

Міністерство освіти і науки України  
Криворізький національний університет  
Гірничо-металургійний факультет  
Кафедра металургії чорних металів  
і ливарного виробництва

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до випускної атестаційної роботи бакалавра  
зі спеціальності 136 – Металургія

на тему: Формування та обґрунтування технологічних рішень зі зменшення  
ресурсо- та енергоємності виробництва залізорудних окатишів.

Виконав:

студент групи МТ-23-2ск

Владислав ОГІЙ

Керівник випускної роботи

Володимир ПЛОТНІКОВ

Нормоконтролер

Володимир ПЛОТНІКОВ

Завідувач кафедри

Сергій САВЕЛЬЄВ

Кривий Ріг  
2026 р.

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана за темою «Формування та обґрунтування технологічних рішень зі зменшення ресурсо- та енергоємності виробництва залізородних окатишів.» та представлена до захисту в Криворізькому національному університеті (м. Кривий Ріг, 2026 р.).

ОБКОТИШІ, ПРИРОДНИЙ ГАЗ, ПАЛИВО, ТЕПЛОВИЙ БАЛАНС,  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ.

Стр. Табл. Бібл.

У сучасних технологічних парадигмах металургійної індустрії залізородні обкотиші визначаються як високопрогресивне джерело палива, здатне забезпечувати синергетичне підвищення ефективності виробничих процесів і оптимізацію енергетичного балансу агрегатів. Одним із пріоритетних стратегічних напрямів еволюції виробництва огрудкованих залізородних матеріалів виступає системна інтеграція інноваційних енерго- та ресурсозберігаючих технологічних платформ, що передбачають комплексне підвищення продуктивності та одночасне мінімізаційне впливання на навколишнє середовище.

Раціональне вирішення завдань підвищення ефективності виробничих циклів із випуску залізородних обкотишів у зазначених умовах ґрунтується на багаторівневому дослідженні технологічного потенціалу комбінованого нагрівання шарів обкотишів із синхронним використанням газоподібного та твердого палива, а також на стратегічному розширенні сировинної бази через високоефективну підготовку відходів збагачення, що акумульовані у хвостосховищах. При цьому акцент робиться на інтегрованому вирішенні комплексних проблем, що включають підвищення металургійних характеристик обкотишів, забезпечення екологічної безпеки виробництва та оптимізацію функціональної надійності агрегатів, що задіяні у технологічному циклі.

Актуалізація досліджуваних напрямів визначається не лише концептуальними орієнтирами розвитку гірничо-металургійного комплексу України, але й

наявними експлуатаційними та технологічними обмеженнями, які сформувалися в рамках функціонування гірничозбагачувальних комбінатів, створюючи потребу у високотехнологічних, науково обґрунтованих рішеннях для забезпечення сталого розвитку галузі.

# ЗМІСТ

ВСТУП.....

РОЗДІЛ 1. Аналітичний огляд літературних джерел та сучасного стану досліджень

РОЗДІЛ 2. Теоретико-методологічні основи досліджуваних процесів

2.1. Критичний аналіз та оцінка енергозберігаючих стратегій у процесах огрудкування залізородних матеріалів

2.2. Динаміка окисно-відновних реакцій при спіканні обкотишів із шихт із додаванням твердого палива: термодинамічний та кінетичний аспекти

2.3. Теплові та енергетичні витрати у виробництві залізородних обкотишів

2.3.1. Газопроникність шару обкотишів та її вплив на енергоспоживання

2.3.2. Механізми теплопередачі під час процесу спікання обкотишів

2.3.3. Інтенсифікація процесу спікання обкотишів на конвеєрних агрегатах: технологічні та фізико-хімічні аспекти

Висновки до розділу 2

РОЗДІЛ 3. Методика експериментальних досліджень

3.1. Комплексне вивчення хімічного складу, фізико-механічних та теплофізичних властивостей вихідних шихтових матеріалів та обпалених обкотишів шляхом лабораторних експериментів і розрахункових моделей

3.2. Термогравіметричні дослідження кінетики спікання залізовмісних систем у присутності вуглецевмісних добавок

РОЗДІЛ 4. Експериментальні результати та аналіз

4.1. Роль гірничо-металургійного комплексу у впровадженні ресурсозберігаючих технологій

4.2. Використання відходів металургійного виробництва як часткових заміників концентрату та флюсів

4.2.1. Промислові випробування технології виробництва залізородних обкотишів із додаванням замасленої окалини прокатних цехів

4.3. Промислові випробування технології виробництва обкотишів із заміною

коксівного палива відходами збагачення вугілля (аргіліт)

4.4. Впровадження вдосконаленої ресурсо- та енергозберігаючої технології виробництва окатишів із застосуванням твердого палива

4.4.1. Перспективи використання альтернативних джерел теплової енергії.....

4.4.2. Промислові випробування та впровадження технології одержання окатишів із добавкою твердого палива в шихту .....

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

## ВСТУП

### Актуальність теми

Сучасна металургійна промисловість характеризується високою матеріало- та енергоємністю, що є наслідком не лише значного споживання сировинних ресурсів, але й проявом системної недосконалості технологічних циклів, а також недостатньої якісної стабільності продукції на всіх етапах переділу – починаючи від стадії видобутку й збагачення залізних руд та завершуючи виробництвом готового прокату. За даними численних досліджень, при збагаченні залізних руд фіксуються втрати металу, що сягають 25–30 % від загальної маси заліза, тоді як частка дрібних фракцій (менше 5 мм) у товарних обкотишах досягає 5–6 %, тоді як у закордонних аналогах відповідні показники становлять 10–15 % і близько 3,5 % дріб'язку. Окрім прямих втрат сировини, зумовлених пилевиносом, надмірне накопичення дрібних фракцій у залізородній частині шихт доменних печей обумовлює додаткову витрату коксу, яка оцінюється приблизно на 0,2 % на кожний відсоток фракцій менше 5 мм, що в комплексі істотно знижує енергоефективність металургійного виробництва. Згідно з проведеними оцінками, потенціал економії енергоресурсів у металургійній галузі України становить близько 30 %, що обґрунтовує необхідність розробки науково-методичного базису підвищення ефективності виробництва залізородних обкотишів шляхом впровадження інноваційних технологій, здатних забезпечити одночасне зменшення енергетичних витрат і підвищення якості залізородної сировини.

У межах даного дослідження вирішення зазначеної проблеми здійснювалося шляхом комплексної утилізації відходів збагачення залізних руд і відходів металургійного виробництва, а також удосконалення технології спікання обкотишів із використанням комбінованого палива, що поєднує газоподібні та тверді енергетичні ресурси.

## Мета та завдання дослідження

Метою роботи є формування науково-методичного та практичного фундаменту вдосконалення технології виробництва залізорудних обкотишів шляхом розробки та впровадження енерго- та ресурсозберігаючих технологічних рішень, які забезпечують більш повне використання різних видів палива та ефективну утилізацію залізовмісних відходів збагачувальних фабрик.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

1. Проведено комплексне дослідження тепломасообмінних та газодинамічних процесів при термічній обробці залізорудних обкотишів із застосуванням різних видів палива, а також розроблено фізико-хімічну модель окисно-відновних процесів у шарі обкотишів, що дозволяє кількісно описувати кінетичні й термодинамічні характеристики процесу;
2. Розроблено та апробовано ефективні методи інтенсифікації тепломасообмінних і газодинамічних процесів під час спікання обкотишів на конвеєрних випалювальних машинах, що забезпечують оптимізацію енергоспоживання та підвищення якості продукції;
3. Створено технологічні й технічні рішення для підвищення ефективності використання комбінованого (газоподібного та твердого) палива при спіканні обкотишів із магнетитового й гематитового концентратів, що дозволяє отримувати обкотиші з металургійними властивостями, які відповідають суворим вимогам доменної плавки, із застосуванням розроблених регресійних моделей і математичного прогнозування властивостей готової продукції.

Об'єкт дослідження: процеси термічної обробки обкотишів на конвеєрних випалювальних машинах із використанням комбінованого палива, металургійні властивості обкотишів, а також процеси класифікації та сортування відходів збагачення за мінералогічним складом при їх складуванні у хвостосховища.

Предмет дослідження: методи та технологічні підходи до енерго- та ресурсозбереження у процесах виробництва залізрудних обкотишів, включаючи оптимізацію тепломасообміну, газодинаміки й використання комбінованих паливних ресурсів.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Аналіз ключових тенденцій розвитку чорної металургії до 2036 року свідчить, що домінуючою технологічною схемою виробництва сталі залишається традиційний ланцюг «доменна піч – сталеплавильний цех». Частка чавуну в загальному обсязі сталеплавильного виробництва перевищує 50 % [1]. Це

твердження особливо актуальне для України з річним виробництвом чавуну близько 21 млн тонн. Внутрішні потреби в залізорудній сировині становлять приблизно 38 млн т, а експортні можливості оцінюються на рівні 27–30 млн т руди на рік [2]. Такий виробничий потенціал, забезпечений основними фондами гірничодобувних, збагачувальних і доменних підприємств, вимірюється десятками мільярдів доларів США. У поєднанні з гострими соціальними викликами у металургійних регіонах це формує нагальну потребу підвищення конкурентоспроможності металопродукції як на зовнішньому, так і на внутрішньому ринку.

Одним із ключових чинників, що визначає собівартість чавуну при стабільній роботі доменних агрегатів, є якість залізорудної сировини. Протягом останніх трьох-чотирьох десятиліть залізорудна складова доменної шихти в Україні в середньому на 95 % представлена огрудкованими матеріалами, серед яких 55–60 % становить агломерат і 35–40 % — обкотиші. Після введення в експлуатацію Криворізького ГЗК окиснених руд це співвідношення може зміститися на користь обкотишів. Таким чином, сьогодні в Україні фактично сформувався ринок залізорудної сировини різних способів огрудкування, який суттєво відрізняється за мінералогією, хімією, гранулометриєю та металургійними властивостями.

Поява на внутрішньому ринку двох приблизно рівнозначних за обсягом виробництва видів огрудкованої залізорудної продукції є закономірною. Більше половини видобутої руди направляється на збагачення малозалізистих руд із середнім вмістом Fe 35,9 %, що призводить до отримання тонкодисперсних (менше 0,051 мм) концентратів. У таких умовах більш ефективним рішенням для гірничозбагачувальних комбінатів є виробництво обкотишів на місці, а не транспортування концентрату для подальшої переробки в агломерат на металургійних заводах.

Посилення конкуренції та зменшення загального споживання залізорудної продукції поставили перед ГЗК завдання оптимізації співвідношення

«собівартість — якість» і необхідність об'єктивної порівняльної оцінки обкотишів власного виробництва з продукцією інших виробників. Найповнішу методику оцінки розроблено Інститутом чорної металургії НАН України. Вона включає характеристики матеріалу в природному стані та показники поведінки сировини під час відновно-теплової обробки, що моделює умови в різних зонах доменної печі аж до стадій розм'якшення та плавлення. Такі комплексні дослідження виконані для всіх великих виробників ЗРС України [3].

Проте розуміння якості залізорудної сировини не може обмежуватися лише технічними параметрами, які впливають на хід доменної плавки. Важливими є також економічні показники: енергомісткість процесів, вартість 1 % Fe, логістичні витрати, вплив матеріалу на довговічність агрегатів тощо.

Проведений аналіз дав змогу визначити такі середньостатистичні відмінності між агломератом і обкотишами:

- собівартість виробництва одного відсотка заліза в обкотишах у 1,05–1,3 рази перевищує аналогічний показник для агломерату. Для окремих споживачів, через особливості оподаткування та структуру підприємств, різниця у кінцевій вартості може досягати 1,3–1,5 разів [4];
- енерговитрати на виробництво агломерату загалом більші, проте до 82,5 % цих витрат припадає на тверде паливо, тоді як при виробництві обкотишів основним енергоносієм є дефіцитний природний газ;
- домінуючим рудним мінералом у обкотишах є гематит ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), тоді як в агломераті — магнетит ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ );
- хімічний склад обкотишів за Fe та  $\text{SiO}_2$  характеризується більшою стабільністю;
- макроструктура обкотишів є більш однорідною, із меншою кількістю тріщин;
- вміст шлакової зв'язки в обкотишах у 2–3 рази нижчий, ніж в агломераті;
- для обкотишів характерна зональна будова, тоді як агломерат має однорідну структуру, але більшу кількість мікро- і макротріщин;

- середній вміст заліза в обкотишах вищий приблизно на 6,5 % (абсолютних);
- поризність шару обкотишів становить  $0,42 \text{ м}^3/\text{м}^3$ , що менше, ніж у агломерату ( $0,50 \text{ м}^3/\text{м}^3$ );
- загальна та відкрита пористість обкотишів на 6–14 % перевищує відповідні характеристики агломерату;
- при однаковій крупності насипна маса обкотишів є більшою на  $\approx 220 \text{ кг}/\text{м}^3$ ;
- обкотиші відзначаються високою міцністю на стиск ( $227 \text{ кг}/\text{об.}$ ), а вихід фракції менше 5 мм становить лише 4,45 %;
- стиранність обкотишів більша на 2–2,5 %, проте твердість агломерату ( $1040 \text{ МПа}/\text{м}^2$ ) значно перевищує твердість обкотишів ( $589 \text{ МПа}/\text{м}^2$ );
- за малих навантажень обкотиші та агломерат поведуть себе подібно, однак зі збільшенням навантаження агломерат інтенсивніше руйнується з утворенням дріб'язку, а обкотиші — з утворенням пилу;
- при відновно-тепловій обробці газопроникність шару визначається співвідношенням ступенів руйнування та спікання: для агломерату основною проблемою є руйнування, для обкотишів — спікливість і перехід у в'язкопластичний стан;
- температури формування та фільтрації рідких фаз у обкотишів на  $30\text{--}80 \text{ }^\circ\text{C}$  нижчі, ніж в агломерату, а первинний шлак має підвищений уміст FeO, що відновлюється лише прямим шляхом і збільшує витрати коксу.

Вплив властивостей огрудкованої сировини на показники доменної плавки можна коректно оцінити тільки у випадку встановлення кількісних залежностей між характеристиками якості та технологічними параметрами процесу. Частина показників — таких як вміст Fe та холодна міцність — традиційно враховуються під час формування ціни шихтових матеріалів [3]. Зокрема, підвищення вмісту заліза на 1 % зменшує витрату коксу в середньому на 0,45–2,0 %, а зниження кількості фракції –5 мм на 1 % скорочує його витрату на 1–1,5 %.

Інші характеристики рідко включаються до цінових формул, хоча численні дослідження свідчать про їх істотний вплив. Наприклад, зростання вмісту

лужних елементів на 0,1 % збільшує витрату коксу на 20–60 кг/т чавуну [5, 6]; підвищення низькотемпературної міцності на 10 % збільшує температуру колошникових газів на 100–120 °С, витрату дуття — на 40 м<sup>3</sup>/год, а ступінь використання газу — на 2 %. За різними джерелами, зміна відновлюваності на 1 % відповідає 0,3–0,8 % зміни витрати коксу [7, 8]. Взаємозв'язки високотемпературних властивостей рудної сировини з параметрами плавки досліджені гірше, проте в літературі наведено численні регресійні залежності що встановлюють взаємозв'язок між високотемпературними властивостями шихтових матеріалів і показниками доменного процесу, наведено у працях [3, 7]. Детальний аналіз дослідних плавок і експлуатаційних параметрів низки доменних печей України, Росії та інших країн, де застосовували різні пропорції окатишів і агломерату, показав неоднозначний вплив заміни агломерату окатишами. У частині випадків таке заміщення приводило до підвищення продуктивності та зменшення витрати коксу, тоді як в інших – спричиняло зворотний ефект: падіння продуктивності та збільшення коксової витрати. Іноді обидва показники – і продуктивність, і витрата коксу – зростали одночасно [9–15].

Попри неоднозначність отриманих результатів при високій частці окатишів у доменній шихті, досвід доменних печей Росії, Швеції, Німеччини та Бельгії, де здійснюється плавка фактично 100 % окатишів, свідчить про наявність значного технологічного резерву [8; 11; 16; 17].

Зокрема, на доменних печах SSAB у м. Лулео (Швеція) об'ємом 890 та 1235 м<sup>3</sup> стабільно виплавляють чавун на основі майже стовідсоткової частки окатишів. При витраті пиловугільного палива 45–49 кг/т досягається коксовий витратний рівень 378–404 кг/т (у перерахунку на умовне паливо – 422,3 і 427,3 кг/т). У Бельгії доменна піч об'ємом 1200 м<sup>3</sup> за умови використання 100 % окатишів (1492 кг/т чавуну) і введення 110 кг/т ПВП забезпечує витрату коксу 388 кг/т при сукупній витраті умовного палива 456,6 кг/т. У Німеччині печі в Зальцбурзі (2330 м<sup>3</sup>) та Бремені (1424 м<sup>3</sup>) переробляють відповідно 1489 та 1391 кг/т окатишів, тобто майже повністю сформовану окатишеву шихту. Витрати сирого вапняку

становлять 76 і 84 кг/т чавуну, а коксу – 399 і 373 кг/т, причому в окремі періоди – навіть 350 і 337 кг/т.

Отже, оцінка ефективності використання окатишів у доменному виробництві має проводитися з урахуванням загальних закономірностей їх поведінки у шахті доменної печі, а також специфіки конкретних сировинних та технологічних умов [12].

В Україні досвід експлуатації доменних печей показує такі тенденції:

- збільшення частки окатишів у шихті зазвичай забезпечує економію коксу на рівні 0,7–1,55 % на кожний додатковий відсоток заліза;
- змінюються обсяги винесення та гранулометрія колошникового пилу;
- зростає температура шихтової колони, межа пластичного стану зміщується у верх печі, а зона первинного шлакоутворення – униз;
- з'являється можливість підвищення витрати дуття;
- змінюється характер розподілу перепаду тиску по висоті печі;
- збільшується частка непрямого відновлення.

Розрахункові та експериментально-промислові дослідження ефективності різних часток окатишів ЦГЗК у шихті доменних печей комбінату ім. Петровського (1976–1990 рр.), з урахуванням істотного підвищення їх якості та стабільної роботи печей, свідчать, що при зростанні вмісту окатишів від 0 до 80 % витрата коксу скорочується на 18–32 (46) кг/т чавуну. Матеріальний баланс у доларовому еквіваленті, попри значну різницю у вартості 1 % Fe між окатишами та агломератом, утримується в межах 0,5–1,55 від сумарних витрат на сировину.

Завдяки впровадженню низки технологічних заходів – використанню вітчизняних сполучних матеріалів [18, 19], залученню низькосортних вугілля у рудну частину шихти – комбінату вдалося без втрати якості окатишів скоротити споживання імпортової сировини та природного газу, що дозволило утримувати відпускні ціни на кінцеву продукцію попри зростання вартості газу [20].

Аналіз сучасного ринку залізорудної сировини України свідчить, що агломерати в середньому поступаються окатишам за показниками міцності (у холодному стані та при відновленні), відновлюваності та вмісту заліза, а також характеризуються підвищеним вмістом дрібних фракцій. Водночас їхні високотемпературні характеристики є кращими. Незважаючи на це, співвідношення цін на агломерат, окатиші, кокс та газ забезпечує конкурентні умови для всіх виробників залізорудної сировини.

Більшість фабрик огрудкування сьогодні застосовують природний газ або рідке паливо як теплоносії. Однак з урахуванням тенденцій розвитку енергетики, швидкого виснаження газових і нафтових запасів та суттєво більших ресурсів вугілля, стає очевидним, що розширення використання твердого палива є стратегічно необхідним для уникнення майбутньої енергетичної кризи [21]. У цих умовах питання економії теплової енергії у виробництві окатишів набуло ще більшої актуальності.

Для випалу окатишів існують три принципові підходи до використання твердого палива:

1. газифікація вугілля повітрям або киснем з одержанням газу низької чи середньої калорійності;
2. пряме спалювання пиловугільного палива у виносних топках або пальниках обертових печей з утворенням високотемпературних газів;
3. введення вугілля безпосередньо до шихти для огрудкування [22–24].

Ефективність застосування пиловугільного палива для зниження коксової витрати у виплавці чавуну загальновізнана [11; 25–27], однак заміна природного газу при випалі окатишів енергетичними вугіллями поки що не має достатнього обґрунтування.

Вугільні родовища України характеризуються значною різноманітністю фізико-механічних та теплотехнічних властивостей. Кам'яні й бурі вугілля містять

підвищені концентрації сірки та золи; частка вугілля з вмістом сірки понад 2,5 % становить 30–35 % [28].

За наявними статистичними даними аглофабрики України витрачають у середньому 70 кг/т твердого палива на агломерат, при цьому співвідношення коксика та антрациту (або худого вугілля) становить приблизно 1:1. Вміст золи в коксикові сягає 11,2–19,3 %, а в антрациті та вугіллі – 15,1–22,9 %. Оскільки в середньому зольність вугілля на 3 % вища, ніж у коксика, заміна 1 кг коксика антрацитом збільшує кількість пустої породи в продукті на 0,2 кг (0,02 %). З урахуванням того, що на виробництво 1 т чавуну потрібно 1,4–1,6 т агломерату, така заміна підвищує вихід шлаку на 0,3 кг на кожен кг заміненого коксика. Додатково це знижує продуктивність агломераційних машин та погіршує якість агломерату [29].

При введенні антрациту до шихти окатишів у кількості близько 10 кг/т у продукт надходить 1,0–1,5 кг золи. Оскільки на виробництво 1 т чавуну в середньому витрачається 0,35 т окатишів, вихід шлаків збільшується на 0,35–0,525 кг/кг антрациту. Якщо врахувати співвідношення цін на газ і вугілля та зниження питомої витрати теплоти при введенні антрациту до шихти, можна стверджувати, що використання вугілля є економічно доцільнішим саме при випалі окатишів.

Подрібнене вугілля транспортували повітряним потоком у трубчастий пальник, де забезпечувалось його повне згоряння. У такій схемі один пальник дає змогу отримати максимальний вихід теплової енергії. Однак на конвеєрних випалювальних машинах конструкція значно ускладнюється, оскільки кількість пальників збільшується: наприклад, до 24 шт. для ОК-306 та до 34 шт. для ОК-552. У цьому випадку перед кожним пальником необхідно встановлювати бункер із дозувальним пристроєм [38].

При застосуванні такої системи зола, що утворюється під час спалювання вугілля, потрапляє в шар окатишів. Це створює умови для утворення настилів в обертовій печі та спікання шару на конвеєрних машинах. Найбільш придатним

паливом для цього способу є вугілля з температурою розм'якшення золи близько 1480 °С [39].

У технологіях енергетики для нагрівання котлів широко використовується отримання високотемпературних газів шляхом спалювання пиловугільного палива в топках. Такі топкові системи поділяють на агрегати з мокрим та сухим видаленням шлаку. Останні застосовуються для палив із високим виходом летких речовин та тугоплавкою золою [40].

Проте перехід на вугілля як джерело гарячих газів для випалу окатишів супроводжується збільшенням вартості будівельно-монтажних робіт, оскільки необхідні окремі споруди для його приймання, зберігання та підготовки.

Найбільш раціональним напрямком використання твердого палива під час випалу залізородних окатишів є введення його безпосередньо у шихту. Подача палива до окатиша може здійснюватися шляхом накочування його на поверхню сирої гранули або рівномірного розподілу в об'ємі окатиша при огрудкуванні рудовугільної суміші.

Виконано значний комплекс досліджень зі спікання окатишів із застосуванням різних видів твердого палива. Це зумовлено різноманіттям типів окатишів та видів палива. Були вивчені рудно-паливні окатиші, отримані хіміко-каталітичним способом [41–42], двошарові окатиші зі змінним вмістом вуглецю у зовнішньому та внутрішньому шарах, а також металізовані гранули [43–44]. Проте через складність технології ці методи не набули широкого промислового застосування.

Підсилення інтересу до використання твердого палива у виробництві доменних окатишів пов'язане також із зростанням частки гематитових концентратів у шихті. При цьому продуктивність випалювальних конвеєрних машин знижується до 0,9–1,0 т/(м<sup>2</sup>·год), а при офлюсуванні шихти або наявності в ній гідратів і карбонатів (лимоніт, сидерит) – навіть до 0,6–0,7 т/(м<sup>2</sup>·год) [45–46].

Зі збільшенням частки вугілля до 1,3–1,5 % вмісту вуглецю зменшується ступінь окиснення окатишів, і додаткова теплота виділяється внаслідок окиснення магнетиту. При підвищенні концентрації вуглецю понад 1,3–1,5 % починається відновлення оксидів заліза. У слабоокиснювальній чи нейтральній атмосфері (до 2 %  $O_2$ ) формуються магнетитові, вюститно-магнетитові або частково металізовані окатиші.

Згідно з дослідженнями Механобрчермету [47–49], введення 0,6–0,8 % антрациту до шихти з концентратів ЦГЗК підвищує продуктивність зони спікання на 20–25 % завдяки збільшенню середньої швидкості нагрівання на 55 °С/хв. Для рівномірного розподілу вугілля в окатиші запропоновано [50] подрібнювати його разом із частиною шихти. Досліди на фабриці ЦГЗК [51] показали, що введення 0,6–0,8 % антрациту підвищує продуктивність машини ОК-1-18 на 14–15 %, знижує витрату природного газу на 18 %. У доменному процесі при використанні таких окатишів продуктивність зросла на 1 %, витрата коксу зменшилася на 1,68 %, а винесення пилу – на 6,7 %.

Промислові випробування на машинах ОК-108 [51] підтвердили, що додавання дрібномеленого антрациту не погіршує процес огрудкування і не впливає негативно на якість сирих окатишів.

За кордоном подібні дослідження виконуються фірмою **Lurgi** [52]. Досліди з антрацитом і коксиком при спіканні сумішей гематитових руд і магнетитових концентратів показали, що для кожної шихти існує критичний рівень сумарного вмісту нелеткого та леткого вуглецю. Перевищення цього рівня викликає різке погіршення якості та продуктивності. Наприклад, при витраті «вуглець + леткі» на рівні 1,4 % питома продуктивність зростала на 30 %, але подальше збільшення призводило до деформації окатишів, злипання та зниження їх міцності внаслідок утворення скловидної фази [53–56].

Інші дослідження показали, що введення 1–3 % коксового дріб'язку формує крупнопористу структуру окатишів та покращує їх відновлюваність.

У Ліберії промислові випробування на конвеєрній машині продемонстрували, що введення 0,6 % вугілля збільшує продуктивність на 15 %, при цьому температура окатишів на вивантаженні зростає незначно [57].

Таким чином, додавання вугілля до шихти дозволяє підвищити продуктивність конвеєрних випалювальних машин, причому ефект значно посилюється для офлюсованих окатишів, що потребують підвищених теплових витрат [58–59].

