

На основі аналізу технологічної схеми та проектних рішень виділено наступні групи факторів, що діють на персонал доменного цеху:

1. Фізичні фактори:

- **Підвищена запиленість повітря:** Виникає при транспортуванні та завантаженні нових видів сировини (локальні спеки, кокс), а також при підготовці та вдуванні пиловугільного палива (вугільний пил є вибухонебезпечним та фіброгенним).

- **Підвищена температура поверхонь обладнання та матеріалів:** Температура чавуну та шлаку сягає 1450–1500 °С, температура гарячого дуття — до 1200 °С. Це створює ризик теплових опіків та теплового удару.

- **Підвищений рівень шуму та вібрації:** Джерелами є повітродувні машини, системи аспірації, скіпові підйомники, грохоти для відсіву дріб'язку коксу та інжекційні установки ПВП.

- **Рухомі машини та механізми:** Особливу небезпеку становлять елементи завантажувальних пристроїв (скіпи, конуси, а також запропоновані в проекті рухомі відбійні плити з гідроприводом).

- **Хімічні фактори:**

- **Загазованість робочої зони:** Доменний газ містить 20–30% оксиду вуглецю (CO), який є сильнодіючою отруйною речовиною. При

інтенсифікації плавки та підвищенні тиску під колошником ризик витоків газу через нещільності фурм та засипного апарату зростає.

- **Продукти горіння ПВП:** При порушенні герметичності фурмених приладів можливе попадання продуктів неповного згорання вугілля в робочу зону ливарного двору.

2. **Психофізіологічні фактори:**

- Нервово-психічні перевантаження операторів ПУ (пульт управління) через необхідність контролю великої кількості параметрів (енергія дуття, склад газу, робота системи завантаження) в режимі реального часу, особливо при використанні розробленого алгоритму динамічного управління.

Організація охорони праці при реалізації проектних рішень регламентується Законом України «Про охорону праці» та НПАОП 27.0-1.01-08 «Правила охорони праці у металургійній промисловості».

5.2. Вимоги безпеки при експлуатації технологічного комплексу вдування пиловугільного палива (ПВП)

Впровадження технології вдування ПВП, яке розглядається в роботі як основний засіб зниження витрат коксу, вносить суттєві зміни в карту ризиків доменного цеху. Вугільний пил є горючою речовиною, здатною до самозаймання та вибуху при досягненні певної концентрації в повітрі (нижня межа вибуховості для газового вугілля становить близько 40–50 г/м³).

Для запобігання аварійним ситуаціям при експлуатації систем підготовки та вдування ПВП необхідно дотримуватися наступних технічних та організаційних заходів:

1. **Запобігання вибухам та пожежам:**

- **Інертизація:** Усі бункери, млини та трубопроводи транспортування вугільного пилу повинні бути герметичними та заповненими інертним газом (азотом) із вмістом кисню не більше 8–10% за об'ємом.

Необхідно передбачити автоматичний контроль вмісту кисню та СО в атмосфері бункерів запасу пилу.

- **Температурний контроль:** Температура сушильного агента на вході в млин не повинна перевищувати 300 °С, а температура пилоповітряної суміші на виході — 100 °С. Перевищення цих меж може призвести до термічної деструкції вугілля та виділення летких речовин, що створює вибухонебезпечне середовище.

- **Заземлення:** Усе устаткування, де відбувається рух вугільного пилу (трубопроводи, циклони, фільтри), повинно мати надійне заземлення для зняття статичної електрики, яка може стати джерелом іскри.

2. Безпека фурменної зони:

- У проєктній частині роботи наголошується на важливості контролю енергетичних параметрів дуття при вдуванні ПВП. З точки зору безпеки, критичним є **контроль герметичності фурмених приладів**. При прогоранні фурми (що є частим явищем при інтенсифікації плавки) можливий викид розплаву та гарячих газів назовні.

- Система подачі ПВП повинна бути обладнана швидкодіючими відсічними клапанами, які автоматично перекривають подачу вугілля при падінні тиску гарячого дуття нижче заданого рівня (наприклад, 0,15 МПа) або при зупинці повітродувки, щоб запобігти зворотному удару полум'я в вугільний тракт.

3. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ):

- Персонал, що обслуговує установки ПВП, повинен бути забезпечений антистатичним спецодягом, респіраторами для захисту від дрібнодисперсного пилу (клас захисту FFP2/FFP3) та захисними окулярами.

5.3. Заходи безпеки при експлуатації системи завантаження та нових конструктивних елементів колошника

Реалізація запропонованого у дипломній роботі методу керування розподілом шихти передбачає модернізацію колошника шляхом встановлення

рухомих відбійних плит, які приводяться в дію гідроциліндрами. Експлуатація та обслуговування цього обладнання на висоті понад 30 метрів в умовах підвищеного тиску газу вимагає дотримання суворих заходів безпеки.

1. Безпека при роботі з гідравлічним обладнанням:

- Оскільки привід плит здійснюється гідроциліндрами, існує ризик розриву рукавів високого тиску та витoku гідравлічної рідини. Враховуючи високу температуру в зоні колошника, це створює пожежну небезпеку.

- **Заходи:** Використання вогнестійких гідравлічних рідин. Усі гідравлічні лінії повинні бути захищені теплоізоляційними кожухами. Перед початком ремонтних робіт тиск у гідросистемі має бути скинутий до атмосферного, а насоси — відключені від електромережі з вивішуванням плакату «Не вмикати — працюють люди».

2. Герметизація та захист від доменного газу:

- Введення штоків гідроциліндрів всередину кожуха печі створює потенційні місця витoku доменного газу (CO), що є смертельно небезпечним для персоналу, який обслуговує колошниковий майданчик.

- **Заходи:** Вузли проходу штоків через кожух повинні бути обладнані сальниковими ущільненнями з подачею азоту під тиском, що перевищує тиск газу в печі, для створення запірного бар'єра. На колошниковому майданчику обов'язкова наявність стаціонарних газоаналізаторів, заблокованих зі звуковою сигналізацією.

3. Механічна безпека та обслуговування:

- Рухомі плити піддаються інтенсивному абразивному зносу коксом та агломератом. Їх відрив або руйнування може призвести до заклинювання засипного апарату.

- **Заходи:** Регулярний контроль стану кріплення плит під час планових зупинок печі. Ремонтні роботи всередині колошника дозволяються лише після повного видувння печі, охолодження шихти та аналізу повітряного середовища на вміст кисню (не менше 20%) та відсутність CO.

- Зона руху механізмів завантаження (скіпи, конуси, приводи плит) повинна мати захисні огороження. Забороняється перебування людей у зоні дії рухомих частин під час роботи механізмів.

5.4. Санітарно-гігієнічні умови праці та виробнича санітарія

Забезпечення нормативних санітарно-гігієнічних умов є обов'язковою умовою безаварійної роботи при впровадженні заходів з інтенсифікації доменної плавки. Згідно з ДСН 3.3.6.042-99 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень», робочі зони доменного цеху (ливарний двір, підбункерне приміщення, майданчик колошника) відносяться до категорії робіт з підвищеним тепловим навантаженням.

1. Мікроклімат та захист від теплового випромінювання:

Впровадження технології вдування ПВП та підвищення температури дуття до 1100–1200 °С призводить до зростання тепловиділень від кожуха повітропроводів гарячого дуття та фурмених приладів.

- **Заходи захисту:**
- Теплоізоляція усіх гарячих поверхонь (повітропроводи, фурмені коліна) має забезпечувати температуру на поверхні ізоляції не вище 45 °С.
- На робочих місцях горнових та машиністів шихтоподачі необхідно застосовувати повітряне душення (подачу охолодженого повітря).
- Для захисту від інфрачервоного випромінювання розплаву (чавуну та шлаку) кабінні управління (пости) повинні бути обладнані тепловідбивним склом та системами кондиціонування.

2. Виробниче освітлення: Робота з новими системами завантаження (рухомі плити) та контроль параметрів ПВП вимагають високої точності зорової роботи. Згідно з ДБН В.2.5-28:2018 «Природне і штучне освітлення»:

- **Робоче освітлення:** У зоні ливарного двору та на колошниковому майданчику має бути забезпечена освітленість не менше 150–200 лк. Використовуються газорозрядні лампи у пилонепроникному виконанні.