Вплив твердого палива на процес огрудкування та випалу окатишів із магнетитових концентратів досліджувався в інститутах Уралмеханобру, НИИМТ та УНЦ АН СРСР [60–64]. Встановлено, що при спіканні окатишів основністю 1,25 підвищення вмісту вугілля до 1,5 % збільшує питому продуктивність на 2,2%. Подальше збільшення вмісту (до 2 %) спричиняє злипання окатишів і погіршення газопроникності шару. При цьому формується зональна структура: зовнішня окиснена оболонка та внутрішнє магнетитове ядро, що знижує міцність при стисканні. Зношуваність при цьому майже не змінюється, а ударна міцність після відновлення — підвищується. Також встановлено, що температура на межі «шар–постіль» зростає швидше, а неоднорідність спікання за висотою шару зменшується.

У нейтральній атмосфері при 1200 °С окатиші, що містять 2 % коксового дріб'язку, спікаються із вмістом FeO понад 50 % та демонструють міцність після відновлення у 8–10 разів вищу порівняно з окисненими окатишами КачГОКа. Напівпромислові випробування проведено на дослідній фабриці заводу «Сибелектросталь».

Розрахунки показують, що введення 0,75 % твердого палива до шихти при незмінній продуктивності установки дозволяє підвищити температуру в зоні «шар–постіль» до 1200 °С і скоротити час витримки при температурах понад 1100 °С у 4,5 раза порівняно зі звичайним режимом, що підвищує якість окатишів. Економія природного газу при цьому становить понад 1 м<sup>3</sup>/т, а питома тепла витрата зменшується на 35,6 МДж/т.

Якщо підтримувати температуру нижніх зон на рівні звичайного режиму (1100 °С), додавання твердого палива збільшує продуктивність машини на 11,2 %. При цьому економія природного газу становить 1,64 м<sup>3</sup>/т, питома теплова витрата зменшується на 171,7 МДж/т, а електроспоживання — на 2,6 кВт·год/т [59].

Промислові дослідження на Качканарському ГОКу засвідчили, що плавний режим нагрівання дає змогу зменшити витрату газу на 6,5 м<sup>3</sup>/т, знизити вміст дрібних фракцій у готовому продукті на 0,23 %, збільшити вміст FeO на 0,84 % та підвищити міцність окатишів при відновно-тепловій обробці. Інтенсивний режим нагрівання підвищує вміст FeO на 2,12 % [60].

Незважаючи на істотне покращення характеристик сучасних окатишів, технологічні показники доменної плавки, досягнуті під час використання першої дослідної партії (30 тис. т), досі не перевищені [51]. Окатиші цієї партії містили 1,6 % FeO (у агломераті – 13,5 %), на 1,8 % менше дрібних фракцій (0–3 мм) та на 3,2 % меншу дробимість, а їхня основність становила 0,7 (на 0,08 нижче, ніж у агломерату). Фактично це був агломерат із властивостями високоякісних окатишів.

При транспортуванні окатиші руйнуються значно менше за агломерат, але результати доменної плавки визначаються переважно їхньою поведінкою у зоні відновно-теплової обробки, а не початковою міцністю [65].

Робота теплових агрегатів для виробництва окатишів залежить від комплексу факторів: сировинних, технологічних та конструктивно-теплотехнічних. Насамперед це вид руди, властивості концентратів, мінеральний склад, характер і кількість добавок у шихті. Значний вплив має і співвідношення мінеральних фаз та їх температур плавлення. Наприклад, силікатно-лужні компоненти концентратів — егірин, родусит, зелена слюда — плавляться вже при ~1000 °С, формуючи первинний розплав, який здатен зміцнювати окремі ділянки шихти.

Обкотиші, незалежно від наявності офлюсованих компонентів, демонструють підвищене ущільнення під час спікання у випадку включення легкоплавких

силікатних фаз, порівняно з матеріалами, що містять тугоплавкі силікати, такі як кварц, куммингтоніт або хлорит [66–67]. Характер в'язучого визначає критичну температуру спікання, оскільки у разі використання концентратів Михайлівського ГОКу утворений кремнійлужний розплав унаслідок плавлення зеленої слюди забезпечує високі металургійні властивості обкотишів уже при відносно низькому температурному режимі ( $\sim 1200$  °C) [68]. Це, у свою чергу, сприяє зниженню витрат природного газу. Для обкотишів Центрального ГОКу характерним є переважання рудних в'язучих компонентів із значною кристалізацією силікатної складової, що обумовлює відмінності у механічних характеристиках матеріалу після відновно-теплової обробки.

Температурно-часові параметри спікання, включно з рівнем нагріву та тривалістю термообробки, визначають формування оптимальної структури та забезпечення необхідної міцності обкотишів. Витрати теплової енергії у процесі роботи конвекційно-випалювальної машини значною мірою залежать від організації циркуляції первинного та вторинного повітря, а також відходячих газів із зон спікання та рекуперації. Сукупний вплив цих факторів на теплотехнічні характеристики газопотоків визначає як удельну продуктивність машини, так і базові металургійні параметри обкотишів — основність, міцність у холодному стані та після відновно-теплової обробки, а також питому витрату природного газу.

Для випалювальних машин площею  $278 \text{ м}^2$  із переточним колектором (СевГОК),  $216 \text{ м}^2$  без колектора (Качканарський ГОК) та  $306 \text{ м}^2$  (Лебединський ГОК) розрахункові удельні витрати палива становлять відповідно 24,0; 52,0 та 39,4 кг умовного палива на 1 т обкотишів [62]. Подальше зменшення енергетичних витрат можливо шляхом вдосконалення теплових схем та глибшого використання енергії рециркуляційних газів, тоді як істотне скорочення витрат природного газу досягається за рахунок часткової заміни його твердим паливом, що стало предметом систематичних наукових досліджень.

Рациональне проектування зон випалювальної машини, рівномірне їхнє завантаження з огляду на оптимізацію теплообміну, підтримка стабільної швидкості фільтрації теплоносія та максимальне використання теплової енергії зон рекуперації та охолодження виступають ключовими чинниками, що впливають на удельну витрату палива. Ці аспекти враховуються при роботі на природному газі, проте введення твердого палива у шихту вимагає корекції режимів та проведення додаткових теоретичних і експериментальних досліджень.

Добавки твердого палива суттєво впливають на протікання реакцій горіння вуглецю, термічне розкладання вапняку та окиснення магнетиту, діючи як внутрішнє джерело тепла завдяки реакції  $C + O_2 \rightarrow CO_2$ , що дозволяє частково компенсувати витрати енергії на розклад кальциту. Зазвичай вторинні процеси відновлення та окиснення магнетиту не враховуються [69]. Для цього використовуються вугілля, напівкокс і кокс у концентрації 0,5–2 %. Збереження механічної міцності сирих обкотишів забезпечується при підтриманні вологості шихти в межах мінімальних коливань. На низьких концентраціях добавки верхній шар демонструє більшу міцність порівняно з середнім і нижнім, тоді як із ростом вмісту палива спостерігається інверсія цього ефекту через більш ефективну теплопередачу середнього та нижнього шарів. Інтенсивне згоряння вуглецю формує порожнини, об'єм яких прямо пропорційний кількості добавки.

На підприємстві канадської компанії «Sidbec-Normines» було вироблено 8 млн т обкотишів із середнім вмістом 0,85 % коксика, що дозволило знизити витрату мазуту з 21 до 13,5 л/т, не погіршуючи металургійні характеристики і забезпечивши економію 4,5 млн дол. щороку [70]. Ефективність процесу також підвищується за рахунок раціонального використання високотемпературного повітря із зон охолодження та його перенаправлення в технологічні ділянки для інтенсифікації горіння.

Твердопаливні добавки дозволяють регулювати окисленість обкотишів, змінювати теплообмін у шарі та впливати на формування нового газового

середовища. Комбінований метод спікання, що передбачає просмоктування газів через шар, забезпечує рівномірний прогрів матеріалу до температур 1280–1300 °С. Основні обмеження методу включають неможливість використання високотемпературного повітря з зони охолодження та складність контролю розподілу газоповітряної суміші.

Твердопаливні добавки можуть застосовуватися як самостійне джерело тепла або у комбінації з іншими видами палива, істотно впливаючи на всі технологічні параметри процесу. Один із методів — накочування палива на поверхню обкотишів, що у випадку комбінованого обігріву сприяє вирівнюванню температури по висоті шару [77–80].

Введення 2 % твердого палива у шихту дозволяє отримати вюститно-магнетитові обкотиші при температурах 1200–1250 °С у нейтральній атмосфері [81]. Без використання добавок аналогічна структура формується шляхом створення відновної атмосфери через спалювання природного газу з коефіцієнтом повітря 0,2–0,4 [82]. Оптимальні параметри відновного спікання: температура 1125–1200 °С, швидкість фільтрації 0,2–0,4 м/с, діаметр обкотишів 10–12 мм, тривалість 8–10 хв [83].

Недоліки методів включають потребу високого ступеня герметизації випалювальної машини та утворення СО, проте структура забезпечує високі показники після відновно-теплової обробки [84]. У Московському інституті сталі та сплавів було розроблено технологію виробництва металізованих спеків, що демонструє здатність рудоугольних обкотишів формувати спеки незалежно від концентрації кисню в газовій фазі, забезпечуючи високі показники міцності, пористості та відновлюваності [85].

В Інституті чорної металургії НАН України створено принципово нові технології виробництва вуглецевмісних брикетів та металізованих спеків [86–91]. У Національній металургійній академії розроблено методику спікання рудоугольних обкотишів із 3–4 % твердого палива, що дозволяє зберегти залишковий вуглець у готовому продукті [92–93].

На Північному гірничо-збагачувальному комбінаті була виготовлена дослідна партія обкотишів обсягом 20 тис. тонн із залишковим вмістом вуглецю близько 0,5 %. Аналіз виробничих результатів показав, що для уникнення утворення спеків та підвищення концентрації залишкового вуглецю доцільно збільшувати діаметр обкотишів. За металургійними характеристиками отримані обкотиші відповідали вимогам доменного виробництва. Дослідна доменна плавка з використанням цих обкотишів продемонструвала, що розрахунковий коефіцієнт заміщення вуглецю коксу залишковим вуглецем обкотишів перевищує 3,5 одиниці [94].

Було проведено комплекс робіт із розробки та впровадження технології спікання залізородних обкотишів із додаванням твердого палива на установці «решітка – трубчаста піч – охолоджувач» [94–97]. На відміну від спікання рудовугільних обкотишів на конвеєрних машинах, на цій установці тверде паливо розподіляли шарами в об'ємі обкотишів так, щоб на поверхні шихта була без нього. Це дозволяло запобігти склеюванню обкотишів у «друзи» як у трубчастій печі, так і в охолоджувачі. Зі збільшенням вмісту вуглецю в шихті температура спікання знижувалась із 1260 °С до 1130 °С, одночасно підвищувався вміст монооксиду заліза до 3–5 % і основність обкотишів — від 0,11 до 0,24–0,34.

Сучасний розвиток гірничодобувної промисловості передбачає активне залучення до виробництва родовищ бідних руд, зокрема гематитових різниць, запаси яких у Кривому Розі становлять близько 3,5 млрд т [98]. На Центральному ГЗК окиснені кварцити збагачували випалювально-магнітним методом. Проте низька техніко-економічна ефективність фабрики та екологічні обмеження призвели до відмови від цієї технології. Інститут «Механобрчермет» довів ефективність збагачення окиснених руд за флотаційними, магнітними та комбінованими схемами, що дозволяє отримувати концентрат із вмістом заліза 62,3–63,5 % [98]. Проектна схема фабрики огрудкування Центрального ГЗК передбачала заміну випалювально-магнітного концентрату на концентрат окиснених руд, проте фізико-хімічні властивості таких концентратів та їх

поведінка у суміші з магнетитовими під час огрудкування, сушіння та спікання потребують додаткового дослідження.

Окиснені руди представлені переважно гематитом, іноді гідрогематитом і лимонітом. Структура та розмір зерен гематиту варіюються від дрібнозернистої до грубозернистої, що впливає на подрібнюваність. Деякі руди характеризуються твердістю та наявністю кварцових в'язучих. Під час термічної обробки зміцнення обкотишів із таких руд відбувається за рахунок утворення гематитових містків, рекристалізації гематиту та часткового шлакування. При відсутності екзотермічної реакції окиснення потрібне підвищення температури спікання та триваліший час обробки.

На сучасних огрудкувальних фабриках світу потужність виробництва гематитових обкотишів сягає 70 млн т/рік. Додатково виробляється 16 млн т обкотишів із суміші гематитового та магнетитового концентратів. Більшість гематитової сировини — це дрібні природні руди, які перед огрудкуванням піддають мокрому або сухому подрібненню з частковим підсушуванням. Основна причина сухого подрібнення — низька ефективність вакуум-фільтрів, через що не вдається отримати кек із оптимальною вологістю для огрудкування руд із гідрооксидами заліза й глинистими мінералами [99].

Сухе подрібнення дозволяє одержати сирі обкотиші з вологістю 7,5–8,5 %, що знижує витрати на видалення надлишкової вологи на конвеєрних машинах, а також забезпечує одночасне подрібнення руди, сполучних та флюсуючих добавок, підвищуючи однорідність шихти та зменшуючи витрату бентоніту [100]. Недоліком методу є підвищена температура руди після подрібнення, що призводить до пароутворення при зволоженні перед огрудкуванням.

На ЦГЗК уперше застосовано сухе подрібнення флюсу із поверненням спечених обкотишів, що показало: 10–15 % добавка спільно подрібненої суміші руди з вапняком значно підвищує міцність обкотишів після відновно-теплової обробки та знижує витрату бентоніту [101–102].

Мокре подрібнення застосовується на низці закордонних фабрик. Наприклад, на фабриці Пяле (Індія) латеритову руду подрібнюють мокрим способом, видаляючи глинистий склад промиванням. При крупності 65–70 % <44 мкм кека після фільтрації має вологість 11 %, а після підсушування до 7,5 % додають 1,5 % спільно подрібненої суміші руди з вапняком [103]. На більшості фабрик вологість кека після мокрого подрібнення задовольняє вимогам огрудкування: Тубарао — 8,5–9 %, Інтабраско — 7,9–8,5 %, Пойнт-Убу — 8,5 %, Порт-Катьє — 8,8 % [104–107].

Витрата бентоніту у шихті на закордонних фабриках становить 8–10 кг/т готових обкотишів, його набухаємість >15, оптимальна вологість обкотишів залежить від типу рудної складової та зернистості. Для гематиту вона трохи нижча, ніж для магнетиту, що пояснюється меншою гігроскопічністю [108–110].

Процес огрудкування гематитових руд та концентратів суттєво не відрізняється від магнетитових. Вибір типу огрудкувача впливає на однорідність шихти: чашеві огрудкувачі формують більш щільні обкотиші при низькій насипній вазі, тоді як барабанні забезпечують контроль крупності у замкненому циклі.

Зміцнення обкотишів з гематитових руд відбувається в тих же агрегатах, що й магнетитових, однак процеси відрізняються. Гематитові шихти, що містять гідроксиди або глинисті компоненти, чутливі до сушіння, тому первинна температура сушіння нижча — 200–250 °С. На фабриці в Дампьере сушіння починають із 177 °С і підвищують до 538 °С. Дослідження показали, що міцність гематитових обкотишів майже не збільшується до 1200 °С, а при подальшому нагріванні швидко зростає і зберігається навіть при 1400 °С, що обумовлено відсутністю внутрішнього теплового джерела — окиснення магнетиту. Конвеєрні машини та установки «решітка-трубчаста піч» є найбільш поширеними для спікання гематитових обкотишів.

Питома продуктивність випалювальних машин залежить від хімічного та мінерального складу концентрату. Для неофлюсованих обкотишів вона становить 0,55–0,72 т/м<sup>2</sup>·год, для природобогатих руд — 0,8 т/м<sup>2</sup>·год, для

кристалічних гематитових концентратів — 0,92 т/м<sup>2</sup>·год. Проектна продуктивність нових великих установок — 0,81–0,84 т/м<sup>2</sup>·год.

Концентрати з високою питомою поверхнею та вологоємністю потребують додаткових заходів та перегляду параметрів огрудкування і термообробки для досягнення необхідних технологічних характеристик.

Очевидно, що суттєвий позитивний вплив на виробничі параметри обкотишів, отриманих із гематитової сировини, може бути реалізований шляхом підвищення пористості продукту через кореляційне збільшення основності шихти, досягне шляхом введення кальцієвмісних флюсів, а також інтеграції твердофазного палива як внутрішнього джерела тепла. Існуючі технологічні підходи забезпечують отримання обкотишів із відносно високими механічними характеристиками у вихідному стані (міцність на стиск, ударна стійкість, опір стиранню тощо), однак їхні властивості, зокрема параметри основності, ще не досягають вимог сучасних доменних виробництв, що обмежує їхню частку в залізорудній компоненті шихти до 30–40 %.

Перспективними напрямками вдосконалення металургійних властивостей обкотишів під час відновно-теплової обробки є, насамперед, корекція складу шихти та режимів термообробки, що дозволяє оптимізувати процеси структуроутворення. Виробництво обкотишів з підвищеною основністю (1,2 і вище) на конвеєрних спікальних машинах із концентратів, що характеризуються високим вмістом кремнезему (>4–5 %), ускладнюється через термічні обмеження, пов'язані з затримкою нагрівання офлюсованих обкотишів у критичному температурному діапазоні 600–1200 °С. Така затримка спричинена ендотермічним ефектом розкладу карбонатів як звичайного, так і доломітизованого кальцію, що потребує додаткового підведення теплової енергії, обмежуючи швидкість її передачі й, як наслідок, знижуючи питомі продуктивності випалювальних агрегатів і збільшуючи витрати палива. Крім того, процес характеризується звуженням температурного інтервалу

розм'якшення обкотишів, що обмежує діапазон отримання продукту з необхідними якісними характеристиками.

Інтеграція твердофазного палива у шихту огрудкування, зокрема у концентрації до 1–1,5 % (антрацит, коксик), слугує додатковим внутрішнім джерелом тепла, що дозволяє мінімізувати або запобігти зниженню продуктивності під час виробництва офлюсованих обкотишів. За даними експериментальних досліджень, така добавка призводить до незначного підвищення вмісту закису заліза при збереженні прийняттого рівня міцності на стиск, хоча при підвищенні вмісту FeO спостерігається зменшення цієї міцності та одночасне зниження показників стираності.

У випадку повного офлюсування обкотишів із концентратів високої кремнеземності значення на процес зміцнення та металургійні властивості набуває рідка фаза шихти. Інтенсифікація виробництва, оптимізація паливно-енергетичних витрат і підвищення кінцевої якості продукції тісно пов'язані з комплексними дослідженнями теплообмінних і газодинамічних процесів випалу. Незважаючи на локальні шихтові та температурні умови, процес спікання підпорядковується загальним фізико-хімічним закономірностям, що дозволяє прогнозувати кінцеві властивості продукту через аналіз діаграм стану відповідних оксидних систем та облік теплофізичних характеристик матеріалів. Під час високотемпературної термообробки залізорудної шихти послідовно відбуваються складні хімічні та фізико-хімічні процеси: дегідратація, декарбонізація, окиснення й відновлення, плавлення, взаємодія твердих та рідких фаз, просочення твердих часток розплавом, розчинення компонентів, зміни складу й кількості рідкої фази та її кристалізація. Ці процеси визначають формування мікро- та макроструктури обкотишів і закладають фізико-хімічні властивості матеріалу.

З погляду структуроутворення найбільш значущими є два процеси: твердофазні реакції при нагріванні шихти та наступне плавлення, причому обмежена

тривалість агломераційного нагрівання істотно впливає на повноту твердофазних реакцій, залишаючи основну роль у формуванні макроструктури рідкій фазі. Це пояснює відносну слабку вивченість багатьох твердофазних процесів, особливо в технологіях, що відрізняються від класичного конвеєрного спікання залізородного агломерату.

Виходячи із цього, актуальними завданнями є:

-Комплексне дослідження тепло-масообмінних і газодинамічних процесів під час термічної обробки обкотишів із застосуванням різних видів твердого палива та розробка фізико-хімічної моделі окисно-відновних процесів у шарі залізородних обкотишів;

-Розробка методів оптимізації тепло-масообмінних і газодинамічних процесів при спіканні на конвеєрних машинах;

-Впровадження технологічних і технічних рішень для підвищення ефективності використання твердого палива в спіканні обкотишів з магнетитових та окиснених концентратів з отриманням продукту, що відповідає сучасним металургійним стандартам доменної плавки, із подальшою оцінкою високотемпературних властивостей на основі розроблених моделей.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕОРЕТИКО-МЕТОДОЛОГІЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНИХ ПРОЦЕСІВ

## 2.1. Критичний аналіз та оцінка енергозберігаючих стратегій у процесах огрудкування залізородних матеріалів

Енергетична результативність функціонування фабрик огрудкування, яка є функцією багаторівневої взаємодії технологічних, конструктивно-компонувальних і теплотехнічних рішень, формується передусім інтегративним впливом низки детермінант, що визначають як інтенсивність енергоспоживання на рівні окремих операцій, так і загальну структурну конфігурацію виробничих блоків, включно з їх геометрично-просторовою організацією та капіталоємністю.

У рамках сучасних схем огрудкування спостерігається паралельне використання електричної та теплової енергії, причому їх питомі витрати характеризуються істотною технологічною варіативністю. За результатами енергетичних аудитів, наведених у праці [169], при виробництві агломерату загальні питомі паливно-енергетичні витрати сягають 2,05–2,12 млн кДж/т, серед яких електрична складова становить 41,6–42,9 кВт·год/т (141–179 тис. кДж/т), а витрати технологічного палива — 1,91–1,94 млн кДж/т. Аналогічно, у виробництві обкотишів сумарні енерговитрати знижуються до 911–1056 тис. кДж/т, хоча частка електроенергії при цьому зростає до 58,4–63,1 кВт·год/т (210–227 тис. кДж/т), що відображає більшу енергоємність процесів тонкоподрібнення та грануляції.

Технологічний вектор оптимізації твердофазних енергоносіїв у системах агломерації та огрудкування принципово спирається на концепцію мікродиспергування твердого палива (коксіка, антрациту) та його інтеграції у грануляційну шихту у вигляді фракцій <0,1 мм, що дає змогу перерозподілити теплогенеруючі функції між зовнішніми та внутрішньосферними джерелами теплоти. Зовнішня подача рідкого або газоподібного палива при цьому зберігає роль поверхневого нагрівального фактора в зоні спікання.

Індустріальна реалізація технологій внутрішньосферного спалювання газу та введення тонкомолотого твердого палива, апробована на низці промислових

агломераційно-огрудкувальних машин, продемонструвала істотне підвищення питомої продуктивності та зменшення сумарних теплових витрат. Така технологічна трансформація уніфікує механізми теплоперенесення між процесами спікання агломерату й обкотишів і формує передумови для створення інтегрованих фабрик нового покоління, у яких теплова ефективність агрегатів визначається не лише видом та якістю палива, а й рівнем організації внутрішньосферного теплообміну.

Поступове обмеження використання природного газу в металургійних агрегатах — тенденція, що корелює зі зростанням екологічних ризиків енергетичного сектору та необхідністю збереження невідновлюваних ресурсів, — об'єктивно стимулює розвиток технологій газифікації твердих палив і їх застосування в якості альтернативних відновлювально-теплогенеруючих агентів.

Комплексний аналіз теплової ефективності агрегатів випалу обкотишів дає змогу структурувати чинники впливу на три системно взаємопов'язані групи:

Сировинні параметри, що охоплюють мінералогічну та гранулометричну характеристику концентратів, їх фізико-хімічну активність, а також природу, дисперсність та кількісний вміст добавок.

Технологічні параметри, пов'язані з температурно-часовими траєкторіями процесу випалу, режимами дегідратації, окиснення та твердофазних/рідкофазних перетворень.

Конструктивно-теплообмінні параметри, які охоплюють структуру зонування випалювальної машини, режими дуття, характеристики пальникових систем, схеми повітряно-газових перетікань, можливості автоматизованої адаптації теплових режимів і ступінь рекуперації відхідної теплоти.

Оскільки тепловий баланс агрегату є чутливим до варіювання будь-якого з означених параметрів, оцінка їх впливу на питомі витрати палива здійснюється через аналіз змін структурних елементів балансу за умови збереження сталої продуктивності та нормативної якості готових обкотишів.

Важливим елементом першої групи чинників є вміст твердого палива у шихті, оскільки він одночасно визначає внутрішньошарове теплогенерування, інтенсифікацію тепломасоперенесення та відновлювальний потенціал газової фази, що утворюється внаслідок карбонового реагування.

## 2.2. Динаміка окисно-відновних реакцій при спіканні обкотишів із шихт із додаванням твердого палива: термодинамічний та кінетичний аспекти

Інтеграція твердого палива у грануляційну шихту до стадії огрудкування становить одну з найбільш технологічно релевантних опцій, оскільки забезпечує утворення рівномірно диспергованих внутрішньошарових джерел теплоти та сприяє зміні окисно-відновної атмосфери в зоні випалу.

Літературні дані свідчать, що тонкодисперсні фракції (антрацитовий штиб, коксовий дріб'язок, відпрацьоване активоване вугілля) у концентраціях 0,5–1,0 % за масою повністю вигоряють під час окисного випалу, формуючи в середині гранули локальні точки теплової генерації. Спостережуване зниження температури спікання та відповідне скорочення витрат природного газу інтерпретуються як наслідок утворення легкоплавких розплавів, можливо обумовлених утворенням FeO у результаті карбон-відновних реакцій.

У системах металургійного спікання потреба в кількості рідкої фази визначається домінуючим механізмом ущільнення:

- мікромеханізм перегрупування частинок вимагає 25–30 % об'ємної частки рідкої фази;
- механізм розчинення–осадження здатний функціонувати за наявності мінімально 5 % об'ємної частки розплаву;
- формування твердофазного каркаса з тугоплавкого компонента не спричинює значного ущільнення.

Оскільки у виробництві обкотишів ключовим параметром є не максимізація щільності, а забезпечення регульованої пористості, яка гарантує відновлюваність і механічну стабільність у холодному та відновлювальному режимах, оптимальною вважається присутність 17–20 % маси рідкої фази [170].

Дослідження спікання вогнетривких порошків засвідчують, що формування рідкої фази у кількості 10–15 % маси запобігає деструкції контактів між зернами та сприяє капілярному стягуванню частинок, тоді як надмірне накопичення розплаву викликає структурне розпушення [171]. Найбільш сприятливими вважаються умови, за яких утворюється 2–20 % низьков'язкого й високозмочувального розплаву.