- **Аварійне освітлення:** Дуже важливим є забезпечення аварійного освітлення (не менше 5% від робочого) на шляхах евакуації та біля пультів управління ПВП, щоб у разі знеструмлення персонал міг безпечно завершити технологічні операції або покинути небезпечну зону.

5.5. Заходи пожежної безпеки

Специфіка запропонованих у дипломній роботі технологій (вугільне паливо, гідравліка на колошнику) суттєво підвищує пожежну небезпеку об'єкта. Організація протипожежного захисту здійснюється відповідно до Кодексу цивільного захисту України та НАПБ А.01.001-2014.

1. Пожежна безпека при роботі з ПВП: Вугільний пил є вибухопожежонебезпечною речовиною. Основними джерелами займання можуть бути: перегрів підшипників млинів, іскри статичної електрики, самозаймання відкладень пилу.

- **Технічні заходи:**
- Установка автоматичних систем газового або порошкового пожежогасіння в приміщеннях вуглепідготовки.
- Оснащення бункерів вугільного пилу розривними мембранами (вибуховими клапанами) для скидання надлишкового тиску за межі будівлі у разі вибуху ("хлопка").
- Регулярне вологе прибирання приміщень для недопущення накопичення пилу, який може здетонувати від вторинної хвилі.

2. Пожежна безпека гідравлічних систем колошника: Використання гідроприводу для керування відбійними плитами над гарячою зоною печі створює ризик загоряння мастила.

- **Технічні заходи:**
- Використання вогнестійких гідравлічних рідин.
- Встановлення автоматичних датчиків полум'я та температури в зоні маслостанцій та гідроциліндрів.

- Наявність первинних засобів пожежогасіння (вогнегасники типу ВП-5, ВП-9) безпосередньо на колошниковому майданчику.

5.6. Заходи щодо попередження та ліквідації аварійних ситуацій

Експлуатація доменної печі в інтенсивному режимі з використанням пиловугільного палива відноситься до виробництв з підвищеним рівнем техногенного ризику. Згідно з вимогами законодавства, на підприємстві має бути розроблений та затверджений «План локалізації та ліквідації аварійних ситуацій і аварій» (ПЛАС).

В контексті запропонованих у дипломній роботі технічних рішень, ПЛАС повинен містити чіткі інструкції для персоналу щодо дій у наступних специфічних ситуаціях:

1. Розгерметизація трактів подачі ПВП:

- *Ознаки:* Падіння тиску в трубопроводі, спрацювання датчиків загазованості (підвищення концентрації вугільного пилу), поява диму.
- *Дії:* Автоматична (або ручна аварійна) зупинка подачі вугілля, продувка системи інертним газом (азотом), включення аварійної вентиляції, виведення персоналу з небезпечної зони.

2. Прогар фурменого приладу при вдуванні ПВП:

- *Ризик:* Вихід гарячих газів, розплаву та вугільного пилу на ливарний двір, що може призвести до миттєвого вибуху.
- *Дії:* негайне відключення подачі ПВП на аварійну фурму, переведення печі на "тихий хід" (зниження тиску дуття), припинення робіт на ливарному дворі до локалізації витoku.

3. Аварія гідравлічної системи керування плитами колошника:

- *Ознаки:* Падіння тиску масла, неконтрольоване переміщення плит, пожежа на колошнику.
- *Дії:* Відключення насосних станцій, перекриття магістралей, застосування автоматичних систем пожежогасіння. Механічна фіксація плит у

безпечному (вертикальному) положенні проводиться тільки після повного зупинення печі.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дипломній роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання підвищення ефективності доменного виробництва шляхом впровадження комплексу заходів, спрямованих на покращення якості шихтових матеріалів, оптимізацію газодинамічного режиму та використання альтернативних видів палива.