У рамках експериментального блоку для дослідження впливу композиції шихти й кінетичних параметрів спікання на властивості випалених обкотишів були застосовані три сорти магнетитового концентрату з диференційованим вмістом Fe, доломітизований вапняк та антрацит Донбаського регіону (табл. 2.1). Як зв'язувальну фазу використано вскришну глину, активовану гідроксидом натрію. Диспергування вапняку, бентоніту та антрациту здійснювалося до питомої поверхні 300–350 м<sup>2</sup>/кг у кульовому млині об'ємом 14 л.

Шихти формували з додаванням 1 % бентоніту та 15 % вапняку; до кожної модифікації вводили 0,0; 0,7 та 1,5 % антрациту. Після 10-хвилинного сухого змішування у чашовому грануляторі діаметром 0,8 м здійснювали зволоження та повторну грануляцію протягом 10 хв. Фракція 15–20 мм відокремлювалася та використовувалася як модельний матеріал для вивчення кінетики та термодинаміки спікання.

## Хімічний склад компонентів шихти, %

Елементи й оксиди	Компоненти шихти					
	Концентрат ЦГЗК			Вапняк	Бентоніт	Антрацит
	I	II	III			
Fe <sub>общ</sub>	65,7	66,8	68,2	0,5	4,33	0,75
FeO	23,65	24,35	28,75	-	0,61	-
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	61,6	63,2	65,48	0,71	5,51	1,07
SiO <sub>2</sub>	8,1	6,8	4,55	1,80	59,38	4,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,30	0,25	0,19	0,32	17,28	3,2
CaO	0,20	0,15	0,08	42,03	2,73	0,21
MgO	0,45	0,43	0,12	10,51	3,50	2,22
S	0,04	0,04	0,03	0,02	-	1,83
ППП	0,76	1,05	0,45	44,27	6,74	85,8
Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	0,08	0,16	0,03	0,02	2,85	-
Інші	4,82	3,57	1,12	0,34	1,4	3,0

Сирі гранули (обкотиші), отримані у вихідних експериментальних серіях, характеризувалися відносно стабільними реологічно-механічними параметрами: їхня вологість становила  $8,7 \pm 0,37$  %, тоді як границя міцності на одноосьовий стиск досягала  $0,83 \pm 0,40$  кг/обкот., а ударостійкість, визначена за критерієм кількості вільних падінь із висоти 0,5 м на сталеву поверхню, становила  $5,1 \pm 1,3$  циклів. Первинна пористість сирих обкотишів, визначена за класичними методиками об'ємно-вагового аналізу, дорівнювала  $32,4 \pm 1,3$  %, що дає підстави віднести структуру гранул до кластеризовано-пористих систем із підвищеним потенціалом для подальших дифузійно-кінетичних перетворень у високотемпературних умовах.

Спикання здійснювали у силітовій вертикальній шахтній електропечі, оснащених системою автоматизованої стабілізації температурного поля. У реакційний простір печі, що мав номінальні геометричні параметри  $100 \times 100 \times 500$  мм, занурювали ніхромовий касетний контейнер, у якому розміщували 20 попередньо висушених обкотишів разом з інкорпорованою термопарою. Гарячий спай термопари фіксували безпосередньо у центральній зоні об'єму касети, що забезпечувало реєстрацію температури в точці максимального

теплового навантаження. Після завершення циклу спікання гранули охолоджували на повітрі в дисперсно-розсипаному стані для мінімізації внутрішньої термонапруженості.

Температурні параметри спікання попередньо визначали згідно з отриманим регресійним рівнянням ( $R = 0,702$ ;  $K = 5,08$ ):

(2.1)

$$T_{\text{спік}} = f(\omega_{\text{Fe}}, \omega_{\Sigma\text{окс}}, \omega_{-0,05 \text{ мм}})$$

де параметри  $\omega_{\text{Fe}}$ ,  $\omega_{\Sigma\text{окс}}$  і  $\omega_{-0,05 \text{ мм}}$  позначають відповідно масову частку заліза, сумарний вміст шлакоутворювальних оксидів ( $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ) та ін., за винятком оксидів заліза), а також частку тонкодисперсної фракції з розміром частинок менше 0,05 мм. Встановлена температурна залежність корелює з отриманням обкотишів, які цілком задовольняють вимогам доменної металургії за параметрами міцності в холодному стані, стабільності під час відновно-теплової обробки й структурної цілісності після фазових перетворень.

Підгонка рівняння забезпечила достатньо високу збіжність прогнозованих і експериментальних значень температури для широкого інтервалу композиційних варіацій шихти: вмісту Fe від 53 до 68 %, шлакоутворювальних оксидів — 4,9–26 %, тонких класів (фракція  $-0,05 \text{ мм}$ ) — 60–99,8 %. Під час проведення серійних випалів (по три досліди на кожний варіант) задану температуру корегували згідно з фактичними даними термопари.

У випалених обкотишах визначали хімічний склад рудної та шлакової зв'язки, а також фактичну пористість. Показники проміжної пористості при температурах, що на 100–150 °C нижчі від індивідуальної температури спікання, розраховували за втратами маси під час прожарювання, що відповідає стадії, коли кальцит та інші карбонати повністю дисоціюють, а тверде паливо зазнає майже повного вигорання, формуючи систему пор перед початком рідкофазного спікання.

Механічну міцність випалених обкотишів на одноосьовий стиск визначали експериментально, тоді як їхні показники подрібнюваності та стираності обчислювали на підставі множинних статистичних залежностей, наведених у [72]. Інтегральні експериментальні результати систематизовано у табл. 2.2.

Під терміном «проміжна пористість» розуміють поровий простір у гранулах, нагрітих до  $\approx 1100^\circ\text{C}$ , у яких відбулися (1) повна декарбонізація вапняку та інших карбонатів, і (2) майже повне вигорання вуглецевмісної добавки, тобто це є структурний стан, що передує рідкофазному ущільненню. Попри те, що об'ємна частка антрациту в сухому обкотиші приблизно у 2,5 раза перевищує його масову частку (через меншу густину), його вплив на проміжну пористість залишається мінімальним, оскільки загальний вміст палива обмежений верхнім значенням 1,5 мас. %.

Показники	Шихти								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Температура спікання, °С	1280	1290	1350	1240	1260	1280	1230	1240	1260
Тривалість спікання, хв.	20	15	12	20	15	12	20	15	12
Вміст, %									
- Fe <sub>общ</sub>	65,0	65,75	66,5	60,1	60,7	62,3	55,2	55,6	55,8
- FeO	5,24	9,51	14,15	3,88	8,11	11,85	2,6	6,56	10,38
- ШШУ (сума шлакоутворювальних)	14,5	11,9	6,9	17,4	15,3	10,3	21,3	18,6	13,8
- вуглецю антрациту в шихті	0,0	0,6	1,3	0,0	0,6	1,3	0,0	0,6	1,3
Основність, од.	0,072	0,077	0,055	0,51	0,57	0,77	1,0	1,15	1,33
Проміжна пористість, %	33,16	34,95	36,1	39,38	41,17	42,32	45,66	47,75	48,6
Зменшення пористості при спіканні, %	-8,2	-10,5	-12,7	-13,9	-14,6	-15,6	-18,4	-21,3	-24,1
Об'ємний склад, %	69,6	65,2	63,2	50,8	40,5	31,8	33,3	26,5	20,5
- гематит	4,9	10,3	13,5	24,2	32,3	40,5	38,5	46,3	55,0
- шлакова зв'язка	25,5	24,5	23,3	25,0	27,2	27,7	28,2	27,2	24,5
- пористість									
Металургійні властивості:	253	180	145	225	125	н.о	н.о	н.о	н.о
- опір стиску, Р, кг/ок	92,3	94,3	95,0	90,5	94,3	96,3	88,6	93,6	98,0
У холодному стані	5,5	4,2	2,2	6,5	3,3	2,0	7,7	4,4	1,0
- подрібнення, В <sub>+5</sub> , %									
- стиранність, В <sub>-5</sub> , %	65,6	70,1	78,5	62,3	65,3	83,3	60,0	78,3	88,3
При відновленні:	16,8	16,1	8,8	13,6	11,5	9,6	12,5	8,6	5,6
- подрібнення, В <sub>+5</sub> , %	58,3	48,3	35,5	49,1	40,8	36,5	38,2	33,3	30,3
- стиранність, В <sub>-5</sub> , %									
Відновлюваність, R, %									

Вуглецевий компонент антрациту, інтегрований у гранульовану мінерально-флюсувальну матрицю, демонструє багатофункціональний каталізувальний вплив на ініціацію та подальшу інтенсифікацію рідкофазоутворення в обкотишевих системах, що перебувають у зоні термодинамічно керованого високотемпературного реагування. У середньофлюсованих і, особливо, у високофлюсованих гранулах із максимальною концентрацією горючого вуглецю формується така надмірна кількість рідкої фази, яка, діючи через механізм зниження ефективної в'язкопластичної міцності структурного каркаса, спричиняє інтенсивну адгезію сусідніх гранул і їхню макроскопічну деформацію. За таких умов фізично коректне визначення межі міцності на стиск стає методично неможливим, оскільки гранули втрачають морфологічну стабільність ще в межах перехідних режимів завершальної стадії спікання.

Особливої уваги заслуговує спостережуваний ефект істотно підвищеної частки рідкої фази у температурних діапазонах, що забезпечують гарантоване

досягнення доменно-нормованих параметрів механічної міцності — як у холодному стані, так і за умов відновлювально-теплого навантаження. Така інтенсифікація рідкофазного спікання є системно вираженою у високоофлюсованих гранулах із підвищеним вмістом вуглецю, демонструючи принципову відмінність від результатів, зафіксованих за занижених температур спікання, коли рідкофазова складова зростала помітно повільніше, а еволюція порового простору йшла із суттєвими затримками.

З урахуванням закономірностей формування міжзернової когезії та газопереносних властивостей обкотишів, оптимальний інтервал вмісту рідкої фази у структурі випалених гранул становить, згідно з усталеними матеріалознавчими критеріями, 15–25 %. Саме такий діапазон забезпечує достатню міцність в умовах як холодного статичного навантаження, так і відновлення, не руйнуючи при цьому необхідної для доменної газодинаміки відкритої порової структури та не індукуючи надмірне ущільнення, що могло б призвести до погіршення відновлюваності.

Регуляція кількісного рівня шлакової зв'язки у випалених гранулах різної основності здійснюється за допомогою двох взаємодоповнювальних методів:

варіюванням заданої температури спікання, що дозволяє термодинамічно зміщувати межі формування рідкої фази;

цілеспрямованим підвищенням частки твердого вуглецевмісного компонента, який, беручи участь у локалізованих окисно-відновних реакціях та виділенні теплоти *in situ*, підвищує внутрішньогранульну температуру та, відповідно, інтенсифікує обсяг рідкофазних утворень навіть за загального зниження температурного фону спікальної апаратури.

Синергізм цих двох чинників — термокінетичний та хіміко-фазовий — створює технологічно значущий механізм керування шлакоутворенням у тонкоструктурованих композиційних системах типу «концентрат–флюс–тверде паливо».

## Визначення температури плавлення суміші концентрату ЦГЗК із вуглецевмісним матеріалом

З метою квантитативного встановлення температурного інтервалу плавлення комплексних мінерально-вуглецевих сумішей, а також для уточнення фазових меж і параметрів в'язкопластичних переходів, була проведена серія високотемпературних експериментів у режимі фіксації мікроструктурних трансформацій *in situ* з використанням високоточного оптичного мікроскопа МНО-2 виробництва Carl Zeiss. Цей прилад дозволяє реєструвати початкові, проміжні та кінцеві стадії плавлення в реальному часі з мінімальним похибковим дрейфом, що забезпечує достовірність визначення температури деформації, конусопадіння та повного розплавлення.

Як базові компоненти для приготування шихти використовували залізорудні концентрати різного ступеня збагачення, коксик, вапняк і аргеліт, які відрізнялися як хімічним складом, так і теплофізичними характеристиками, що визначають їхню реакційно-фазову поведінку в діапазоні високих температур. Характеристичний хімічний склад вихідних матеріалів (мас. %) подано нижче:

	<b>Fe<sub>общ</sub></b>	<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>
№ 1	65,6	0,4	0,24	7,5
№ 2	66,4	0,1	0,16	7,6
	<b>A</b>	<b>S</b>	<b>C<sub>орг</sub></b>	
Коксик	17,3	1,577	81,4	
Аргелит	39,65	1,117	60,4	
		<b>CaO</b>	<b>MgO</b>	<b>SiO<sub>2</sub></b>
Вапняк		39,8	11,7	1,26

Зразки для високотемпературних випробувань формувалися шляхом уніфікованого пресування гранульованої суміші вихідних матеріалів у вигляді циліндричних компактів, каліброваних до діаметра 2,2 мм та висоти 2 мм. З метою забезпечення максимально однорідного просторового розподілу компонентів та мінімізації локальних хімічних та гранулометричних флуктуацій, шихта підлягала попередній інтенсивній диспергувально-розподільчій обробці у лабораторному вібраційному млині протягом 30 секунд. Така процедура

дозволяла отримати високостатистично однорідну композиційну систему, у якій дифузійно-контрольовані процеси спікання могли бути відтворені з мінімальною експериментальною похибкою.

Підготовлені циліндричні зразки розміщували у зоні високотемпературного нагрівання мікроскопа МНО-2 на опорній підставці з твердоспеченого корунду (алунду), що характеризується високою хімічною інертністю та стабільністю у широкому діапазоні температур. Температура у безпосередній локальній околі зразка контролювалася платиноплатинородієвою термопарою, розташованою таким чином, щоб мінімізувати просторовий температурний градієнт між чутливим елементом та поверхнею зразка. Вимірювальна точність цього температурного каналу становила  $\pm 1\%$ , що забезпечувало високу достовірність фіксації точок структурних перетворень.

Термічний режим нагрівання формувався за програмою з двома характерними швидкостями: у діапазоні до  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  швидкість становила приблизно  $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ , а за температур, вищих за цю межу, нагрівання уповільнювалося до  $\approx 8\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ . Така стратифікація термокінетики дозволяла уникнути передчасного розпаду структурно-чутливих фаз та забезпечувала коректну фіксацію початкових та проміжних стадій плавлення.

Результати експериментальних спостережень, представлені у таблиці 2.3, однозначно свідчать, що початкова стадія плавлення — точніше, початок оплавлення, який реєструють за появою характерного розтікання нижніх кутів зразка — фіксується в інтервалі  $1490\text{--}1520\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В окремих випадках спостерігалася рання поява вертикальної усадки, що вказує на ініціацію в'язкопластичного деформування за нижчих температур порівняно з температурою початку поверхневого розтікання. Інтервал повноцінного плавлення, визначений як температурна зона між початком структурної деформації та формуванням однорідної рідкої фази, варіює у діапазоні  $1560\text{--}1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що корелює зі змінами фазового складу шихти та умовами газової атмосфери.

Беручи до уваги, що температури плавлення індивідуальних оксидів  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  та  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  становлять відповідно  $1563\text{ }^\circ\text{C}$  та  $1597\text{ }^\circ\text{C}$ , а ці величини практично збігаються з експериментально встановленими межами плавлення, можна з високою імовірністю стверджувати, що гематит і магнетит виступають доміантними фазовими складовими системи. Водночас присутність у шихті термодинамічно менш тугоплавких фазових утворень — таких як  $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $1190\text{ }^\circ\text{C}$ ),  $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  ( $\approx 1450\text{ }^\circ\text{C}$ ), фаяліт  $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$  ( $1217\text{ }^\circ\text{C}$ ) та інших комплексних силікатно-феритних сполук — зумовлює формування багатоконпонентного рідкого розплаву, який істотно розширює діапазон плавлення та сприяє більш ранньому переходу до в'язкопластичного стану.

Дослід №	Середовище	Склад шихти	Температура, °С	
			Початку розм'якшення	Плавлення
1	Ar	K1	1520	1570-1595
2	Ar	K1+0,6 арг.	1520	1600-1610
3	Ar	K1+1,2 арг.	1520	1600-1610
4	Ar	K1+10,7 изв.	1440 нач. усадки, 1520	1580-1605
5	Ar	K1+0,6 кокс	1520	1600-1610
6	Ar	K1+1,2 кокс	1520	1600-1610
7	Ar	K1+10,7 изв.+1,2 кокс	1360 нач усадки, 1500-1510	
8	повітря	K1	1575	1580-1590
9	повітря	K1+1,2 кокс	1490-1500	1570-1580
10	повітря	K2	1520	1575-1595
11	повітря	K2+11,7 изв	1450 н.вус., 1540	1560-1580
12	повітря	K2+11,7 изв +1,2 кокс	1470 н.уус., 1540	1560-1580
13	повітря	K2+1,2 кокс	1520	1560-1600
14	повітря	K1+0,6 кокс	1515	1580-1590
15	повітря	K2+0,6 кокс	1520	1560-1600
16	повітря	K1+10,7 изв. + 0,6 КОКС	1460 н.у.с., 1560	1560-1600
17	повітря	K2+10,7 изв. + 0,6 кокс	1500-1515	1570-1620
18	повітря	K1+10,7 изв. + 0,6 аргелит	1465 н.у.с. 1520	1560-1610
19	повітря	K1+0,6 аргелит	1520	1560-1610

Температура початку розм'якшення, °С, фіксувалася на основі появи характерного морфологічного ефекту — округлення нижніх кутів зразка, що свідчить про перехід твердої фази у в'язкопластичний стан. Температура повного плавлення, °С, визначалася за критерієм редукції висоти зразка до величини, меншої за дві поділки мікрометричної координатної сітки мікроскопа, що відповідає практично повній втраті геометричної стабільності та переходу до рідкофазної однорідності.

Незважаючи на присутність у системі низки термодинамічно менш тугоплавких оксидних і силікатно-феритових сполук, їхня порівняно незначна кількість не чинить суттєвого впливу на кінетичні параметри зміни форми зразків у температурних діапазонах їхнього повного плавлення. Можна припустити, що формування відповідних евтектичних та субевтектичних розплавів, а також їх часткова деструкція, корелюють зі спостережуваною значною вертикальною усадкою, яка, у ряді випадків, передуює фіксації явища оплавлення нижніх кутів зразка.

Суттєво важливим є той факт, що всі досліджені зразки після охолодження проявили магнітні властивості, що було однозначно встановлено за допомогою притягання зразків-підставок із затверділими розплавами до постійного магніту. Магнітна реакція охолоджених розплавів вказує на присутність єдиної магніточутливої фази — магнетиту, що може формуватися як у вигляді первинного магнетиту (незавершене окиснення вихідних магнетитовмісних компонентів), так і вторинного магнетиту, утворення якого термодинамічно можливе при температурах, що перевищують  $\approx 1450$  °C, унаслідок часткової дисоціації  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  за схемою, яка зміщує фазову рівновагу в бік формування  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Остаточна ідентифікація первинної/вторинної природи магнетиту вимагає проведення детальних петрографічних досліджень, що дозволило б уточнити якісний та кількісний фазовий склад отриманих розплавних продуктів.

### 2.3. Теплові та енергетичні витрати у виробництві залізорудних обкотишів

Найбільш енергоємною групою агрегатів у технологічному циклі виробництва обкотишів виступають вентиляційно-аспіраційні системи — зокрема вентилятори та димососи, що підтверджується даними таблиці 2.4. Питомі витрати електроенергії при виробництві обкотишів суттєво перевищують аналогічні значення для процесу агломерації. Така енергетична асиметрія обумовлена тим, що близько половини електричних витрат у процесі виробництва обкотишів пов'язано не з безпосередньою підтримкою

газодинамічних режимів, а з оптимізацією теплотехнічних умов, спрямованих на зниження споживання природного газу та забезпечення нормативних параметрів виробничої санітарії й безпеки.

Це пояснюється тим, що повітря, використане для спалювання природного газу у печах випалювання обкотишів, нагрівається під час проходження крізь шар охолоджуваних гранул, після чого повертається як підігріте дуття, сприяючи економії палива. У разі ж використання аналогічної теплотехнічної схеми при агломерації — тобто, якщо тепловий потенціал відпрацьованих газів агломерату застосовувати для підігріву дуття — питомі витрати електроенергії зблизилися б з аналогічними величинами у виробництві обкотишів.

Потужність, споживана вентиляційними машинами, прямо пропорційна як величині повного напору, так і об'ємній продуктивності повітряно-газової суміші. У разі агломерації екстаустер створює повний напір, приблизно у 2,0–2,5 рази більший, ніж у процесі спікання обкотишів. Проте масова частка газів, транспортування яких є необхідним у технологічному циклі виробництва обкотишів, у 3–5 разів більша, ніж при агломерації, а об'ємна частка — у 6–10 разів більша, що обумовлено значно вищою температурою газової фази.

Матеріальні витрати на виробництво обкотишів перевищують такі при агломерації не лише через енергетичні причини, але й унаслідок специфічних експлуатаційних особливостей спікальних візків. Підвищені температури, характерні для процесу випалювання обкотишів, суттєво скорочують термін служби спікаючих візків та колосникових решіток і збільшують витрати на їхнє виготовлення й ремонт, що підтверджує значно більша частка поточних ремонтів (див. табл. 2.5).

Розподіл настановних потужностей будівельних обсягів і довжин трактів по основних технологічних операціях на фабриках огрудкування, (%).

Показники	Границі змін на різних підприємствах
Потужність:	
підготування шихти	2,7 – 15,3
дозування	0,03 – 0,7
змішування	0,5 – 1,4
огрудкування	6,3 – 13,7
огрудкувачі	2,6 - 10,2
спікання (вентилятори)	78,4 – 89,2
Обсяги ділянок:	
підготовка шихти	4,7 – 10,0
огрудкування	18,7 – 25,5
спікання	66,3 – 74,5
Довжини трактів:	
підготовка шихти	17,4 – 40,0
огрудкування	36,0 - 60,0
спікання	25,2 – 46,6

Таблиця 2.5.

Технічні показники роботи фабрик огрудкування.

Показники	Виробництво	
	Агломерату	Обкотишів
Питома продуктивність (т/м <sup>2</sup> година)		
Коефіцієнт використання устаткування, %	0,7 – 1,9	0,67 – 0,92
Частка простоїв:	87,1 – 95,9	90,1 – 69,0
планово-запобіжні	1,3 – 6,0	7,9 – 20,0
капітальні ремонти	0,6 – 3,6	3,0 – 7,0
поточні	0,2 – 8,5	0,2 – 11,0
Витрати по переробці на 1 т продукції:		
електроенергія, кВт год	21,0 – 54,9	47,1 – 73,0
природний газ, м <sup>3</sup> на 1 т	4,0 – 12,0	11,9 – 53,8
твердого палива, кг	51 – 66,0	-
теплоти, тис. ккал.	410 – 590	98 – 434
води, м <sup>3</sup>	0,2 – 5,8	0,5 – 6,8
стиснене повітря, м <sup>3</sup>	4,5 - 33,0	2,2 – 5,3
сталевих куль, кг	-	0,01 – 0,08
колосників, кг	0,07 – 0,117	0,08 – 0,155
транспортної стрічки, м <sup>2</sup>	0,002 – 0,009	0,01 – 0,033

2.3.1. Газопроникність шару обкотишів та її вплив на енергоспоживання

Комплексний аналіз енергетичних витрат, асоційованих із технологіями виробництва як агломерату, так і залізорудних обкотишів, засвідчує, що домінуюча частка споживаної електроенергії витрачається на транспортування технологічних газових потоків у відповідних теплотехнологічних зонах. У випадку агломерації генерація газів відбувається безпосередньо в об'ємі спікаємого шару внаслідок горіння твердого палива за рахунок інтенсивного просмоктування повітря крізь шар шихти. Вивільнена теплота слугує термодинамічним джерелом, що забезпечує випарування вологи, розклад гідратів і карбонатів, прогрів та часткове розплавлення компонентів — тобто ініціює й підтримує процес мінерально-фазового формування агломерату.

У процесі спікання обкотишів газ-теплоносій має іншу природу: він є продуктом повного або часткового згорання газового чи рідкого палива у спеціалізованих пальникових системах, після чого його примусово або під дією розрідження фільтрують через шар вже частково загартованих гранул. Тривалість окремих кінетичних стадій (сушіння, нагрівання, твердотільного та рідкофазного спікання, а також охолодження) на конвеєрних випалювальних машинах та аналогічних апаратах визначається, насамперед, газопроникністю шару, оскільки саме теплоносій доставляє необхідну теплоту для забезпечення тепломісткості технологічних перетворень.

Шихта агломерату та обкотиші є типовими гранульованими сипучими середовищами, структурована організація яких визначається окремими частками, що перебувають у механічному контакті, формуючи міжчасткові порові канали з неоднорідною морфологією (звивисті канали зі змінним поперечним перетином). У контексті газодинаміки як режим обтікання окремих частинок, так і фільтраційний рух по порових каналах описують однакові енергетичні закономірності; проте в аналітичному описі поведінки шару обкотишів доцільнішим є використання моделі канального руху, з огляду на те, що в зонах часткового плавлення матриця шару втрачає сипучість, трансформуючись у квазімонолітну структуру з різко зниженою міжгранульною пористістю.

Газодинамічний опір шару описується рівнянням (2.2):

$$\Delta P = \lambda \frac{h}{d_{\text{екв}}} \frac{\rho w^2}{2(1 - \varepsilon)^3} \quad (2.2)$$

де

$\Delta P$  – втрати напору;

$\lambda$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$h$  – висота шару;

$d_{\text{екв}}$  – еквівалентний діаметр частинок;

$\rho$  – густина газу;

$w$  – фільтраційна швидкість;

$\varepsilon$  – пористість шару.

Найсерйознішу проблему при практичному застосуванні рівняння (2.2) становить визначення коефіцієнта  $\lambda$ , який нелінійно залежить від властивостей газу, гранулометрії шару та режиму течії. Найбільш комплексно ця залежність описується через число Рейнольдса:

$$Re = \frac{w d_{\text{екв}}}{\nu} \quad (2.3)$$

де  $\nu$  – кінематична в'язкість газу.

У реальних режимах агломерації та спікання обкотишів існує перехідний діапазон течії (150–800), для якого застосовують кореляції виду:

$$\lambda = A_1 + \frac{A_2}{Re} + BRe \quad (2.4)$$

Після трансформації (2.4) отримують робочу формулу (2.5):

$$\Delta P = K h \rho w^2 \quad (2.5)$$

де  $K$  — узагальнений емпіричний коефіцієнт, який інкорпорує властивості матеріалу й газу:

$$K = A_1 + A_2 + B \quad (2.6)$$

Максимальні газодинамічні опори при агломерації відповідають високотемпературним зонам, де відбуваються інтенсивний прогрів та плавлення компонентів шихти. Для обкотишів, що спікаються на конвеєрних колосникових машинах і кільцевих охолоджувачах, характерним є вертикальний рух газів:

зверху вниз або знизу нагору під дією розрідження або надлишкового тиску. У шахтних печах фільтрація завжди спрямована знизу догори.

З урахуванням того, що газ-теплоносій є продуктом горіння з коефіцієнтом надлишку повітря 1,5–3,0, у технічних розрахунках припускають сталу густину газу  $\approx 1,25\text{--}1,27 \text{ кг/м}^3$ . Швидкість фільтрації:

$$\omega = \sqrt{\frac{2\Delta P g}{\lambda H \gamma_0 (1 + \alpha t)}} \quad (2.7)$$

За промислово типовими значеннями параметрів ( $d = 0,0125 \text{ м}$ ,  $H = 0,40 \text{ м}$ ,  $\gamma_0 = 1,27 \text{ кг/м}^3$ ) рівняння

(2.7) спрощується до виду (2.8):

$$\omega = C\sqrt{\Delta P} \quad (2.8)$$

Опір шару зростає не пропорційно температурі, а переважно внаслідок структурних трансформацій — усадки при сушінні, спіканні та оплавленні або злипання гранул при перезволоженні.

Підвищення температури газу збільшує його в'язкість, що спричинює зменшення  $Re$  та підвищення гідравлічного опору шару. На основі узагальнених даних щодо офлюсованих та неофлюсованих обкотишів отримано емпіричну залежність:

$$\lambda = f(T, \varepsilon, d) \quad (2.9)$$

Спосіб спікання має суттєвий вплив на газопроникність: при спаленні газу над шаром температура середовища є значно вищою, ніж при горінні всередині шару або при використанні твердого палива, що обумовлює більш низьку газопроникність і меншу питому продуктивність.

Безполуменне згоряння газоповітряних сумішей, близьких до стехіометрії, призводить до надмірного перегріву шару. Тому застосовують бідні суміші з концентрацією горючого нижче межі запалювання, які горять лише на розігрітій поверхні гранул.

### 2.3.2. Механізми теплопередачі під час процесу спікання обкотишів

Теплопередача визначає термічний баланс спікального процесу, впливаючи на питомі витрати палива, ступінь завершеності фазово-структурних перетворень та остаточні фізико-механічні властивості обкотишів. Оскільки спікання є шаровим процесом із переважаючою фільтраційною конвекцією, домінуючий внесок вносить конвективний перенос теплоти.

Конвективний прогрів може реалізовуватися у двох принципово різних режимах:

Режим теплового фронту

Гарячий газ, проникаючи в шар, нагріває його поверхневі горизонти до власної температури. Поки фронт не досяг нижньої межі шару, теплота передається у глибину доти, доки газ охолоджується до температури вихідної шихти. Відстань між точкою максимальної температури газу та точкою мінімальної температури матеріалу визначає ширину теплового фронту. Процес вважається завершеним, коли максимум температури досягає нижнього горизонту шару.

Прогресування теплового фронту в товщі шару кускового матеріалу слід трактувати як швидкість переміщення локального максимуму температури вздовж напрямку циркуляції високотемпературного газового потоку, що, у свою чергу, визначає інтенсивність термічної активації матеріалу на різних горизонтах шару; такий режим нагрівання вирізняється підвищеною енергетичною інтенсивністю та значним газодинамічним опором, обумовленим повним прогріванням матеріальної маси до максимально можливого температурного рівня, що відповідає акумуляції теплової енергії в інтервалі 150–250 ккал/кг.

У разі застосування теплової хвилі, яка розповсюджується по шару кускового матеріалу, за фронтом нагрівання невідмінно формуються умови для виникнення фронту охолодження, у межах якого холодне атмосферне повітря піддається поступовому підігріванню до температури, що обмежується тепловим запасом матеріалу та інтенсивністю конвективно-кондуктивного теплообміну, тобто фактичним ступенем завершення процесу передачі теплоти; ширина фронту охолодження охоплює температурний інтервал від мінімальної температури зовнішнього повітря до значення, при якому ініціюється активне охолодження

обкотишів, формуючи тим самим регіон фазового контрасту в тепловому полі шару.

Формування теплової хвилі в матеріальній товщі може відбуватися двома принципово відмінними шляхами: перший – при наявності у складі шару внутрішніх джерел теплоти, до яких належать горючі компоненти (тверде паливо, сірковмісні сполуки, магнетит), що здатні самостійно ініціювати екзотермічну реакцію; другий – у разі, коли теплоносій включає зовнішні горючі компоненти, здатні до екзотермічного згоряння на поверхні розігрітих часток. У цьому контексті вигорання внутрішніх горючих компонентів створює локальні умови для формування фронту охолодження, причому зазначені джерела теплової енергії активуються саме на фронті нагрівання та втрачають свою активність на фронті охолодження, тоді як зовнішні джерела тепла, навпаки, ініціюють процес горіння на фронті охолодження та завершують його на фронті нагрівання, сприяючи тим самим поступовому розширенню теплової хвилі та уповільненню швидкості переміщення фронту охолодження.

Очевидно, що витрати теплоти та газодинамічний опір шару при реалізації нагрівання тепловою хвилею є суттєво меншими, ніж у випадку фронтального нагрівання, оскільки тепла енергія, що виділяється в зоні охолодження, частково рекуперується в зоні нагрівання матеріалу, знижуючи середню температуру шару та оптимізуючи розподіл теплового навантаження. Основним недоліком обох методів є значна нерівномірність температурного поля по висоті шару: при фронтальному нагріванні нижні горизонти досягають менших температур порівняно з верхніми, що обумовлено тим, що підвищення температури у нижніх шарах призводить до зниження продуктивності процесу та збільшення теплових втрат із відхідними газами; таким чином, час перебування матеріалу нижніх горизонтів при високих температурах скорочується, а механічна міцність обкотишів нижніх шарів може бути у два і більше разів меншою, ніж у верхніх горизонтах.

У процесі просування теплової хвилі величина рекупераційної теплоти збільшується поступово, забезпечуючи більш рівномірний розподіл теплоти по висоті шару; при рівномірному розподілі твердого палива нижні горизонти отримують значно більший тепловий ресурс, ніж верхні, що зумовлює покращення однорідності температурного поля. Найбільш збалансований температурний режим досягається шляхом комбінованого застосування фронтального та хвильового методів нагрівання з використанням комбінованого палива – твердого, інтегрованого у шихту, та газоподібного або рідкого, що спалюється над шаром.

Теплообмін при фільтрації газу через шар кускового матеріалу відбувається одночасно на межі контактної поверхні газ–частка та в об’ємі самих часток; для математичного опису процесу агрегації та спікання обкотишів прийнято, що основна частка теплоти передається конвекційним шляхом, а внутрішнім тепловим опором дрібних часток можна знехтувати через їх малі розміри та високу теплопровідність, тобто через незначне відношення характерного розміру часток до товщини шару.

У виділеному елементарному об’ємі шару кількість теплоти, переданої газом матеріалу, визначається як сумарна величина теплоти, втраченої газами, та кількості теплоти, поглинутої матеріалом, що забезпечує локальну термодинамічну рівновагу в межах конкретного об’єму та визначає інтенсивність прогресування термічного фронту.

$$dQ = \alpha_v (t_g - t_m) \cdot dV \quad (2.10)$$

$$dQ = -c_g \cdot \omega \frac{\partial t_g}{\partial t_m} \cdot dV \quad (2.11)$$

$$dQ = c_m \cdot \rho_m \cdot (1 - \varepsilon) \frac{\partial t}{\partial \tau} \cdot dV \quad (2.12)$$

де

$t_g, t_m, c_g, c_m$  – відповідно температура й теплоємність газу й матеріалу;

$\alpha V$  - об'ємний коефіцієнт теплопередачі;

$dv = dx \cdot dy \cdot dz$  – елементарний об'єм сипучого матеріалу, який має порізність  $\varepsilon$ ;

$\omega$  – швидкість фільтрації газу;

$\rho_m$  – щільність матеріалу;

$\tau$  – час.

З рівнянь 2.10 – 2.12 знаходять зміну температури по висоті шару, яка практично дорівнює температурі матеріалу й швидкість зміни температури матеріалу в часі.

$$\frac{dt_g}{dy} = -\frac{\alpha_v}{c_g \cdot \omega} (t_g - t_m) \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\alpha_v}{c_m \cdot \rho_m (1 - \varepsilon)} \cdot (t_g - t_m) \quad (2.14)$$

Для скорочення числа змінних величин і одержання узагальнених результатів уведемо безрозмірні величини:

Температура газу:

$$\Theta_g = \frac{t_g - t_{m0}}{t_{g0} - t_{m0}} \quad (2.15)$$

Критерій висоти:

$$G = \frac{\alpha_v \cdot y}{c_g \cdot \omega} \quad (2.16)$$

Критерій часу:

$$Z = \frac{\alpha_v \cdot \tau}{c_m \cdot \rho_m (1 - \varepsilon)} \quad (2.17)$$

Відношення критеріїв часу й висоти дорівнює відношенню водяних чисел потоків газу й матеріалу:

$$\frac{Z}{G} = \frac{c_g \cdot \omega \cdot \tau}{c_m \cdot \rho_m (1 - \varepsilon) \cdot y} = \frac{W_g}{W_m} \quad (2.18)$$

Середні температури матеріалу й газу рівні:

$$t_{mcp} = t_{m0} + \Theta_m^{cp} (t_{g0} - t_{m0}) \quad (2.19)$$

$$t_{gcp} = t_{g0} - \frac{G}{Z} (t_{mcp} - t_{m0}) \quad (2.20)$$

Відхилення від зазначеної закономірності виявляється у вигляді помітного зростання інтенсивності теплопередачі за умов реалізації процесу спікання

обкотишів із використанням твердого палива. Це пояснюється тим, що формування теплового режиму зернистого шару в подібних технологічних схемах визначається комплексом взаємопов'язаних чинників, серед яких домінуючими є спосіб підведення теплоти до шару, фізико-хімічні характеристики матеріалу, зокрема основність обкотишів, а також тривалість перебігу високотемпературної стадії термічної обробки (табл. 2.6).

За умов спікання обкотишів при спалюванні газоподібного або рідкого палива над поверхнею шару теплообмінні процеси доцільно розглядати через призму формування та поширення так званого теплового фронту. Його параметри, насамперед швидкість переміщення та просторова протяжність, визначають характер прогрівання шару та інтенсивність передавання теплоти від газової фази до твердого матеріалу. Тепловий фронт являє собою об'ємну зону в межах шару, обмежену двома умовними горизонтальними площинами, які відповідають різним температурним рівням матеріалу: від початкових значень порядку 20–50 °С до максимальних, що досягають приблизно 1200–1300 °С. Відстань між зазначеними температурними межами інтерпретується як ширина теплового фронту, величина якої значною мірою залежить від гранулометричних параметрів матеріалу, передусім від діаметра окремих обкотишів.

Переміщення цієї високотемпературної зони крізь шар відбувається в напрямку руху теплоносія та визначається головним чином швидкістю фільтрації газового потоку крізь пористу структуру матеріалу. Завершення процесу спікання фіксується в момент, коли температурний максимум теплового фронту досягає нижньої межі шару — постелі. У цей період весь об'єм матеріалу в межах шару встигає прогрітися до температур, близьких до температури газового середовища, що створює необхідні умови для формування міцної структури спечених обкотишів.

Інша картина спостерігається у випадку використання твердого палива, коли термічний режим шару набуває більш складної динаміки. У цьому разі процес теплообміну не обмежується лише формуванням фронту нагрівання, а супроводжується одночасним виникненням фронту охолодження. Взаємодія цих

двох зон формує специфічну теплову структуру, що в літературі описується як тепла хвиля. Її просування крізь шар характеризується послідовним переміщенням області максимальних температур, і процес спікання вважається завершеним тоді, коли ця зона проходить усю товщу шару та досягає постелі.

Характерною особливістю такого режиму є просторове розділення стадій горіння твердого палива: ініціація займання відбувається у зоні фронту нагрівання, тоді як завершення процесу вигорання палива відбувається вже в області фронту охолодження. Саме ця особливість визначає відмінності у тепловому балансі процесу порівняно зі схемою, що базується на поширенні лише теплового фронту.

При традиційному механізмі спікання, який характеризується наявністю лише фронту нагрівання, на завершальній стадії технологічного циклу практично весь шар матеріалу перебуває при температурах, що відповідають інтервалу спікання. Подібний тепловий стан зумовлює підвищене винесення теплоти з відхідними газами, оскільки теплоакумулювальна здатність шару обмежена, а надлишкова тепла енергія не може бути ефективно утримана в матеріалі. Одночасно з цим спостерігається збільшення тривалості процесу, що пов'язано зі зменшенням температурного градієнта між газовим теплоносієм і матеріалом шару, а отже, зі зниженням інтенсивності теплопередачі.

Натомість реалізація процесу за механізмом теплової хвилі забезпечує іншу схему розподілу теплоти в об'ємі шару. На початкових етапах спікання відбувається більш інтенсивне акумулювання теплоти матеріалом, що пояснюється локалізацією температурного максимуму у верхніх горизонтах шару. У результаті створюються сприятливі умови для поступового перерозподілу теплової енергії по товщі матеріалу. При цьому загальна кількість теплоти, що надходить у високотемпературну область шару, а також теплота, яка виноситься потоком відхідних газів, залишається практично однаковою як у випадку реалізації теплового фронту, так і при поширенні теплової хвилі, що свідчить про подібність їх сумарного теплового балансу за істотно різного механізму формування температурного поля.

Параметри спікання обкотишів на колосникових решітках.

Показники	Спосіб спікання								
	Спалювання газу над шаром		Спалювання в шарі				Твердим паливом		
	Основність обкотишів								
Тривалість, хв:	0,0	0,5-0,7	1-1,5	0,0	0,5-0,7	1-1,5	0,0	0,5-0,7	1-1,5
Сушіння	5	5	6	5	5	5	4	6	5
Підігріву	5	7	8	5,5	6	9	6	10	7
Спікання	5	23	21	12,5	16	11	13	7	6
Охолодження	15	6	8	5	6	5	5	5	4
Усього процесу	5	6	8	28	33	30	28	28	22
Висота шару, мм	30	41	43	400	400	300	400	400	300
Продуктивність, т/(м <sup>2</sup> /година)	400	400	300	1,52	1,075	0,738	1,61	1,13	1,315
	1,43	0,826	0,54						
	Середня швидкість фільтрації (нм <sup>3</sup> /м <sup>2</sup> с)								
Сушіння	1,1	0,8	0,69	0,99	0,7	0,57	0,9	0,81	0,88
Спікання	1,2	0,84	0,62	0,85	0,7	0,64	0,48	0,5	0,7
Охолодження	1,0	0,95	0,55	0,35	1,28	1,13	0,8	1,26	0,95
	Температура фільтруємих газів, °С								
Сушіння	500	350	300	600	450	350	600	400	300
Підігрів	900	700	650	900	700	600	900	800	600
Спікання	1330	1250	1220	1120	1080	970	1080	1000	930
	Максимальний опір шару (мм вод.ст./див висоти шару)								
	23,8	17,3	23	19,3	15	15	10	10,7	16,7
	Коефіцієнти теплопередачі (ккал/(м <sup>3</sup> час. град.)								
Сушіння	1970	1430	1000	1480	920	670	1740	2930	3550
	15,7	11,7	8,0	11,8	7,25	5,4	13,9	12,5	11,4
Спікання	2210	1340	750	2450	1500	960	5020	3650	2730
	17,6	10,6	6,0	19,5	11,9	7,7	40	29,8	21,9
Охолодження	4140	3930	1450	5770	38,10	3140	3000	4500	4730
	15,8	14,35	4,28	16,5	14,1	11,2	11,5	10,6	16,6

Разом з тим, реалізація процесу спікання за механізмом поширення теплової хвилі характеризується істотно нижчими витратами палива. Експериментальні та промислові спостереження свідчать, що питомі витрати палива в цьому випадку зменшуються приблизно у 1,5–1,7 рази. Подібний ефект обумовлений більш раціональною організацією теплового балансу процесу, зокрема використанням теплоти, акумульованої у верхніх горизонтах шару обкотишів, для попереднього нагрівання газового потоку. Такий перерозподіл енергії стає можливим завдяки прояву явища теплової рекуперації, за якого частина теплоти, що в іншому випадку була б втрачена з відхідними газами, повертається до технологічного циклу та використовується для інтенсифікації процесу нагрівання (мал. 2.1).

Порівняльний аналіз температурних режимів спікання обкотишів у різних типах випалювальних агрегатів (мал. 2.2) демонструє суттєві відмінності в характері теплового впливу на матеріал. Так, у шахтна піч процес спікання відбувається за умов відносно низької швидкості підвищення температури, проте характеризується найбільш тривалим перебуванням матеріалу в області високих температур. Подібний режим забезпечує поступове формування структури спеченого матеріалу, але водночас супроводжується значною тривалістю технологічного циклу.

Інша картина спостерігається на комбінованих випалювальних комплексах типу колосникова решітка – обертова піч – кільцевий охолоджувач, де процес нагрівання обкотишів у температурному інтервалі 1000–1150 °С до максимальної температури спікання здійснюється порівняно повільно. У межах високотемпературної зони матеріал перебуває протягом 10–12 хв, причому завдяки безперервному обертанню печі кожен обкотиш піддається рівномірному термічному впливу, що сприяє однорідності його структури та підвищенню щільності.

Водночас зазначена технологічна схема має й певні конструктивно-технологічні обмеження. Зокрема, на стадії нагрівання обкотишів у високотемпературній зоні решітки фіксується найбільша, у порівнянні з іншими агрегатами, швидкість

підвищення температури, яка може досягати 500–600 °С/хв. Така інтенсивність теплового впливу потенційно здатна викликати нерівномірність структурних перетворень у матеріалі, особливо на ранніх етапах формування спеченої структури.

Для конвеєрна машина спікання характерною є інша специфіка теплового режиму. У цьому випадку обкотиші перебувають у зоні максимальних температур значно менший проміжок часу, що обумовлено загальною тривалістю проходження матеріалу через установку, яка становить приблизно 30 хв. Такий режим спричиняє обмежений час ефективного термічного зміцнення матеріалу, особливо у нижніх горизонтах шару.

Зокрема, для обкотишів, розташованих у нижній частині шару, тривалість перебування в інтервалі температур, що забезпечують інтенсивне формування міцної структури, становить лише близько 1 хв. Це призводить до формування вираженої нерівномірності спікання по висоті шару, що є одним із характерних недоліків конвеєрних машин подібного типу. Частково усунути зазначений недолік дозволяє введення до складу шихти певної кількості твердого палива, яке сприяє формуванню більш рівномірного температурного поля в об'ємі шару.

На завершальній стадії процесу спікання в шарі обкотишів акумулюється значна кількість теплової енергії. Раціональне використання цієї енергії в межах технологічного циклу створює передумови для зниження питомих витрат палива. Реалізація такого підходу здійснюється шляхом організації процесів теплової рекуперації, тобто повернення частини теплоти назад у технологічний процес.

Практично рекуперація теплоти здійснюється двома основними шляхами. По-перше, відхідні гази із зони спікання, температура яких залишається високою, а вміст кисню становить приблизно 10–15 %, спрямовуються на стадію сушіння сирих обкотишів. По-друге, повітря, що нагрівається під час охолодження спечених обкотишів, повторно використовується в технологічному циклі: зокрема, для підтримання процесу спалювання газоподібного палива над шаром

та для регулювання температури продуктів горіння в зоні спікання шляхом їх розбавлення.

У результаті такого багаторазового використання теплових потоків формується більш енергоефективна схема функціонування випалювального агрегату, що дозволяє істотно підвищити теплотехнічну ефективність процесу спікання обкотишів.

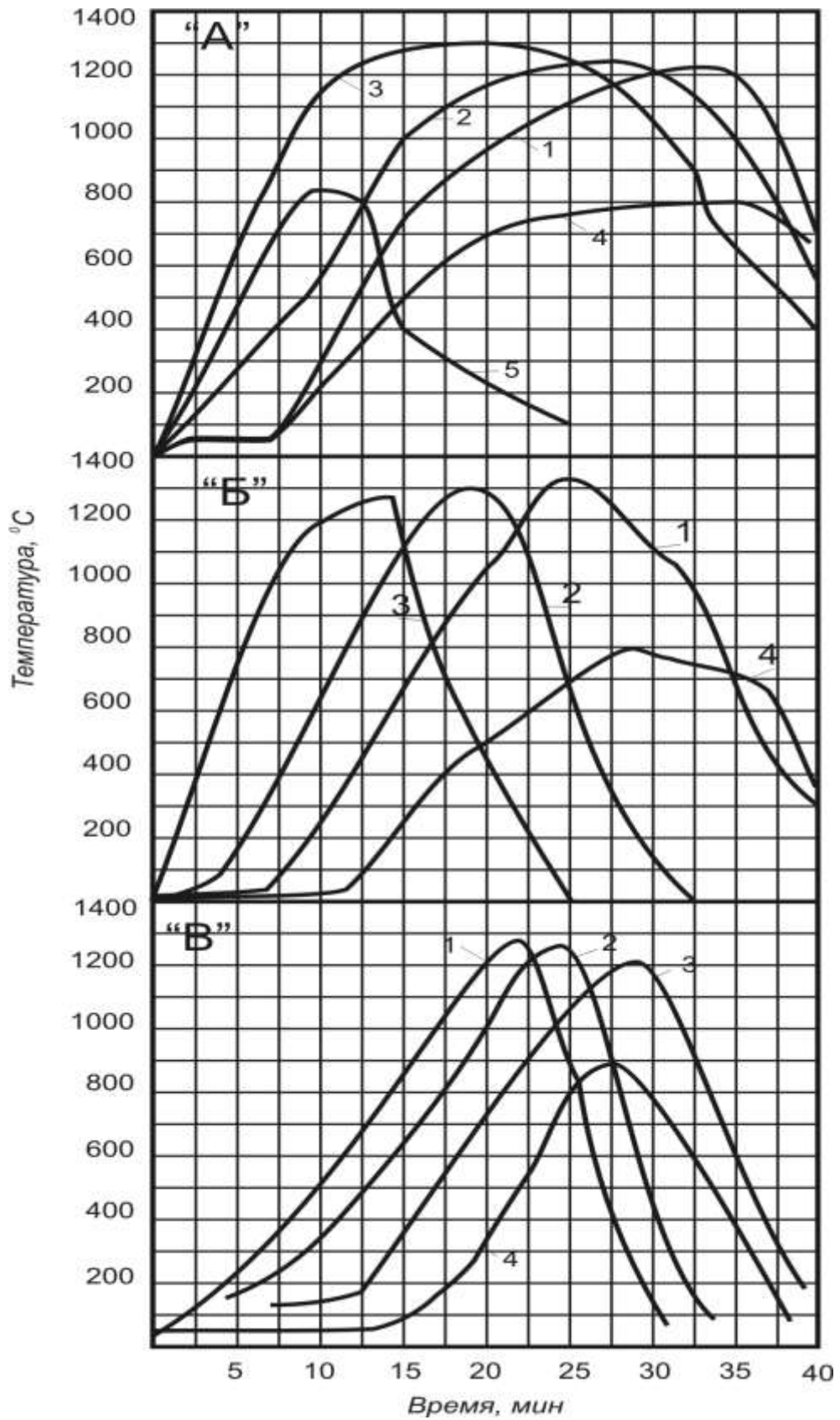


Рис. 2.1. Зміна температури по висоті шару.

А – неофлюсовані обкотиші; Б – неофлюсовані із твердим паливом; В – офлюсовані обкотиші. 1, 2, 3, 4, 5 – номер шару від колосникових решіток.

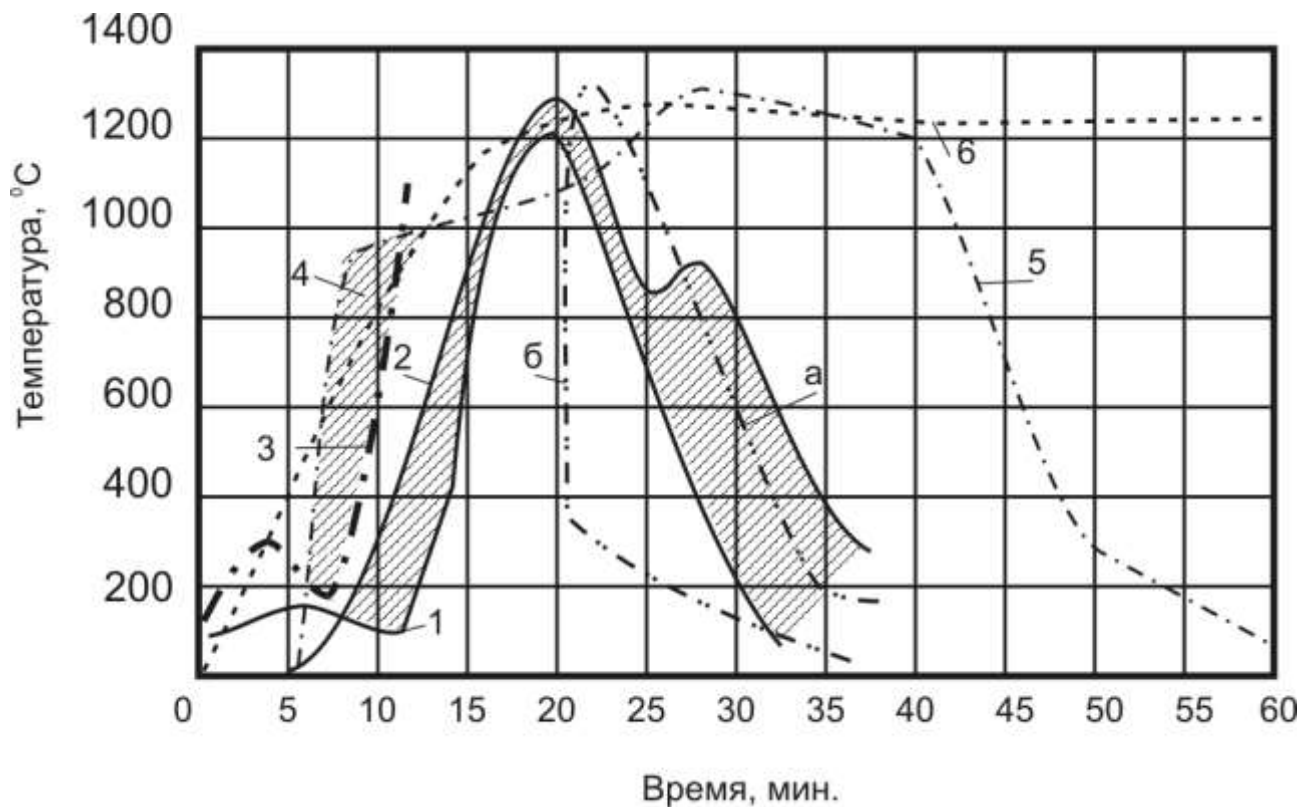


Рис. 2.2. Зміна температури обкотишів при спіканні:

- 1, 2 – унизу й угорі на конвеєрній машині при спалюванні газу над шаром;  
 а, б – те ж при спалюванні газу над шаром, у шарі й добавки в шихту твердого палива;  
 3, 4, 5 – відповідно внизу й угорі на комбінованій установці;  
 б – у шахтній печі.