На основі виконаних теоретичних, аналітичних та розрахункових досліджень зроблено наступні висновки:

1. Аналіз ефективності сировинної бази:

Встановлено, що традиційна шихта, яка складається з агломерату та окатків, не дозволяє повною мірою реалізувати потенціал доменних печей великого об'єму через аеродинамічну несумісність компонентів та недостатню стабільність їх властивостей. Доведено, що перехід на використання одного виду окускованої сировини — офлюсованих локальних спеків (з вмістом заліза 60,0–63,5% та основністю 1,25–1,5 од.) — забезпечує покращення газопроникності стовпа шихти, що дозволяє підвищити продуктивність печі на 10–13% та знизити питому витрату коксу.

2. Вплив якості коксу:

Статистичний аналіз роботи доменної печі №9 (5000 м³) виявив нелінійний характер впливу фізико-механічних властивостей коксу на енергетичні показники плавки. Визначено, що найбільш ефективним є підвищення міцності M_{25} у діапазоні 87–90% (економія коксу 3,9 кг/т на 1%). Критичним фактором є вміст фракції +80 мм: збільшення її кількості на 1% призводить до перевитрати палива на 2,5 кг/т. Також доведено, що стабілізація гарячої міцності (CSR) є ключовою умовою ефективного вдування ПВП: зниження коефіцієнта варіації CSR на 1% зменшує витрату палива на 5,33 кг/т.

3. Оптимізація газодинамічного режиму («Знизу»):

Доведено, що традиційний підхід до управління дуттьовим режимом за критерієм кінетичної енергії є недостатнім. Обґрунтовано необхідність використання показника повної механічної енергії потоку комбінованого дуття ($E_{\text{пм кд}}$), яка враховує енергію тиску. Встановлено критичні значення енергії, нижче яких порушується газопроникність центру печі: для печей середнього об'єму (2000–2700 м³) — 1500 кДж/с, для печей великого об'єму (5000 м³) — 2000 кДж/с.

4. Вдосконалення системи завантаження («Зверху»):

Для забезпечення стабільної роботи печі в умовах інтенсифікації плавки обґрунтовано необхідність формування «осьової віддушини» — центральної зони з мінімальним рудним навантаженням. Для доменних печей, обладнаних двоконусними засипними апаратами, запропоновано модернізацію колошника шляхом встановлення рухомих відбійних решіток. Це конструктивне рішення дозволяє прицільно завантажувати великий кокс у центр печі (під кутом відбиття 38–45°), імітуючи можливості сучасних лоткових апаратів.

5. Алгоритм динамічного управління:

Розроблено алгоритм узгодженого управління параметрами завантаження та дуття. Встановлено кількісну закономірність: зміна повної енергії горнового газу на 100 кДж/с вимагає коригування радіуса осьової «віддушини» у зворотному напрямку на 0,06 м³. Впровадження цього алгоритму дозволяє оперативно стабілізувати тепловий стан печі при коливаннях якості сировини, запобігаючи як канальному ходу газів, так і захаращенню горна.

6. Економічна ефективність:

Розрахунок економічної ефективності підтвердив доцільність реалізації запропонованих рішень. Комплексна модернізація технології дозволяє знизити собівартість чавуну на 516,72 грн/т, при цьому 84% економії забезпечується скороченням витрат на кокс. Капітальні вкладення в

модернізацію колошника та системи автоматизації (104,7 млн грн) окупаються менш ніж за 1 місяць експлуатації печі на проектних параметрах .

7. Охорона праці та екологія:

Встановлено, що впровадження технології вдування ПВП вимагає посилення заходів безпеки через вибухопожежонебезпечність вугільного пилу. Обґрунтовано необхідність використання систем інертизації азотом бункерів та трактів подачі палива, а також автоматичного блокування подачі при падінні тиску дуття. Застосування гідравлічних приводів на колошнику потребує використання вогнестійких рідин та спеціальних ущільнень для запобігання витокам доменного газу .

8. Загальний підсумок:

Результати роботи свідчать про те, що досягнення високих техніко-економічних показників доменної плавки в сучасних умовах можливе лише шляхом системного підходу, який поєднує покращення якості сировинної бази (локальні спеки), стабілізацію властивостей палива та впровадження адаптивних алгоритмів управління газодинамікою.