### 2.3.3. Інтенсифікація процесу спікання обкотишів на конвеєрних агрегатах: технологічні та фізико-хімічні аспекти

Порівняльний аналіз питомої продуктивності окремих функціональних зон випалювальної конвеєрної машини за показником готової продукції демонструє, що на агрегатах з більшою площею робочого шару питома продуктивність перевищує аналогічні показники на 8–11,5%, що обумовлено одночасним підвищенням швидкості фільтрації теплоносія та його температурного потенціалу, які безпосередньо визначають інтенсивність теплообміну з обкотишами.

Зважаючи на те, що на всіх промислових комбінатах сирі обкотиші характеризуються майже однаковою вологістю (близько 9%) і пористістю (близько 30%), а також наявністю вихідних матеріалів (концентрату та вапняку) із кристалічною структурою та мінімальним вмістом гідратної води,

підвищення питомої продуктивності у зоні сушіння може бути досягнуто шляхом підняття тиску теплоносія до 800 мм вод. ст. та температури до 350 °С. Аналогічне збільшення продуктивності зон підігріву, спікання та рекуперації (на 16–32 %) реалізується за рахунок підвищення розрідження у нижній частині шару до 600 мм вод. ст., що дозволяє посилити конвективно-заснований теплообмін без шкоди для механічної стабільності обкотишів.

Необхідно враховувати, що збільшення питомої продуктивності зони сушіння має принципові обмеження, зумовлені газопроникністю шару та необхідністю збереження геометричної цілісності обкотишів. Максимізація продуктивності потребує комплексного запобігання проявам дефектів, таких як розтріскування, роздавлювання та злипання гранул, що можуть виникати при надмірному гідродинамічному навантаженні або високій температурі теплоносія.

Експериментальні дослідження підтверджують, що зниження початкової вологості обкотишів забезпечує можливість підвищення швидкості подачі тепла до шару шляхом оптимізації швидкості фільтрації теплоносія та температурного режиму газу. При сушінні методом просмоктування зверху вниз доцільне поступове підвищення температури газу над шаром пропорційно зниженню вологості обкотишів, що дозволяє уникнути локального перегріву верхніх горизонтів. Водночас на початкових стадіях процесу неминуче спостерігається перезволоження нижніх обкотишів, що призводить до зниження їх механічної міцності на 30–40 %, обмежуючи швидкість фільтрації газу та висоту шару відповідно до 0,8–1,2 м/с і 350–400 мм.

Інтенсифікація процесу сушіння у зазначених умовах досягається шляхом локального збільшення розрідження під шаром у третій, найбільш прогрітій частині зони, після початкового зміцнення обкотишів, що забезпечує більш рівномірний розподіл теплового потоку та підвищує ефективність рекуперації тепла.

При застосуванні методу дуття знизу швидкість фільтрації теплоносія обмежується критеріями псевдооживлення шару, при яких пористий матеріал

починає втрачати механічну стабільність, що потенційно може призводити до локальної деградації шару і зменшення ефективності спікання.

$$Re = \sqrt{0,02 Ar} , \quad (2.25)$$

де  $Re$  - число Рейнольдса;  $Ar$  - число Архімеда,

$$Re = \frac{V_T \cdot d}{\nu_T} ; \quad (2.26)$$

$$Ar = \frac{g \cdot d^3}{\gamma_T \cdot \nu_T} (\gamma_0 - \gamma_T) . \quad (2.27)$$

де  $V_T$  – швидкість фільтрації теплоносія, м/с;

$d$  – діаметр обкотиша, м;

$\nu_T$  – кінематична в'язкість теплоносія, м<sup>2</sup>/з

$\gamma_T$  і  $\gamma_0$  – щільність теплоносія й обкотишів, кг/м<sup>3</sup>;

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Враховуючи  $\gamma_T = 1,27$  кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_0 = 2800$  кг/м<sup>3</sup> після перетворень одержимо:

$$V_T = 20,8\sqrt{d} \quad (2.28)$$

#### 2.3.4. Інтенсифікація процесів сушіння обкотишів за режиму нижнього дуття

Технологічна модифікація сушіння обкотишів із реалізацією режиму дуття теплоносія знизу характеризується суттєвим підвищенням ефективної газопроникності формованого шару на рівні 14–15 % у подальших технологічних зонах, що зумовлює як оптимізацію тепломасообміну, так і підвищення продуктивності конвеєрної машини. Експериментально встановлено, що навіть при швидкості фільтрації газу до 2,5 м/с та температурі теплоносія в інтервалі 400–500 °С механічні деформації обкотишів у процесі сушіння не реєструються, що свідчить про високий рівень структурної стабільності матеріалу. Однак збільшення швидкості фільтрації від 0,6 до 1,5 м/с закономірно призводить до пропорційного скорочення тривалості сушіння, тоді як інтенсивність теплового обміну зростає асимптотично із підвищенням температури газу: при швидкості 0,8–1,0 м/с підвищення температури від 200 до 450 °С забезпечує зменшення тривалості сушіння з 10 до 4 хв, що підтверджує високий потенціал регулювання теплового режиму для оптимізації процесу.

На динаміку процесу сушіння значний вплив чинить напрямок вектору руху теплоносія. При організації прососу газу зверху вниз конвекційне видалення вологи з шару завершується раніше, ніж при продувці або зміні напрямку руху газу, що пояснюється збігом напрямку дії гравітаційних сил на краплі конденсованої вологи з напрямком руху газового потоку. Такий режим дозволяє скоротити час сушіння на 20–35 %, проте його реалізація можлива лише за умови відсутності перезволоження та механічного руйнування нижніх горизонтів шару, висота яких коливається в межах 150–170 мм.

Оптимальною вважається схема зі змінним напрямком руху газу, що забезпечує комплексне вирівнювання вологості по висоті шару та запобігає локальному конденсаційному перенасиченню, зокрема у верхніх горизонтах, де перезволоження менш критичне, що дозволяє підтримувати підвищену швидкість фільтрації. Водночас у зоні прососу газу зверху доцільно знижувати температуру та швидкість теплоносія для мінімізації ризику конденсації вологи на поверхні обкотишів.

Питому продуктивність сушильної зони за умови дотримання оптимізованого температурного та тискового профілів під шаром можна збільшити від 4,5 до 6,75 т/(м<sup>2</sup>·год) шляхом поступового або ступінчастого підвищення як температури, так і перепаду тиску газу від 350 °С та 900 мм вод. ст. до 800 °С та 2500 мм вод. ст., при цьому постійне розрідження під шаром зумовлює зменшення швидкості фільтрації пропорційно локальному нагріванню шару. Питома продуктивність зони спікання може бути додатково підвищена за рахунок збільшення вакууму під шаром; проте її реалізація обмежується високотемпературними характеристиками відхідних газів та підвищеними тепловими втратами, що виникають через інтенсивніше підсмоктування холодного повітря.

## ВИСНОВКИ

1. Проведено комплексний системний аналіз потенційних шляхів підвищення енергоефективності процесів огрудкування залізорудної сировини. Встановлено, що інтеграція використання твердого палива в технологічну схему виробництва обкотишів поряд із традиційною агломерацією дозволяє значно знизити питомі витрати теплоти шляхом комплексного урахування переваг обох технологій. Виконано класифікацію критичних факторів, що детермінують теплову ефективність агрегатів для спікання обкотишів.

2. Здійснено детальний аналіз окисно-відновних процесів, що протікають у обкотишах під час спікання шихт із включенням твердого палива. Експериментально доведено, що збільшення вмісту вуглецю від 0 до 1,3 % зумовлює підвищення концентрації монооксиду заліза з 2,6–5,24 % до 10,38–14,15 % та збільшення кількості шлакових зв'язків до 40–55 %. Оптимальна кількість розплаву у спечених обкотишах визначається в інтервалі 15–25 %, що прямо корелює із внеском твердого палива в шихту.

3. Проведено термогравіметричні дослідження окисно-відновних процесів у залізовмісних системах за участі вуглецевмісних матеріалів. Показано, що тип використовуваного вуглецевмісного компонента суттєво впливає на кінетику відновлення та температурний інтервал фазового плавлення системи.

4. Теоретичний та експериментальний аналіз підтвердив визначальний вплив газодинамічних і теплофізичних параметрів шару обкотишів на витрати електричної та теплової енергії. Розглянуто принципи інтенсифікації процесів спікання на конвеєрних машинах та запропоновано шляхи оптимізації температурно-газодинамічного режиму з метою підвищення енергоефективності та рівномірності структурних властивостей спечених обкотишів.

## РОЗДІЛ 3

### МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Комплексне вивчення хімічного складу, фізико-механічних та теплофізичних властивостей вихідних шихтових матеріалів та обпалених обкотишів шляхом лабораторних експериментів і розрахункових моделей.

Теплофізичні індикатори вихідних шихтових систем визначалися з використанням термогравіметрично-дериватографічного аналізу, реалізованого на промисловій установці угорського виробництва MOM Q-1500D, а також за посередництвом високотемпературного оптичного мікроскопа МНО-2 фірми Carl Zeiss, який функціонує у режимах контрольованого термонавантаження зразків у різноокисних та інертних газових середовищах.

Металургійні властивості сформованих і термічно стабілізованих обкотишів верифікувалися у межах експериментально-вимірювальної інфраструктури Інституту чорної металургії НАН України згідно з регламентними вимогами ДСТУ 19575-84, 21707-76, а також у відповідності до стандартизованої методики аналізу високотемпературних характеристик залізорудних матеріалів [73].

З метою підвищення прозорості методичного забезпечення нижче наведено узагальнені схеми ключових лабораторних агрегатів та стислий опис їх функціонального призначення.

На рисунку 3.1 представлено структурно-конструктивну схему термогравіметричної установки Q-1500D, яка являє собою інтегрований вимірювально-аналітичний комплекс, сформований з вагового модуля, високотемпературного нагрівального вузла та реєстраційно-аналітичного блока. Функціональний принцип роботи даної системи відтворюється наступним чином: досліджуваний матеріал у поєднанні з еталонним зразком розміщується у тиглях спеціалізованої геометричної конфігурації, що фіксуються на спаю диференціальної термопари. Остання монтується на коромислі надточного вагового механізму, розташованого у зоні рівномірного теплового поля нагрівального елемента, що забезпечує ізотермічно стабільну зміну температурного режиму у межах 20–1050 °С.

Завдяки одночасному відстеженню температурних градієнтів еталонного й аналізованого зразків та корелятивному контролю зміни їх маси у процесі термічного навантаження, диференційно-термічний аналіз дозволяє з високою точністю визначати фазовий спектр, мінералогічний склад та термоструктурну еволюцію природних і техногенних мінеральних систем (руд, солей, комплексних механічних сумішей тощо). Індивідуальні теплові ефекти, притаманні кожній із складових багатокomпонентних сумішей, залишаються інваріантними за умов відсутності хімічної взаємодії, що уможлиблює їх диференційовану ідентифікацію. Водночас процеси плавлення та кипіння, параметри яких істотно модифікуються присутністю домішкових фаз, не можуть бути використані як універсальні критерії визначення природи компонентів.

Високотемпературний мікроскоп МНО-2 (виробництва Carl Zeiss) забезпечує формування контрольованого теплового поля у діапазоні температур 20–1650 °C у середовищах різної газової активності, що надає можливість не лише безпосередньо візуалізувати, але й фіксувати фото- та відеоматеріали, які відображають динаміку структурно-фазових перетворень і зміну агрегатного стану досліджуваних матеріалів.

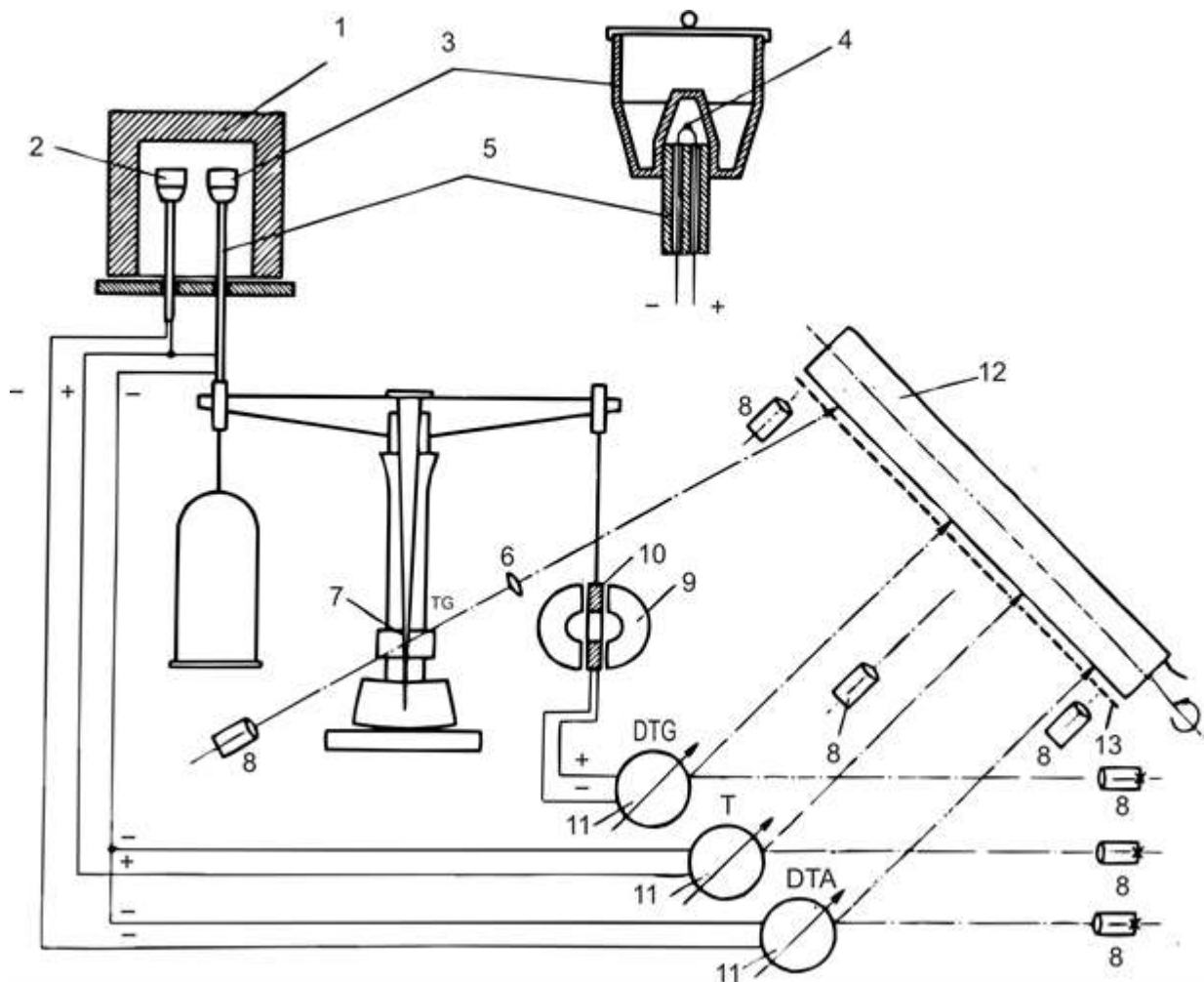


Рис. 3.1. Схема ДТА

1 – пекти, 2 – тигель із інертною речовиною, 3 – тигель із досліджуваною речовиною, 4 – диференціальна термопара, 5 – ваговий пристрій, 6-10 – блок реєстраційних пристроїв.

Зразки, призначені для здійснення регламентованих експериментально-аналітичних випробувань, формувалися шляхом високотискового пресування попередньо гомогенізованої у мікродисперсному стані шихтової композиції у тіла циліндричної морфології номінальними розмірами 2,2 мм у діаметрі та 2 мм у висоті. Перед пресувальною стадією шихта піддавалася інтенсивному короткочасному (до 30 с) диспергувально-турбулентному змішуванню у лабораторному агрегаті безперервної дії, що забезпечувало не просто рівномірний просторовий розподіл мікрокомпонентів, але й стабілізацію структури композиту на рівні локальних мікрооб'ємів, унеможливаючи сегрегаційні ефекти, характерні для слабопідготовлених мінеральних систем.

У процесі термостимульованих фазових трансформацій досліджувані зразки зазнають багатостадійної морфометричної еволюції, результатом якої є не лише редукція вертикальної розмірності (що маніфестується як макроскопічна усадка), але й термокінетично зумовлене оплавлення периферійних граней із подальшим пластичним деформуванням і в'язко-текучим розтіканням крайових та кутових зон об'єкта.

На рисунку 3.2 відтворено конструктивно-функціональну схему дослідної установки, призначеної для визначення комплексу міцнісних характеристик огрудкованих залізородних матеріалів у динаміці їхнього відновлення згідно з вимогами нормативного документа ДСТУ 19575-84. Зазначена методика реалізує модель поведінки матеріалу у верхній зоні доменної печі, де сукупний вплив газових потоків, температурних градієнтів та початкових стадій відновного процесу формує специфічне середовище, що спричиняє інтенсивну структурну еволюцію рудного шару.

Пробу агломерату масою 500 г або відповідно нормовану пробу обкотишів (фракційний інтервал 10–15 мм) піддають тривалій (180 хв) обробці в обертовому барабані у середовищі генераторного газу, склад якого характеризується концентрацією монооксиду вуглецю 32–35 %, тоді як решта газової фази становить інертний азот. Експеримент проводиться у температурному інтервалі 20–800 °С, що дозволяє відтворити кінетично релевантні умови первинного відновлення та формування початкової термопластичності рудного матеріалу.

По завершенні експериментального циклу пробу охолоджують у нейтральному газовому середовищі, після чого проводять гранулометричний розсів і хімічний аналіз залишку та продуктів перетворення. На основі отриманих даних здійснюють розрахунок ступеня відновлення та металізації, які слугують інтегральними показниками ефективності протікання відновних процесів. Міцнісні параметри під час відновлення, руйнування та стираності визначаються за часткою виходу фракцій +10 (+5) мм, 0,5–5,0 мм та 0–0,5 мм, які

інтерпретуються як характеристичні індикатори структурної деградації матеріалу.

На рисунку 2.3 схематично репрезентовано установку, призначену для визначення газопроникності та величини термостимульованої усадки шару при відновленні відповідно до вимог ДСТУ 21707-76. Із підвищенням температури у ході доменної відновно-теплової обробки домінуючим чинником стає процес прогресуючого розм'якшення матеріалу, який зумовлює суттєве ущільнення шару та інтенсифікацію зміни його газодинамічних властивостей. До межі температури непрямого відновлення цей процес може бути адекватно змодельований даним методом, що забезпечує репрезентативність отриманих даних щодо реальних умов доменного процесу.

Випробування реалізують у відновній газовій атмосфері при температурі 20–1050 °С. Дослідним об'єктом виступає проба обкотишів фракції 10–15 мм, що завантажується у реакційну трубку діаметром 100 мм до формування однорідного шару висотою 100 мм, завдяки чому забезпечується відтворення умов реального газоруху в об'ємі рудного масиву та його структурно-фазової трансформації під дією відновних агентів.

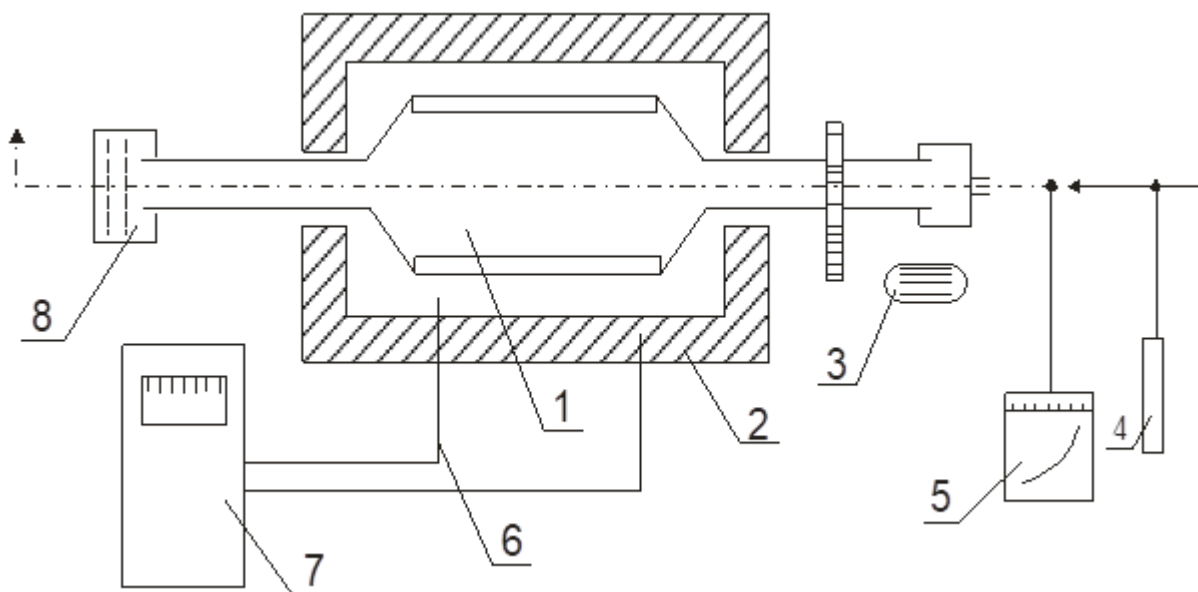


Рис. 3.2. Установка для визначення міцності при відновленні.

1 – барабан з полками; 2 – нагрівальна піч; 3 – електромотор з редуктором; 4 – газовий витратомір; 5 – прилад для запису температури газу; 6 - термопари; 7 – терморегулятор; 8 – фільтр-пилловловлювач.

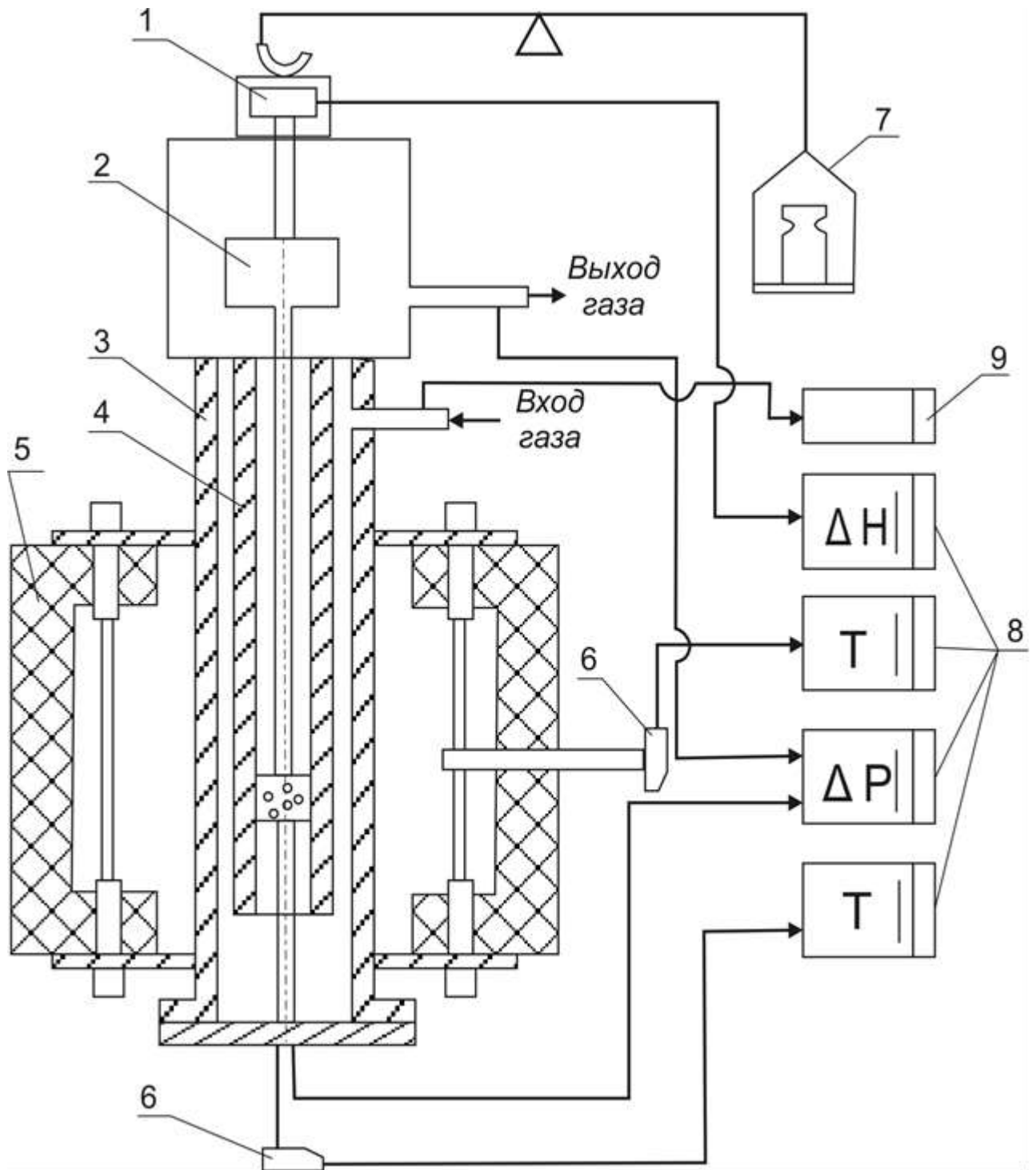


Рис. 3.3. Схема установки для визначення газопроникності й усадки шару при відновленні.

1 – датчик для реєстрації висоти шару; 2 – шток з вантажем; 3 – зовнішня стінка реакційної камери; 4 – внутрішня стінка реакційної камери; 5 – електропіч; 6 – термопари; 7 – пристрій, що зважує; 8 – контрольно-вимірювальні прилади; 9 – регулятор подачі відбудовного газу.

У верхню частину сформованого шару досліджуваного матеріалу вводиться вертикально орієнтований шток, на торцевій поверхні якого закріплена решітчаста система. Цей елемент забезпечує стабілізоване навантаження величиною  $98,1 \text{ Н/м}^2$ , що моделює механічний тиск, характерний для газодинамічних зон доменного агрегату. Інтенсивність вертикального переміщення штока використовується як непрямий критерій оцінки кінетики усадки шару, тоді як різниця тисків між верхньою та нижньою точками реакційного об'єму є діагностичним параметром газопроникності матеріального середовища.

Газопроникність шару визначається за величиною перепаду тиску ( $\Delta P$ ) відновлювального газу, що проходить крізь масив частинок, відображаючи ступінь структурної відкритості порового простору. Показник усадки інтерпретується як відносна зміна ( $\Delta H$ ) початкової висоти шару матеріалу після завершення випробування, виражена у відсотковій формі. Паралельно з реєстрацією фізико-механічних параметрів здійснюється визначення фактичного ступеня відновлення оксидів заліза та рівня металізації, які слугують інтегральними характеристиками хімічної реакційної здатності системи.

Схематичний устрій високотемпературного комплексу ИЧМ наведено на рисунку 3.4. Основним реакційним середовищем, яке одночасно виконує функцію нагрівального елемента, є графітова трубка зі збільшеною щільністю матеріалу та внутрішнім діаметром 60 мм, що розміщена в індукторі високочастотної печі. Нижню частину реакційного простору утворює графітова решітка, оснащена двадцятьма п'ятьма отворами діаметром 5 мм, через які можливе відведення високотемпературних продуктів плавлення.

Попередньо відновлений рудний матеріал фракції 7–12 мм розташовується всередині реакційного простору у вигляді шару завтовшки 55–60 мм, який ізолюється зверху та знизу тонкошаровими прошарками коксу. На систему через натискний шток і рухомі решітки подається осьове навантаження величиною  $1 \text{ кг/см}^2$ , що відтворює напружений стан рудної шихти в зоні плавлення доменної печі. Темп підвищення температури в інтервалі 1000–1600 °С може

регулюватися в межах 1,5–15 °С/хв, що дозволяє моделювати термічний режим шихти в різних функціональних секторах доменного агрегату.

Під реакційною графітовою трубою розташована герметизована камера, у якій міститься графітовий приймач у формі диска з окремими гніздами для акумуляції рідких фаз плавлення. У ході експерименту автоматизовані засоби фіксації забезпечують безперервну реєстрацію температури реакційного об'єму та величини усадки шару. Температуру початку виділення краплин металево-шлакової фази визначають візуально через оглядове вікно герметичної камери.

Обсяг рідкої фази, яка дренує через коксове середовище та накопичується у гніздах приймача, дозволяє оцінити швидкість її перетікання й ступінь фільтраційної здатності коксової насадки. Після завершення плавки матеріал, зібраний у кожному гнізді, а також залишки розплаву в шарі коксу при температурі 1600 °С піддаються зважуванню, фазовому поділу на шлакову та металеву компоненти й подальшому хімічному аналізу.

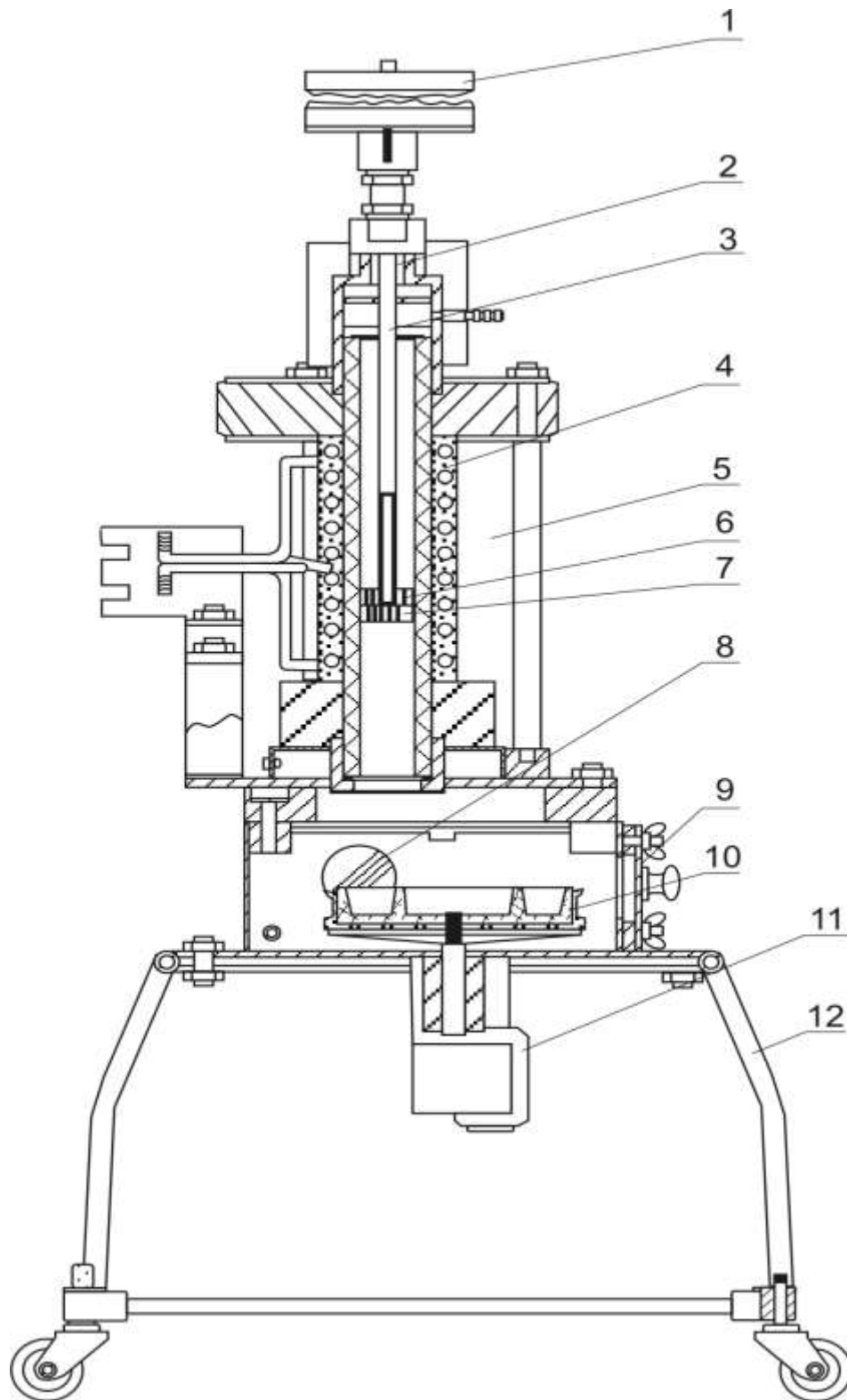


Рис. 3.4. Схема високотемпературної установки ИЧМ для дослідження високотемпературних властивостей залізорудних матеріалів.

Після здійснення первинного етапу аналітичної обробки експериментальних даних результати високотемпературних випробувань трансформуються у формат комплексних графічних репрезентацій, що постають у вигляді інформативних діаграм. На цих діаграмах відображено кореляційні залежності

між температурною динамікою та такими параметрами, як величина термозумовленої усадки досліджуваного шару і кількісні характеристики рідких фаз, що ексфільтрують із реакційного простору внаслідок термодеструктивних та термодеструктивних перетворень (мал. 3.5).

Проведений комплекс експериментально-аналітичних розроблень засвідчив, що у межах високотемпературного доменного моделювання ключову роль у формуванні напружено-деформаційної поведінки матеріалу відіграє сукупність критично чутливих термодинамічних і реологічних параметрів, серед яких домінуючу значущість мають:

—  $t_1$  — температура повної втрати газопроникності багатокомпонентного шару (Т), яка детермінує протяжність та функціональну стабільність «сухої» зони доменної печі, визначаючи межі її аеродинамічної активності;

—  $t_2$  — температура ініціювання формування і фільтраційного прориву первинних рідких фаз крізь коксову колонну насадку ( $T_{н.ф.}$ ), що інтенсифікує напруженість і структурне перенавантаження коксового прошарку в нижніх інтервалах доменної шахти;

— температура переходу до крапельного режиму руху розплаву ( $T_{м.ф.}$ ), що маркує фазовий поріг між високов'язким станом і дренажною текучістю;

— маса первинного високозакисненого розплаву ( $M_{р.ш.}$ ), який формується в інтервалі температур  $t_2 - t_3$  та характеризується підвищеним вмістом FeO, відновлення якого у горні може бути реалізоване виключно прямим шляхом, що супроводжується структурно неминучим підвищенням питомої витрати коксу;

— концентрація оксиду заліза FeO у первинному розплаві ( $FeO_{р.ш.}$ ), яка слугує інтегральним маркером корозійно-ерозійної агресивності цього розплаву стосовно гарнісажного покриття;

— частка високо-в'язкої та тугоплавкої (при 1600 °С) компонентної фракції оксидно-металевої системи з підвищеним вмістом вуглецю, що не здатна до ефективного дренажу крізь коксову насадку й, відповідно, накопичується у реакційній зоні, утворюючи масу недренованого залишку ( $M_{іст.}$ ).

### 3.2. Термогравіметричні дослідження кінетики спікання залізовмісних систем у присутності вуглецевмісних добавок

Проблематика огрудкування (агломерації) залізорудних матеріалів, до складу яких входять різнорідні за петрохімічною природою, фракційною дисперсністю та концентраційною мінливістю вуглецевмісні паливні компоненти, на сьогодні отримала досить глибоке й структуроване висвітлення у спеціалізованій металургійній літературі [37, 38, 47, 61]. Разом із тим, розширена систематизація наявного кластеру емпіричних і теоретичних даних дала змогу виокремити низку онтологічних та фізико-хімічних особливостей, притаманних термолізу, реакційно-дифузійним трансформаціям та фазово-структурній еволюції залізовмісних матеріальних систем під час термообробки.

Особливо нерозробленим, хоча й принципово значущим, залишається питання ідентифікації механізмів взаємного впливу та конкурентності процесів окиснення, відновлення та дисоціації, які розгортаються в умовах сумісного нагрівання магнетитового концентрату та вуглецевмісних реагентів, що задають комплексно-кінетичний характер термогравіметричної поведінки таких систем.

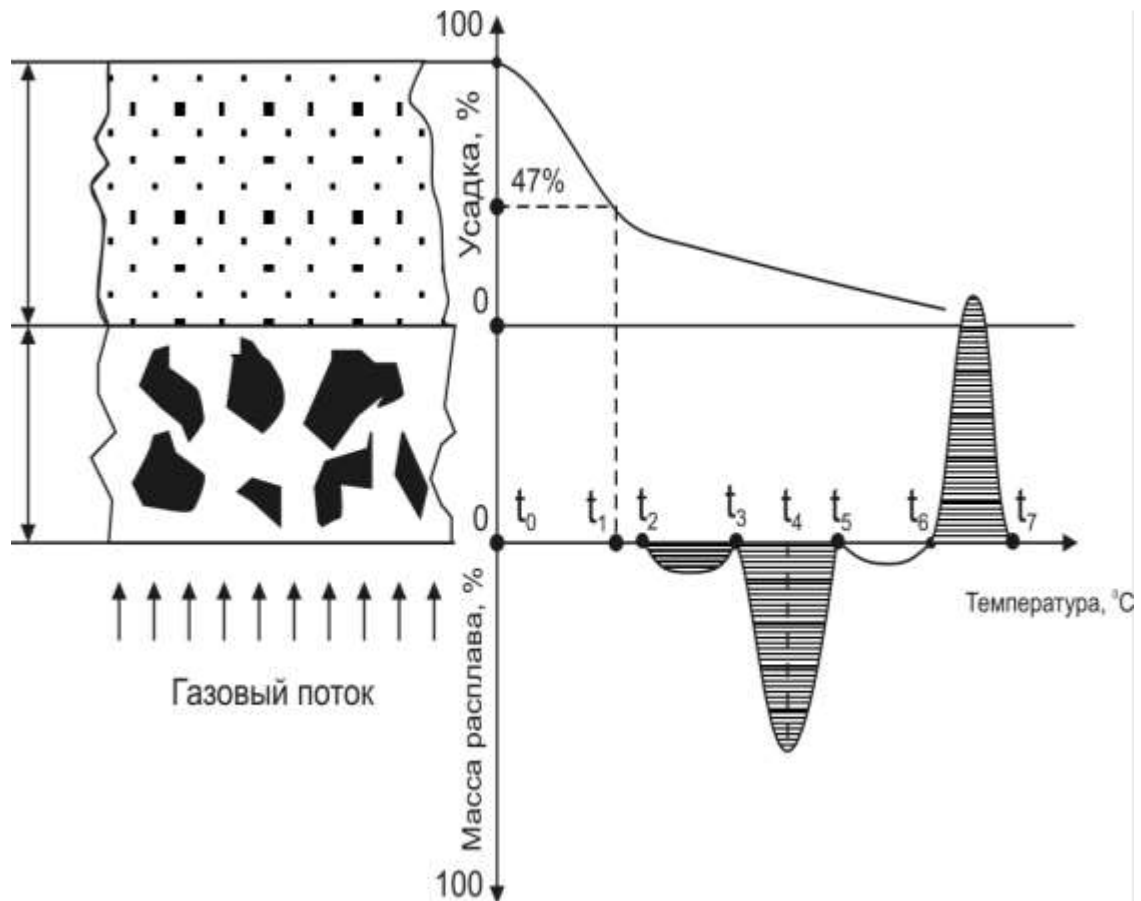


Рис. 3.5. Діаграма зміни усадки шару й маси витікшого розплаву залежно від температури.

$t_0$  – температура початку усадки шару,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_1$  - температура повної втрати газопроникності шару,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_2$  – температура початку каплутворення розплаву,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_2 - t_3$  – температурний інтервал витікання первинного високозакисного розплаву,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$t_3 - t_5$  – температурний інтервал спільного витікання металу й шлаків;

$t_5 - t_6$  - залишок розплаву в шарі коксу при температурі  $1600^{\circ}\text{C}$ .

Однією з найбільш складних проблем, що виникають при використанні твердого палива у процесах термічної обробки залізрудних обкотишів, є коректне визначення його технологічної придатності та якості. Ключовим параметром, який визначає поведінку палива в умовах високотемпературних процесів, виступає вміст летких компонентів, тісно пов'язаний зі ступенем вуглефікації вихідної органічної речовини. Саме стадія вуглеутворення, що відображає еволюцію органічної маси осадових

порід у геологічному часі, значною мірою визначає фізико-хімічні властивості твердих палив і їх реакційну здатність у процесах термічного розкладання та окиснення.

Процес вуглефікації є результатом довготривалих перетворень органічної речовини під дією підвищених температур і тиску, що виникають під час занурення осадових товщ у надра земної кори. На початковому етапі цього еволюційного ряду формується **торф** — відносно молоде геологічне утворення, структура якого характеризується високим ступенем дисперсності та недостатньою впорядкованістю органічної матриці. Подальший розвиток процесу вуглефікації зумовлює трансформацію торфу в **буре вугілля**, яке в міру зростання ступеня метаморфізму переходить у різні марки **кам'яне вугілля**, починаючи з довгополум'яних різновидів.

На наступних стадіях еволюції органічної речовини відбувається подальше ущільнення та структурне впорядкування вуглецевого каркасу, що приводить до формування **антрацит** — палива з найбільш досконалою кристалічною організацією вуглецевої фази. За певних геологічних умов подальше зростання ступеня метаморфізму може спричинити перехід антрациту у **графіт**. У структурі вуглефікаційного ряду безпосередньо перед антрацитом розташовується **худе вугілля**, тоді як проміжною формою між ним і антрацитом виступають напівантрацити. Найбільш інертними в хімічному відношенні різновидами антрациту є суперантрацити, тоді як перехідною формою між антрацитом і графітом вважається шунгіт.

Порівняльні характеристики різних типів вуглецевої сировини, зокрема антрациту, худого, слабкоспівкливого, газового та довгополум'яного вугілля, наведені в табл. 3.1 і відображають насамперед параметри, що визначають їх хімічну активність. Аналіз наведених даних свідчить, що серед природних видів палива мінімальні значення виходу летких компонентів, втрат органічної маси під час термічного розкладання та реакційної здатності твердих продуктів піролізу характерні саме для

антрациту. Натомість максимальні значення зазначених параметрів притаманні довгополум'яному та газовому вугіллю.

Варто підкреслити, що навіть за відносної близькості стадій вуглефікації худе вугілля характеризується значно більшим виходом летких речовин і вищою хімічною активністю порівняно з антрацитом. Сукупність таких властивостей, як мінімальна реакційна здатність, низький вміст летких компонентів та значні природні запаси, зумовлює розгляд антрациту як одного з найбільш доцільних видів твердого палива для введення до складу шихти при виробництві залізородних обкотишів із внутрішнім джерелом тепла.

Водночас сучасні зміни у структурі сировинних ринків, пов'язані з трансформацією традиційних ланцюгів постачання та перерозподілом виробничих потоків, зумовлюють підвищений інтерес до використання альтернативних вуглецевмісних матеріалів. Зокрема, перспективними з точки зору ресурсозбереження можуть виявитися різноманітні вторинні продукти та відходи промислового виробництва, серед яких — коксовий відсів, залишки електродного виробництва та інші вуглецевмісні матеріали. Незважаючи на обмежені обсяги таких ресурсів і варіабельність їх властивостей, вони можуть становити певний комерційний інтерес як додаткове джерело вуглецю для технологічних процесів.

Дослідження особливостей поведінки подібної сировини в умовах високотемпературної обробки є важливим з практичної точки зору, оскільки дозволяє зменшити витрати, пов'язані з адаптацією технології до нових видів палива. Детальне вивчення їх фізико-хімічних характеристик, кінетики термічного розкладання та взаємодії з мінеральною частиною шихти створює передумови для мінімізації технологічних ризиків і зниження економічних втрат при переході від однієї технологічної схеми до іншої.

Разом із цим низка питань потребує подальшого уточнення. Зокрема, актуальною залишається проблема визначення раціональної кількості введення вуглецевмісних добавок різної природи до складу шихти

огрудкування, хімічний склад якої може істотно змінюватися залежно від характеристик вихідної залізорудної сировини. Оптимізація цих параметрів є важливою передумовою забезпечення стабільності процесу спікання та формування необхідних фізико-механічних властивостей готових обкотишів.

Таблиця 3.1.

## Порівняльна характеристика палива

Марки вугілля	Вихід летучих речовин, %	Збиток органічної маси при термічному розкладанні вугілля, %		Реакційна здатність твердих продуктів пиролиза, мол./г.з	
		800°C	1500°C	800°C	1500°C
Антрацит (Листвяський розріз)	2,61	3,13	6,11	0,278	0,226
Вугілля Т (Краснобродський розріз)	10,55	8,70	13,19	0,345	0,274
Вугілля ІСС (Розріз ім. Вахрушева)	28,09	27,66	31,25	0,715	0,400
Вугілля Г6 (шахта «Байдарівська»)	39,95	38,56	40,66	0,571	0,626
Довгополум'яне вугілля караканського родовища	40,0	Немає. св.	Немає. св.	10,57	Немає. св.

У межах даної роботи, спираючись на комплекс систематизованих експериментальних даних, отриманих із застосуванням сучасних високочутливих аналітичних методик, сформульовано завдання щодо побудови теоретико-методологічних засад процесів синтезу самофлюсуючих обкотишів. У цьому контексті передбачено встановлення фундаментальних закономірностей твердофазного спікання в оксидно-мінеральних багатокомпонентних системах, ідентифікацію механізмів ініціації та розвитку розплавоутворення, а також

розроблення фізико-хімічної концептуальної моделі формування первинної розплавленої фази.

Експериментальна частина роботи охоплює дослідження кінетичних закономірностей твердофазного спікання оксидів заліза та суміжних компонентів, а також аналіз динаміки процесів відновлення, окиснення та дисоціації. Ці дослідження виконувались методами високоточного термогравіметричного аналізу на дериватографічному комплексі Q-1500 D у температурному інтервалі 20–1050 °C в умовах інертної та окислювальної атмосфери, що дозволило моделювати різноманітні варіанти термоатмосферних впливів, характерних для промислових процесів термообробки залізородних матеріалів.

Як було узагальнено раніше, дериватографічна установка являє собою складну систему диференціальних термопар, на чутливих спаях яких розміщено тиглі з досліджуваною речовиною та інертним еталонним матеріалом. Обидва тиглі встановлюються на коромислі високочутливого вагового механізму, інтегрованого в реакційну зону печі. У процесі експерименту здійснюється автоматична синхронна реєстрація низки параметрів: температури системи (T), зміни маси досліджуваної речовини (TG), швидкості масових змін (DTG), а також енергетичного ефекту, індукованого фізико-хімічними перетвореннями (DTA), що відображає ентальпійні характеристики процесів.

Термогравіметричний аналіз є вискоефективним інструментом для ідентифікації хіміко-технологічних реакцій та фазових перетворень, що відбуваються під дією теплових потоків у складних системах. Фізико-хімічні зміни — незалежно від їх природи, чи то хімічна взаємодія, фазовий перехід або зміна агрегатного стану — супроводжуються помітним перерозподілом тепломісткості системи. Такі процеси можуть бути ендотермічними (теплопоглинальними) або екзотермічними (тепловидільними) та часто корелюють зі зміною маси реагуючих фаз. Унікальність термогравіметричного методу полягає в можливості одночасної кількісної реєстрації як масових, так і

температурно-енергетичних характеристик, що забезпечує об'єктивний багатофакторний аналіз досліджуваних систем.

Як ілюстративний приклад, на рисунку 3.6 наведено типовий комплексний термоаналітичний профіль (дериватограму) нагрівання суміші залізорудного концентрату з вуглецевмісною добавкою в умовах інертної газової атмосфери, що демонструє взаємопов'язаність масо- та теплообмінних процесів у системі.

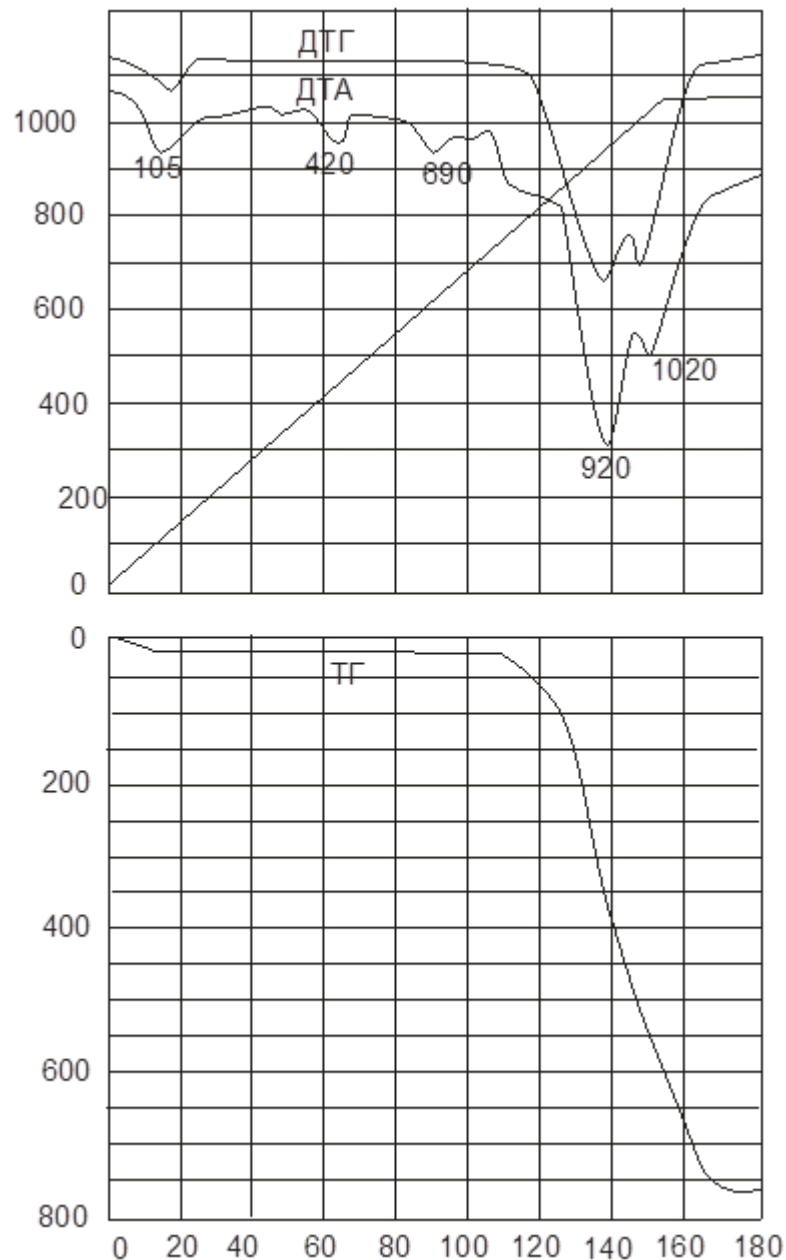


Рис. 3.6. Дериватограма суміші 15% антрацитового штиба + 85 % магнетитового концентрату.

Температурні позначки 105 і 420 °С у цьому дослідженні відповідають почерговому випаровуванню вологи та усуненню летких речовин. Останній процес триває доти, доки температура не досягає близько 920 °С. У зоні приблизно 350 °С проявляється теплопоглинальний ефект, що свідчить про внутрішні структурні зміни у компонентах, багатих на вуглець. Ознаки відновлення магнетиту фіксуються при приблизно 690 °С. Характерне розширення (плато) кривої в діапазоні 700–720 °С указує на двоступеневий механізм перетворення Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>.

Спершу система проходить реакцію



унаслідок чого формується проміжна фаза — магнітна шпінель. На наступному етапі завершується перехід FeO·Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> у FeO за реакцією



Закінчення цієї стадії відбувається у температурному проміжку 800–820 °С. Далі починається відновлення FeO до металевого стану, яке чітко проявляється при ~830 °С і найактивніше перебігає поблизу 880 °С.

Представлена дериватограма демонструє, що використана методика дозволяє надійно простежувати перебіг відновних перетворень залізородної сировини в умовах взаємодії з твердим вуглецевмісним відновником.

Для виявлення закономірностей взаємодії процесів окиснення, відновлення та розкладу під час спільного нагрівання магнетитового концентрату, вуглецевих добавок і вапняку спершу було окремо вивчено термічну поведінку кожного з цих матеріалів у межах 20–1050 °С. Лише після цього проводили аналіз сумісних зразків.

У дослідження включали концентрат Центрального ГЗК, доломітизований вапняк Докучаєвського родовища, антрацитовий штиб, коксик та графітові відходи виробництва. Дисперсність усіх матеріалів становила менше 71 мкм. Їхній хімічний склад і параметри вуглецевмісних добавок наведено у таблицях 3.2–3.3.

Процеси, які мають місце під час спікання залізовмісних матеріалів за наявності карбонового компонента, ідентифікували на підставі термограм, отриманих для вапняку, антрацитового штиба, коксового відсіву, графіту високої чистоти, а також для суміші гематиту з графітовим порошком. Додаткову інформаційну базу становили експериментальні дані з таблиці 3.4, наведені у працях українських дослідників [74–79].

Таблиця 3.2.

Хімічний склад шихтових матеріалів

Матеріал	Хімічний склад, %				
	Fe <sub>общ.</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Залізорудний концентрат	66,2	8,4	4,4	0,67	0,54
Антрацитовий штиб (А.Ш)	2,72	8,64	0,54	0,19	3,83
Кокс	3,75	4,62	0,61	0,24	2,56
Зола вугілля (А. Ш.)	16,18	49,26	3,18	1,15	22,53
Зола коксу	18,53	41,42	3,56	1,34	23,5

Таблиця 3.3.

Характеристика якості зразків вуглецевмісних матеріалів

	Технічний аналіз, %		
	Зольність, А	Сернистість, S	Летучі, V
Коксове відсівання	10,20	1,42	4,30
Антрацитовий штиб	14,60	2,70	4,30
Відходи електродного виробництва	8,60	0,88	0,60

На рисунках 3.7–3.9 подано результати термічного аналізу у формі ДТА-кривих, а відповідні числові дані зведено в таблицю 3.5. Ці матеріали є підсумком попереднього опрацювання експериментальних вимірювань, включно з розрахунками та порівняльним аналізом.

Особливу увагу привертають зміни, що відбуваються під час нагрівання різних типів вуглецевмісних матеріалів та їх сумішей із Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. На рисунку 3.7 наведені

термограми, за якими можна простежити специфіку поведінки кожного компонента. Для зразків, що містять вуглець, криві 1–3 відображають процеси, які відбуваються у середовищі інертного газу при їх прокалюванні.

Серед досліджених матеріалів найбільш активно реагує антрацитовий штиб: саме він демонструє початок газифікації вже у зоні близько 280 °С. Подальший перебіг процесу супроводжується виразними піками, які фіксуються у температурних областях приблизно 680 °С та 840 °С. Під час випробування маса антрацитового штиба зменшується на 4,5 %, а найпомітніша зміна ваги та відхилення ДТА-кривої спостерігається у вузькому інтервалі 400–420 °С.

Інша ситуація характерна для коксового дрібняку, отриманого з різних коксохімічних підприємств, а також для графітових залишків електродного виробництва. Для цих матеріалів лінія ДТА залишається майже незмінною до температур понад 750 °С, що вказує на їх суттєво нижчу реакційну здатність порівняно з антрацитовим штибом. Після досягнення 1050 °С втрати маси для таких зразків незначні й варіюють від 0,6 до 2,5 %.

Таким чином, термограми демонструють суттєві відмінності у реакційній активності досліджених вуглецевмісних матеріалів та дозволяють оцінити їхню поведінку в умовах високотемпературної обробки.

Таблиця 3.4.

## Термогравіметричні випробування

Найменування матеріалу	Середовище випробування
1. – вапно 2. кокс 3. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + кокс 4. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + графіт	Аргон
5. кокс 6. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + кокс 7 Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +кокс + 1 % K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Аргон C <sub>2</sub>
8 Fe <sub>x</sub> O 9 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> 10 Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> +Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Повітря аргон
11. Концентрат Північний ГЗК 12. Вапняк каракубський 13. Доломітизований вапняк Єленовський 14. Суміш 11 + 12 15. Суміш 11 + 13	Повітря
16. Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CH <sub>4</sub>
17. CaO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 18. CaO + Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +SiO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> + He
19. Качканарські металізовані обкотиші 20. С + волковські обкотиші 21. С + чинейські обкотиші 22. С + оскольські металізовані обкотиші	Аргон
23. Антрацитовий штиб + коксовий дріб'язок	Повітря
24. Лебединська руда 25. стойленська руда 26. Михайлівська руда 27. Лисаковський концентрат	Повітря
28. Кінцеві доменні шлаки 29. Синтетичні шлаки з FeO до 15% 30. Агломерати 13%FeO + 61% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 13%CaO+10,% SiO <sub>2</sub> +1%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +1%MgO 31.30% FeO +4% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +15%CaO+12,% SiO <sub>2</sub> +1%Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +1% MgO +34% Fe <sub>мет</sub>	Гелій

Таблиця 3.5.

## Термограми зразків в інертному і окисному середовищах

Найменування суміші	середовище	Температура піка, °С		
		t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>
90% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 10%CaO	повітря	100	480	-
95% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 5%CaO	повітря	100	480	-
95% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 5%MgO	повітря	100	-	-
97% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 3%MgO	повітря	100	-	-
95% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 5% кокс	повітря	100	620	-
85% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + 5% кокс +10% CaO	повітря	105	480	820
90% Концентрату +10% коксу	повітря	100	420 640	-
85% Концентрату +10% вапняку + 5% коксу	повітря	100	780	915
85% Концентрату +10% вапняку + 5% антрациту	повітря	100	780	900
80% Концентрату +10% CaO + 10% коксу	аргон	100,48 0	840	960
80% Концентрату +10% CaO + 10% антрациту	аргон	105,38 0	480	840,920
80% Концентрату +10% CaO + 10% графітового відсівання	аргон	100	840	-
92% Концентрату +2% антрациту+ 6% вапняку	аргон	100,42 0	820	915
92% Концентрату +2% коксу + 6% вапняку	аргон	100,36 0	820	920
92% Концентрату +2% графіту + 6% вапняку	аргон	100	820	935
90% Концентрату +2% антрациту + 6% вапняку +2% MgO	аргон	100,36 0	820	820,915
90% Концентрату +2% коксу + 6% вапняку +2% MgO	аргон	100	820	920
90% Концентрату +2% графіту + 6% вапняку +2% MgO	аргон	100	820	935 5

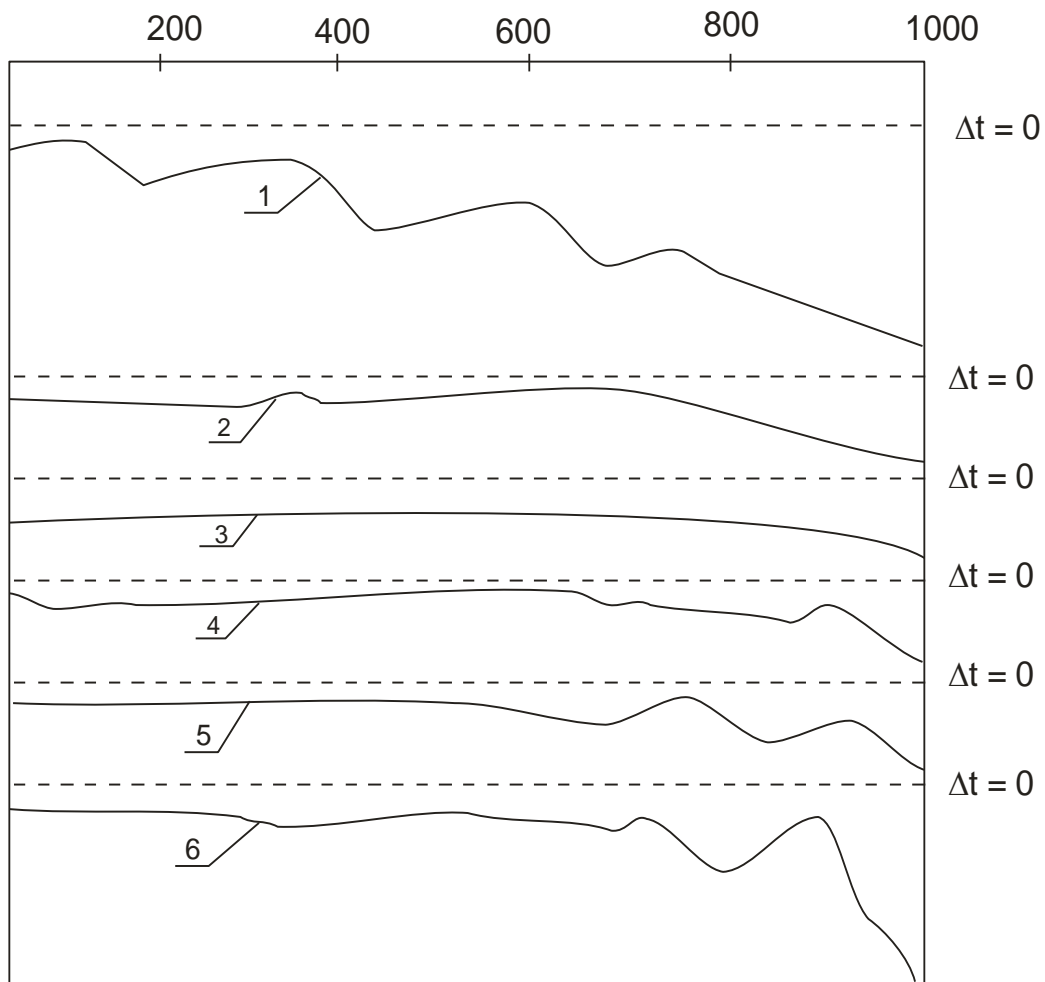


Рис. 3.7. Термограми зразків вуглецевмісних матеріалів і гематиту в інертній атмосфері:

- 1 – антрацитовий штиб; 2 – кокс БКХЗ; 3 – спектрально чистий графіт;
- 4 – суміш 10% графіту +10 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;
- 5 – суміш 10 % коксу +10 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ;
- 6 – суміш 10 % антрацитового штиба + 10 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ .

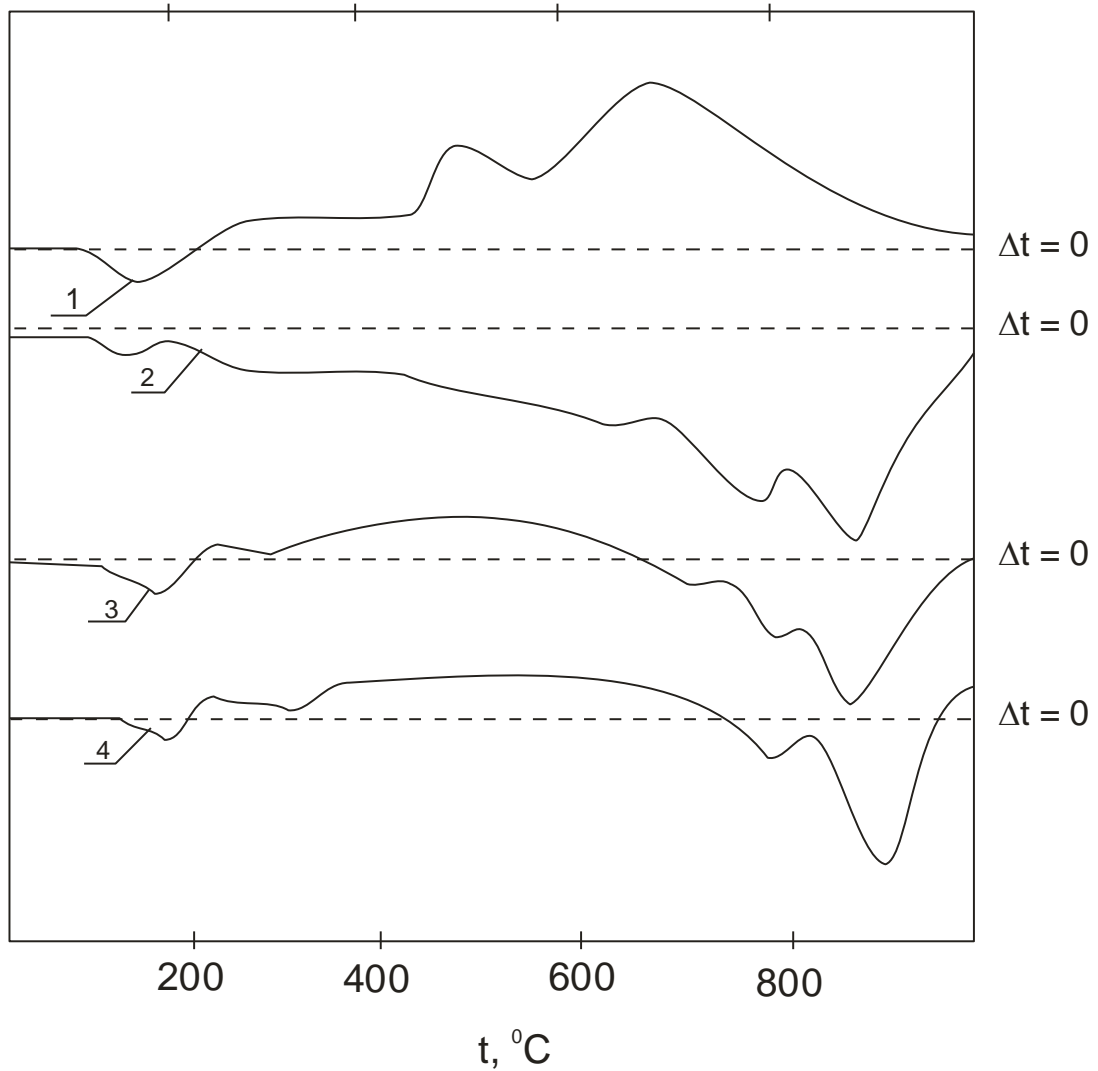


Рис. 3.8. Термограми зразків в окисній атмосфері:  
 1 – концентрат ЦГЗК;  
 2 – доломітизований вапняк;  
 3 – суміш 90 % концентрату + 10 % вапняку;  
 4 – суміш 85 % коксу + 5 % антрацитового штиба.

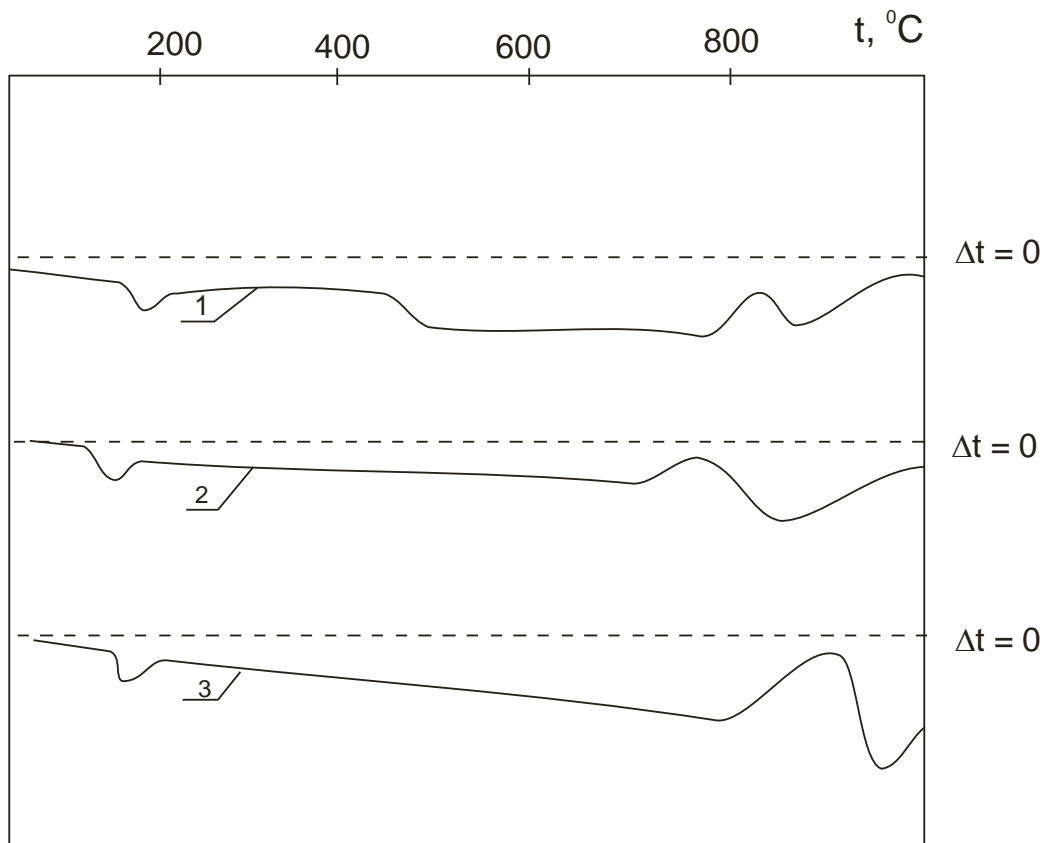


Рис. 3.9. Термограми зразків у суміші магнетитового концентрату, доломітизованого вапняку й вуглецевмісних матеріалів в інертній атмосфері:  
 1 – суміш – 2 % антрацитового штиба + 5 % вапняку + 93 % концентрату;  
 2 – суміш – 2 % коксу + 5 % вапняку + 93 % концентрату;  
 3 – суміш – 2 % відходів електродного виробництва + 5 % вапняку + 93% концентрату.

Термічний аналіз сумішей гематиту ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) із різними типами вуглецевмісних матеріалів показав наявність низки характерних екстремумів. Перший із них — у зоні близько  $680\text{ }^\circ\text{C}$  — реєструвався для всіх досліджуваних систем незалежно від природи вуглецевого компонента. Цей температурний максимум відповідає переходу  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  у модифікацію  $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3$  і використовувався як стабільна реперна точка для порівняння термограм.

Наступний мінімум на кривих ДТА, який відображає перетворення  $\beta\text{-Fe}_2\text{O}_3$  у  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , виникав у ширшому температурному проміжку —  $820\text{--}890\text{ }^\circ\text{C}$ . Третій характерний екстремум, пов'язаний із формуванням вюститної фази, проявлявся

лише для сумішей гематиту з антрацитовим штибом та з відсіванням запорізького коксохімічного заводу — відповідно в околицях 980 і 1020 °С.

Порівняння термограм для сумішей гематиту зі спектрально чистим графітом та з вуглецевмісними матеріалами різної якості виявило суттєву роль реакційної активності вуглецю в інтенсифікації процесу відновлення. З рисунка 2.7 помітно, що високореакційний антрацитовий штиб та окремі різновиди коксового відсіву істотно знижують температурні межі початку відновлення:

– для первинної стадії — на 200–240 °С;

– для переходу  $\text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{Fe}_x\text{O}$  — на 80–140 °С.

Це дозволяє проводити спікання обкотишів за нижчих температур, зберігаючи необхідну глибину відновлення.

Дослідження також показали, що введення індивідуальних оксидів —  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  — у суміш гематиту зі спектрально чистим вуглецем практично не впливає на температури ініціації відновних процесів.

Як впливає з рисунка 2.8, окиснення магнетитового концентрату розпочинається приблизно при 200 °С, після чого проявляються яскраво виражені екзотермічні піки при 370 та 585 °С. Вони відповідають послідовним переходам:  $\text{magnetite} \rightarrow \text{maghemite} \rightarrow \text{hematite}$ .

Для доломітизованого вапняку максимальні швидкості дисоціації фіксуються в температурних інтервалах близько 820 °С і 935 °С. У сумішах ж із магнетитним концентратом розклад вапняку досягає інтенсивності лише після майже повного завершення процесу окиснення магнетиту. Додавання 1–5 % вуглецевмісного матеріалу спричиняє зсув температур дисоціації на 10–30 °С у бік нижчих значень.

За даними рисунка 3.9 встановлено, що присутність 1–2 % коксового відсіву або антрацитового штиба зрушує ендотермічний максимум, пов'язаний із розкладом вапняку, приблизно на 5–20 °С у напрямку нижчих температур.

У цілому отримані результати демонструють значні відмінності в поведінці різних вуглецевмісних добавок, що сьогодні застосовуються в процесах огрудкування. Це підтверджує потребу у створенні комплексної методики оцінювання властивостей твердого палива для визначення оптимальної кількості паливної складової й забезпечення стабільної якості випалених обкотишів.

## ВИСНОВКИ

1. Встановлено закономірності окисно-відновних процесів у залізовмісних системах у присутності вуглецю за результатами термогравіметричного аналізу. Доведено, що тип вуглецевмісного матеріалу суттєво впливає як на перебіг відновлення, так і на температурний інтервал плавлення.

2. Теоретично обґрунтовано вплив газодинамічних і теплофізичних властивостей шару обкотишів на споживання теплової та електричної енергії під час спікання. Визначено принципи інтенсифікації процесу на конвеєрній машині. На основі експериментальних даних запропоновано напрями оптимізації температурного та газодинамічного режимів спікання.

## РОЗДІЛ 4

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА АНАЛІЗ

У сучасних промислових технологіях завдання енерго- та ресурсозбереження є рівноцінно важливим поряд зі створенням нових або вдосконалених технологічних рішень. Одним із ключових напрямів у цьому контексті стає залучення техногенних відходів, що дозволяє знижувати використання первинної сировини та рівень антропогенного навантаження.

#### 4.1. Роль гірничо-металургійного комплексу у впровадженні ресурсозберігаючих технологій

Посилення екологічних вимог, зокрема обмеження на розширення територій, залучених до промислового освоєння, зменшує перспективи розвитку нових родовищ. За умов, коли лише близько 2 % природних ресурсів перетворюється на корисну кінцеву продукцію [245], а решта стає відходами, їх переробка виступає одним із головних механізмів реалізації стратегії ресурсозбереження. Використання техногенних відходів одночасно сприяє зменшенню споживання природних матеріалів, скороченню площ, зайнятих під хвостосховища, та вирішенню низки екологічних проблем.

Світовий досвід поступово формує цілісне бачення ресурсно-екологічної політики, де центральним елементом виступає робота з техногенними та побутовими відходами. Поняття «обіг відходів» охоплює контроль, збирання, переробку, зберігання і нормативне регулювання операцій з ними. Повністю уникнути утворення відходів неможливо, навіть за найсучасніших технологій, тому їх раціональна утилізація набуває пріоритетного значення.

Можливі шляхи залучення відходів поділяються на три основні групи [46, 47]:

а) використання «свіжих» відходів у межах того самого виробництва (виробничий або внутрішній рециклінг). Це скорочує витрати на сировину, зменшує викиди та знижує собівартість продукції.

б) передача «свіжих» відходів підприємствам інших галузей — перший варіант глобального рециклінгу. Ефект полягає у звільненні територій та зменшенні сумарного споживання ресурсів у масштабах економіки.

в) повторне використання «відкладених» відходів, тобто продукції, що втратила споживчі властивості,— другий варіант глобального рециклінгу з аналогічним ефектом.

Ці підходи охоплюються терміном «рециклінг», близьким за змістом до поняття «вторинні ресурси». Виробничий рециклінг передбачає повернення відходів у технологічний цикл без накопичення, в темпі роботи основного процесу. Уперше цей підхід був реалізований на початку ХХ століття в агломераційному виробництві чорної металургії, коли некондиційний агломерат («повернення») знову вводили до шихти.

На фабриці огрудкування Центрального ГЗК повернення огрудків і відходів процесу використовується аналогічно: дрібні фракції повторно подрібнюють разом із вапняком, що сприяє покращенню якості випалених обкотишів. Таким чином, рециклінг набуває не лише економічного, а й якісного значення.

Металургія традиційно є галуззю, що найбільш ефективно використовує внутрішній рециклінг: повернення пилу доменних і сталеплавильних печей, утилізація тепла відхідних газів та інші технологічні рішення. Проте понад 70 % техногенних відходів, за даними світової практики, неможливо переробити на підприємствах, які їх утворюють.

Заміна природної сировини техногенною дозволяє знизити енерговитрати на 20–30 %. Потужності сучасних металургійних агрегатів, здатних працювати в широкому діапазоні температур, тисків і складу шихти, роблять галузь універсальним інструментом для переробки значної частини виробничих і побутових відходів без масштабних капітальних витрат. Особливо ефективними в цьому плані є шарові процеси — шахтні печі, конвеєрні машини та аналогічні апарати, що забезпечують інтенсивний тепло- та масообмін.

## 4.2. Використання відходів металургійного виробництва як часткових заміників концентрату та флюсів

### 4.2.1. Промислові випробування технології виробництва залізорудних обкотишів із додаванням замасленої окалини прокатних цехів

Під час прокатування сталі утворюється окалина різних фракцій:

- +10 мм — осідає у напрямках під станом;
- –10 + 2 мм — видаляється гідрозмивом;
- менше 2 мм — накопичується у вторинних відстійниках.

Її вихід становить 2–4 % від маси прокатуваного металу. За структурою окалина — це тонкі пластинчасті частинки, що містять темно-сірий вюстит, світліший магнетит і вузьку гематитову кайму [25].

У прокатних цехах застосовують різні мастильні матеріали (автол, АК-10, АК-15, індустріальні масла, пальмове масло, мастило ИП-1), і частина їх потрапляє до окалини. У вторинних відстійниках концентрація окалини становить близько 0,6 г/л, мастил — 10–40 мг/л, а при використанні пальмового масла — до 200–300 мг/л. Кількість осаду, який вдається відібрати, не перевищує 75–80 %, при цьому він осідає протягом 30–40 хвилин. Отриманий шлам (фр. >0,2 мм, густина ~2 т/м<sup>3</sup>) містить близько 30 % вологи, 22–30 % мастил і 65–72 % заліза [25].

Основні напрями використання замасленої окалини стосуються її введення в агломераційну шихту. Проте вміст мастил у ній не повинен перевищувати 0,2 %, оскільки надлишок призводить до вібрацій роторів і забруднення газоочистки [3]. Зниження кількості мастила досягають термічною обробкою. Також існує досвід використання окалини для отримання брикетів [25].

На Центральному ГЗК було проведено промислові випробування з виробництва офлюсованих залізорудних обкотишів із додаванням замасленої окалини. Через пластинчасту форму та широкий гранулометричний склад її перед використанням потрібно здрібнювати. Крім того, через вологість і наявність масла введення 1–3 % окалини без попередньої підготовки є неефективним. Тому

окаліну подрібнювали разом із вапняком у шарових вентильованих млинах, використовуючи гарячий теплоносій.

Замаслену окаліну, що надходила з відстійників ПАТ «Криворіжсталь», транспортували у піввагонах. Вміст вологи та мастил становив близько 20 % кожного. Процес здрібнювання суміші окаліни та вапняку (співвідношення 1:10) досліджували на млинах продуктивністю 1 і 30 т/год. Хімічний склад компонентів наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Хімічний склад компонентів суміші, %

Матеріал	Fe <sub>общ</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	П.П.П	Масло
Окаліна	64,9	38,3	1,17	-	3,87	5,6	18,84
Вапняк	-	-	2,02	43,60	6,59	41,02	-

Суміш без попереднього дроблення подрібнювали в шаровому млині продуктивністю 1 т/год протягом 16 год. Температура сушильного агрегату на вході в млин становила 200°C. Нижче наведений состав здрібненої суміші.

Fe <sub>общ</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	П.П.П	Масло	Окаліна
14,95	8,98	2,79	34,0	6,13	36,58	0,74	23,03

Вміст класу -0,071 мм у здрібненому продукті перебував в межах 57,6 – 63,9 %.

Суміш, що подрібнюється в шаровому млині Ш-32, крім вищевказаних компонентів, включала бентоніт. Хімічний аналіз цих компонентів наведений у табл. 4.2.

Таблиця 4.2

Хімічний склад трикомпонентної суміші, %

Матеріал	Fe <sub>общ</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	П.П.П	Масло
Вапняк	-	-	1,78	42,90	10,11	41,6	-
Бентоніт	-	-	59,4	3,13	2,91	4,75	-
Окаліна	64,9	38,3	1,17	-	3,87	5,6	18,84

Хімічний склад суміші, здрібненої протягом двох діб, наведений нижче.

Fe <sub>общ</sub>	FeO	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	П.П.П	Масло
13,0	8,87	9,92	29,2	5,57	31,9	19,95

Вміст класу -0,071 мм склав 88,2 %.

Під час промислових випробувань продуктивність вентилязованого млина стабілізували на рівні приблизно 20 т/год. Температура теплоносія на вході в агрегат досягала 800 °С, а при виході з млина знижувалася до близько 70 °С. Після зупинки устаткування виконали візуальний огляд внутрішніх елементів. На поверхні лопаток роторів вентиляторів VM1-1 і VM1-2, а також у ділянках повітряного тракту з максимальною швидкістю руху газового потоку, накладення суміші не виявили.

Невеликі зони відкладання, аналогічні тим, що виникають під час подрібнення звичайної композиції на основі вапняку й бентоніту, з'являлися лише в ділянках із підвищеним гідравлічним опором — зокрема, у сепараторному вузлі та перед циклонами.

Після подрібнення отриману композицію вводили в загальну масу флюсів. Залишковий вміст мастильної фази у продукті становив 0,76–1,52 %, що відповідає 70–84,8 % видалення олійних компонентів у вентилязованому млині.

Далі розпочали етап формування обкотишів із використанням цієї суміші. Норма витрати становила 0,18 т суміші на 1 т концентрату. Формування й випал проводили на установці ОКМ-5-108, для якої шихту готували в окремій технологічній лінії. Офлюсування здійснювали за рахунок композиції, отриманої спільним подрібненням вапняку та замащеної окалини. За умови, що вміст окалини у флюсувальній суміші становив 20 %, фактична її витрата досягала 30–40 кг на 1 т обкотишів.

Під час досліджень визначали гранулометричні характеристики та міцність сирих гранул, сформованих із суміші концентрату, окалини, вапняку та бентоніту. Вихід придатних гранул розміру 10–20 мм становив 70–84 %, тобто був на рівні стандартного виробництва. Міцність сирих обкотишів при стисканні коливалася в межах 11–18 Н на гранулу, а їх ударостійкість забезпечувала витримування понад 20 падінь із висоти 300 мм.

Випал обкотишів проводили відповідно до діючого на комбінаті технологічного регламенту. Хімічний склад вихідної шихти та отриманих обпалених обкотишів наведено нижче (у відсотках).

Fe	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Основність
58,82	4,1	0,95	7,81	0,69
60,01	4,77	1,04	7,96	0,73

Нижче наведені показники якості обпалених обкотишів (за результатами випробувань у стандартному барабані), %:

Показники	Звичайні обкотиші	Обкотиші, офлюсовані сумішшю окалини з вапняком
Індекс на удар	82,0 – 83,0	86,0 – 86,6
Індекс на стирання	14,5 – 15,5	10,6 – 11,3
Міцність на стиск, кН		1,6 – 1,9

Якість обпалених обкотишів при використанні флюсової суміші із замасленою окалиною майже не змінилася. За розрахунками, підвищення вмісту заліза в обкотишах при введенні 15 кг окалини на 1 т продукції становить лише 0,07 %.

Флюсова суміш забезпечує середній внесок заліза у шихту на рівні 6,86 %. При фактичній витраті суміші 153,5 кг на 1 т обкотишів кількість доданого заліза складає 10,53 кг на 1 т продукції, тобто еквівалент 15 кг окалини. За період досліджень було виготовлено близько 32,7 тис. т обкотишів, що дозволило зекономити 490 т концентрату.

#### 4.3. Промислові випробування технології виробництва обкотишів із заміною коксівного палива відходами збагачення вугілля (аргіліт)

Для проведення наступного етапу експериментальних робіт використовували аргіліт, отриманий зі збагачувальної фабрики. Даний матеріал характеризувався рядом фізико-хімічних показників, що визначають його придатність для використання у технологічному циклі виробництва обкотишів.

Аргіліт, як замінник коксика, вводили у шихту для обкотишів у певній нормі, враховуючи його енергетичні та відновні властивості. Завдяки цьому можна було частково зменшити витрату коксика без погіршення якості кінцевої продукції.

Процес приготування шихти передбачав подрібнення аргіліту до необхідної фракції, а також його змішування з основними компонентами — концентратом, вапняком і бентонітом. Подрібнення виконувалося у шарових вентильованих млинах, що забезпечувало рівномірність суміші і сприяло ефективному видаленню залишкової вологи та мастильних домішок.

При промислових випробуваннях визначали такі параметри обкотишів:

гранулометричний склад готової шихти;

вихід придатних обкотишів за фракцією 10–20 мм;

механічну міцність сирих і обпалених гранул;

термічну поведінку та спікання під час проходження через випалювальну машину.

Експериментальні дані показали, що використання аргіліту не погіршує якість обкотишів, забезпечує стабільний вихід придатних гранул і підтримує міцність на стиск у межах нормованих значень. Крім того, застосування відходів збагачення вугілля дозволяє знизити витрату природного коксика, що позитивно впливає на економічність і енергоефективність виробництва.

Таким чином, аргіліт може розглядатися як ефективний і екологічно доцільний компонент шихти, здатний частково замінювати традиційне паливо та підтримувати стабільні технологічні показники у процесі виготовлення обкотишів.

Таблиця 4.3

## Характеристика твердого палива

Тип твердого палива	Масова частка класів, %							
	+10 мм	+5 мм	+3 мм	+1 мм	+0,5 мм	+0,1 мм	+0,071 мм	- 0,071 мм
Коксик у поточному виробництві	9,1	23,4	24,9	42,6	-	-	-	-
Коксик Баглейського КХЗ	18,9	24,3	29,8	27,0	-	-	-	-
Аргіліт	-	-	13,9	23,9	17,8	34,7	1,1	8,6

Таблиця 4.4

## Технічний аналіз твердого палива

Тип твердого палива	Масова частка класів, %			
	Вологи	Сірки	Золи	Вуглецю
Коксик у поточному виробництві	14,5	1,60	22,7	73,9
Коксик Баглейського КХЗ	27,5	1,61	16,0	82,1
Аргіліт	5,5	1,29	29,5	70,0

Згідно з даними таблиці 4.5, аргіліт вирізняється низьким вмістом вологи порівняно з коксиками, різниця становить 9–22 %. Його дрібніший гранулометричний склад (клас <0,5 мм) значно скорочує потребу в додатковій підготовці перед використанням у шихті, що зменшує витрати часу і енергоресурсів. Паралельно аргіліт містить менше сірки, при цьому показники золи та вуглецю залишаються порівнянними з коксиками, що робить його технологічно сумісним матеріалом.

Беручи до уваги економічні та технологічні переваги, використання аргіліту здатне істотно знизити собівартість виробництва обкотишів на Центральному ГЗК, одночасно підтримуючи необхідну якість шихти.

Промислові випробування протягом чотирьох днів (23–27 серпня) підтвердили ефективність застосування аргіліту як заміника коксика. В результаті

досліджень встановлено, що введення відходів збагачення вугілля у шихту забезпечує стабільні фізико-хімічні властивості обкотишів та сумісність з іншими компонентами технологічної суміші. Фізико-хімічні характеристики всіх складових шихти наведені в таблиці 4.5, що дозволяє оцінити вплив аргіліту на процес виробництва та якість кінцевої продукції.

Таким чином, заміна частини коксика аргілітом не тільки технічно обґрунтована, а й економічно вигідна, зменшуючи витрати на підготовку матеріалу та сприяючи більш раціональному використанню ресурсів комбінату.

Таблиця 4.5

Фізико-хімічні характеристики вихідних компонентів шихти

Найменування показників	Періоди випробувань	
	Базовий (15 – 21.08)	Дослідний (23. - 27.08)
Концентрат, %:		
Масова частка вологи	9,87	9,8
Fe <sub>общ</sub>	66,56	66,26
SiO <sub>2</sub>	6,95	7,45
кл. - 0,071 мм	93,5	93,1
Вапняк, %:		
CaO	48,1	48,1
MgO	3,61	3,61
SiO <sub>2</sub>	2,8	2,8
Бентоніт:		
Набухаємість, раз	7,6	7,6
Тверде паливо		
Коксик, %		
Масова частка вологи	11,7	-
Вуглець	76,43	-
Зола	23,6	-
Сірка	1,353	-
Аргіліт, %:		
Масова частка вологи	-	16,1
Вуглець	-	57,5
Зола	-	42,28
Сірка	-	1,112

Порівняльний аналіз базового та дослідного періодів виробництва показав, що загальний вміст вуглецю у шихті залишався практично стабільним — 0,34 % у базовому та 0,37 % у дослідному варіанті. Водночас через підвищений вміст золи

в аргіліті (42,3 %) порівняно з коксиком (23,6 %) спостерігалася збільшена питома витрата матеріалу: 7,65 кг аргіліту на 1 т обкотишів проти 6,9 кг коксика.

Незважаючи на відмінності у складі добавок, гранулометричний розподіл шихти та показники міцності сирих обкотишів залишалися практично однаковими для обох варіантів (див. табл. 4.7), що свідчить про стабільність технологічного процесу при заміні коксика на відходи збагачення вугілля.

Термічна обробка обкотишів проводилася за однаковими режимами та продуктивністю випалювальної машини. За результатами досліджень, показники міцності обпалених обкотишів, вміст дріб'язку та хімічний склад не зазнали змін при використанні аргіліту порівняно з коксиком (табл. 4.9).

Таким чином, інтеграція аргіліту у шихту дозволяє зберегти технологічні параметри виробництва, не погіршуючи якість обкотишів. Застосування цього відходу одночасно сприяє зниженню собівартості продукції та підвищенню ефективності ресурсозбереження на підприємстві.

Таблиця 4.6

## Показники якості сирих обкотишів

Найменування показників	Періоди випробувань	
	Базовий (15 – 21.08)	Дослідний (23. - 27.08)
Масова частка вологи, %	8,95	9,5
Міцність на удар, раз	3,5	3,6
Міцність на стиск, кг/обкот.		
Сирих	0,98	0,96
Сухих	4,1	4,1
Вміст класу, %		
+18 мм	7,66	8,7
-8 мм	6,4	7,2
Вихід придатного класу, % (+8 – 18 мм)	85,8	84,1

Таблиця 4.7

## Показники параметрів термообробки обкотишів

Найменування показників	Періоди випробувань	
	Базовий (15 – 21.08)	Дослідний (23. - 27.08)
Навантаження по сирих обкотишам, т/год	443,20	446,60
Кількість сирого відсівання, т/год	105,10	112,6
Годинна продуктивність випалювальної машини, т/год	292,60	297,10
КІО випалювальної машини	0,99	0,86
Пит.витрата газу, нм <sup>3</sup> /т	8,70	10,2
Пит.витрата ел.енергії, кВт/год	23,90	24,2
Температурний режим, °С		
Сушка І	306,0	305,2
Сушка ІІ	243,0	244,0
Підігріву	583,0	552,0
Спікання	1220,0	1220,0
В 14 в/к	339,0	343

Характеристика обпалених обкотишів

Найменування показників	Періоди випробувань	
	Базовий (15 – 21.08)	Дослідний (23. - 27.08)
Міцність на стиск, кг/обкот	226	200
Міцність на удар, %	90,3	89,5
Міцність на стирання %	8,8	8,6
Вміст дріб'язку в обпалених обкотишах, %	4,1	4,1
Хімічний склад, %		
Fe <sub>общ</sub>	64,31	63,95
FeO	3,64	3,29
CaO	0,72	0,81
MgO	0,36	0,42
SiO <sub>2</sub>	7,52	7,90
S <sub>общ</sub>	0,010	0,009
Основність д.од.	0,14	0,16

Впровадження аргіліту як замітника коксика у шихту обкотишів не призвело до зміни технологічних режимів виробництва та термообробки, а також не вплинуло на механічні властивості готових виробів. Основна мета досліджень полягала у визначенні можливості використання аргіліту для виготовлення обкотишів підвищеної основності (1,1–1,2) та оцінки його впливу на металургійні показники доменної плавки.

Процес впровадження аргіліту починався із підготовки шихти: дрібність матеріалу аргіліту дозволяла зменшити обсяги його попередньої обробки, а знижений вміст вологи зменшував потребу у додатковому сушінні. Порівняльний аналіз фізико-хімічних характеристик аргіліту та коксика показав, що аргіліт містить менше сірки при збереженні аналогічного рівня вуглецю та золи, що сприяє поліпшенню екологічних та економічних показників виробництва.

При виробництві обкотишів було встановлено, що питома витрата аргіліту (7,65 кг/т обкотишів) дещо перевищує витрату коксика (6,9 кг/т) через підвищений вміст золи. Однак гранулометричний склад шихти та показники міцності сирих обкотишів залишилися на рівні традиційних технологій. Термообробка

обкотишів проводилася за стандартними режимами, і контрольні виміри підтвердили, що зміни у хімічному складі та механічних властивостях готових виробів відсутні.

Металургійна оцінка обкотишів, виконана в інститутах «Механобрчермет» та Чорної Металургії, показала, що підвищення основності шихти безпосередньо впливає на покращення металургійних характеристик. Зокрема, обкотиші з вугіллям демонструють більш щільну агломератну структуру, що дозволяє збільшити їх частку у доменній шихті та підвищити загальний вміст заліза в процесі плавки.

Промислові випробування на металургійних підприємствах (заводи ім. Петровського, Запорізький та Єнакіївський) підтвердили, що застосування обкотишів підвищеної основності з вугіллям забезпечує підвищення продуктивності доменних печей на 0,62–1,34 %, скорочення витрати коксу на 0,26–1,67 % та зниження виносу колошникового пилу на 26–32 %.

Отримані результати демонструють, що інтеграція аргіліту у виробництво обкотишів не лише зберігає технологічні параметри процесу, а й сприяє зниженню собівартості продукції, підвищенню ефективності використання паливних ресурсів та покращенню металургійних характеристик готових виробів. Такий підхід дозволяє одночасно досягти економічних та екологічних переваг у виробництві залізородних обкотишів.

Таблиця 4.9

Металургійні властивості обкотишів

Характеристика проби	Пористість заг. вих. обкотишів, %	Показники відновлення, %		
		Вміст кл. - 0,5 мм	Вміст кл. + 5 мм	Ступінь відновлення
Обкотиші основністю 0,6 без вугілля	21,4	9,4	50,3	49,64
Обкотиші основністю 1,2 без вугілля	22,8	9,4	51,27	52,21
Обкотиші основністю 1,2 з 1 % вугілля	26,44	8,2	64,2	64,1

Якісно-експлуатаційні характеристики окатишевої продукції на сучасному етапі розвитку виробництва демонструють суттєве зростання порівняно з параметрами окатишів, виготовлюваних у 1980-х роках і задіяних у доменних процесах тієї доби. Комплексна верифікація цього факту, здійснена шляхом використання окатишів підвищеної металургійної цінності, їх технологічного супроводження та подальшого експертного аналізу профільними науково-дослідними установами (зокрема ІЧМ), створює передумови для істотного зростання конкурентного статусу цієї продукції на ринку металургійної сировини.

4.4. Впровадження вдосконаленої ресурсо- та енергозберігаючої технології виробництва обкотишів із застосуванням твердого палива

4.4.1 Перспективи використання альтернативних джерел теплової енергії

Серед численних технологічних варіантів термічного зміцнення залізородних окатишів особливе провідне місце посідають дві технологічні схеми — процес типу Grate–Kiln, що базується на використанні рухомої колосникової решітки конструкції «Аліс-Чалмерс» у поєднанні з обертовою трубчастою піччю, та процес Lurgi з рухомою стрічково-колосниковою решіткою безпечного неперервного транспортування шару матеріалу.

Для повноти технологічної класифікації варто згадати й інші, менш поширені методи: процес Gringault, у якому структурна міцність окатишів досягається шляхом використання цементу як зміцнювального агента; технологія McKee з рухомою решіткою; а також процеси MacDowell–Wellman, Huntington–Heberlein, Saphis – Combustion Heat Fast, які не набула промислового поширення через технологічні обмеження й недостатню експлуатаційну надійність. Ще менший інтерес викликали методики, що ґрунтувалися на автоклавній гідратації, — з огляду на їхню конструктивну складність і низьку рентабельність.

Слід акцентувати, що на сучасному етапі ведуться інтенсивні дослідження, спрямовані на модернізацію згаданих технологічних схем, зокрема через цілеспрямоване введення твердого відновника до концентрату до стадій огрудкування та гідратації. Такий підхід формує можливість здійснення інтегрованих процесів: наприклад, отримання ливарного чавуну безпосереднім

переплавом окатишів у вагранках або радикальна інтенсифікація відновних реакцій у резервній зоні доменної печі. Попередні спроби використання шахтних печей для випалювання окатишів не продемонстрували промислової перспективності через низьку продуктивність, проблеми керованості й надмірні теплові витрати.

Протягом останніх десятиліть питома витрата теплоти на виробництво окатишів неухильно знижувалася: якщо в ранніх промислових агрегатах вона досягала 1700 МДж/т для гематитових та 840 МДж/т для магнетитових окатишів, то нині ці показники зменшено відповідно до 920 і 380 МДж/т. Завдяки екзотермічному ефекту реакції окиснення магнетиту до гематиту теоретична теплова потреба для магнетитової сировини є на 468 МДж/т нижчою порівняно з окисненими концентратами.

Процес Lurgi генетично походить від технології агломерації на агломашині: перші випалювальні агрегати мали значно спрощену конфігурацію газових потоків порівняно з сучасними високотехнологічними установками. Новітні інженерні рішення — двошарове завантаження із роздільним сушінням шарів, селективно-диференційована переточна система газів, організація єдиної зони інтенсивного обігріву (зона спікання), а також комплексна рециркуляція газоповітряних потоків — забезпечили різке зниження питомої витрати палива у 1,9–2,2 рази, зменшення газових викидів у 2,5–3 рази, скорочення теплових втрат із відхідними газами у 3,5–4 рази та падіння питомої електровитрати тягових агрегатів на 20–50 %. Помітно зменшено також емісію оксидів азоту — у 3–4 рази.

Конвеєрні випалювальні машини мають низьку очевидних технологічних переваг: високу адаптивність до важкоогрудковуваних концентратів, конструктивну простоту та значно вищий рівень утилізації теплоти. Водночас їхні ключові недоліки пов'язані з високою енергоємністю тягових ексгаустерів та збільшеним електроспоживанням.

У промисловому масштабі апробовано реконструкцію системи обігріву випалювальних машин, яка забезпечує можливість повної або часткової заміни

природного газу вугіллям — з перспективою роботи також на мазуті чи змішаному паливі. Практично всі поширені види палива є технологічно сумісними для процесів отримання окатишів.

Заміщення природного газу твердим паливом може бути реалізоване за кількома схемами: введенням твердого палива до сирих окатишів разом із в'язучими; використанням мазутно-вугільних сумішей; газифікацією твердого палива; безпосереднім твердопаливним обігрівом. Для цих цілей розроблені спеціальні системи спільного спалювання мазуту й твердого палива. Подрібнення вугілля здійснюється у млинах з псевдозрідженим шаром, сформованим вугільним пилом та перегрітою водяною парою; при цьому забезпечується 100-% вміст часток розміром менше 44 мкм, що є критично важливим параметром для рівномірного горіння та повної теплоутилізації.

Таблиця 4.10

Властивості різних видів палива

Види палив	Технічний аналіз				Q КДж/к г(м <sup>3</sup> )
	W	A	V	S	
Мазут	2-3	-	-	1,0-2,0	41,840
Природний газ	1-2	-	-	< 1	32,216
Зріджений газ	-	-	-	< 1	46,860
Генераторний газ	3-4	-	-	< 0,5	5,439
Антрацит	5-8	8-11	5-10	0,8-2,0	31,798
Інші вугілля	8-10	7-8	30-40	0,6-2,0	29,288
Енергетичне вугілля	8-10	12-15	10-40	1,0-2,0	27,196
Коксик	5-6	9-10	1-2	0,8-1,8	28,451
Нафтовий кокс	2-3	3-4	8	1,2-1,8	29,288
Буре вугілля	40-50	8-10	50-60	0,2-0,5	14,644
Деревне вугілля	20-50	15-20	25-30	0,5-0,8	20,920

Опалювання твердим паливом у вигляді вугільної фракції на агрегатах із обертовими трубчастими печами має промислові аналоги у сфері цементного виробництва, що дозволяє екстраполювати їхній досвід на металургійні технології. Водночас для запобігання утворенню настільних відкладів у робочому просторі печі необхідно здійснювати ретельний контроль як хімічного

складу застосовуваного вугілля, так і температури плавлення його мінеральних домішок, передусім золи. Результати промислових експериментів засвідчили, що, попри наявність експлуатаційних ускладнень, характерних для технологій спалювання вугілля, правильний добір його марок дозволяє повністю компенсувати використання природного газу та забезпечити стабільний тепловий режим агрегату.

Аналіз еволюції зазначених технологій свідчить, що тенденція до масового переходу на тверде паливо поки що не набрала інтенсивності, однак радикальний злам у цій сфері стає ймовірним за умов істотного зростання вартості природного газу, погіршення логістики його постачання або регуляторних обмежень щодо його промислового споживання.

Беручи до уваги недоліки прямого спалювання вугілля та переваги газового опалення, у промислово-технологічних колах знову активізувалися дискусії щодо доцільності газифікації твердого палива. Утім, потреба у значних капіталовкладеннях робить такий варіант економічно доцільним лише в умовах специфічної ринкової кон'юнктури, що ускладнює практичну реалізацію газифікаційних схем для виробництва окатишів.

Найпростішим технологічним варіантом часткової заміни природного газу є введення до концентрату перед стадією огрудкування певної кількості тонкоподрібненого коксика або кам'яного (рідше — деревного) вугілля. У другому розділі дисертаційної роботи було обґрунтовано наукові засади цього підходу та продемонстровано синергійний ефект поєднання газового обігріву шару з наявністю твердого палива в структурі окатишів.

4.4.2. Промислові випробування та впровадження технології одержання окатишів із добавкою твердого палива в шихту

Промислові дослідження та поетапне впровадження вдосконаленої технології здійснювалися на конвеєрній випалювальній машині нового покоління ОК-324/336, оснащених 4-метровим випалювальним візком, інжекційними газовими пальниками в зоні спікання та системою подачі теплоносія знизу через газоповітрярозподільчі пристрої (ГВРУ), інтегровані в дуттєві камери.

Перший пусковий комплекс із зазначеною випалювальною машиною був уведений в експлуатацію у жовтні 1995 року. Під час етапу освоєння агрегату було розроблено ефективний режим тонкого подрібнення суміші бентоніту, вапняку та обпаленого повернення у вентилярованому кульовому млині. Оптимізація газоповітряних потоків дала можливість довести його продуктивність до 45–47 т/год за забезпечення готового продукту з виходом 91–92 % фракції класу  $-0,071$  мм (питома поверхня 455–480 м<sup>2</sup>/кг). Усі параметри очищення газоповітряної суміші були приведені у відповідність із нормами ГДК ( $<80$  мг/м<sup>3</sup>).

Оскільки ефективність змішування шихти у проектних барабанних огрудкувачах (70–74 %) не відповідала вимогам для формування високоякісних сирих окатишів (90–95 %), а після змішування у шихті зберігалось надмірне число крупних частинок, перед огрудкувачами встановили дезінтегратори шихти. Попри конструктивні недоліки, що обмежили їх тривалий ресурс, ці пристрої забезпечили збільшення частки необхідних за крупністю гранул у сирих окатишах на 8–11 %.

Паралельно були вдосконалені окремі вузли чашових огрудкувачів діаметром 7,5 м — зокрема привод, ножі очищення, форсунки розпилення води. Оптимізовано технологічні параметри їх роботи: продуктивність 90–120 т/год; кут нахилу чаші 46–48°; частота обертання 7,0–7,5 хв<sup>-1</sup>; вихід фракції 8–18 мм — 89–95 %; вологість сирих окатишів 8,9–9,3 %; міцність на стиск — 9–14 Н/окатиш; стійкість до удару — 5–11 разів.

Для поліпшення гранулометрії сирих окатишів, що подаються на випалювання, було спроектовано установку роликового грохоту для попереднього відсівання фракції +18 мм.

У процесі експлуатації машини ОК-324/336 проводилася системна оптимізація теплотехнічної структури горна та траєкторії газоповітряних потоків. Ретельне вивчення газодинаміки та теплового балансу зони спікання дозволило

модернізувати конструкцію інжекційних пальників і зменшити інтенсивність ошлакування.

Інструментальні вимірювання температури й витрат теплоносія показали недостатню ефективність зон сушіння, що спричиняло вилучення лише 60–70 % вологи через низьку температуру теплоносія (150–250 °С). У відповідь було сформовано нову раціональну схему розподілу технологічних зон у горні:

- зона попереднього сушіння переведена з режиму «прососу» на нижню продувку;
- дві вакуум-камери підключено до високотемпературного димососа ДЗ;
- перерозподілено теплоносій між охолоджувальними зонами;
- підвищено теплову ефективність II зони сушіння.

Завдяки сукупності впроваджених заходів основні техніко-економічні показники роботи огрудкувального комплексу перевищили проектні.

У лабораторних умовах було відпрацьовано режим комбінованого спікання окатишів — із введенням твердого палива до шихти та використанням природного газу як джерела зовнішнього тепла. Цей режим пройшов повний цикл промислових випробувань у період червень–листопад 2000 року. У листопаді 2000 року фабрика огрудкування повністю перейшла на постійне використання твердого палива в шихті.

Для порівняльного аналізу було обрано найкращий за всю історію експлуатації машини базовий період — червень 2000 року. Фізико-хімічні параметри концентрату, вапняку та бентоніту в базовий і дослідний періоди практично не відрізнялися.

Вугілля ж характеризувалося значною варіабельністю: вологість 8,6 %, зольність 20–22 %, вміст вуглецю 74–76 %. Подрібнення проводили в млині №1 разом із частиною вапняку у співвідношенні 1:1 за масою. Готова суміш містила 81,7–96,4 % класу –0,071 мм і 35–39 % вуглецю, після чого дозувалася у шихту в кількості 1 % від маси концентрату.

Коливання основності шихти (0,2–1,74) та вуглецю (0,14–2,3 %) були значними, що зумовлено недосконалістю дозаторів і неоднорідністю компонентів.

Режими роботи огрудкувачів у базовий та дослідний періоди збігалися, а введення 0,5–1 % тонкоподрібненого вугілля не спричинило змін у параметрах формування сирих окатишів.

Таблиця 4.11

Характеристика сирих обкотишів

Періоди	Масова частка вологи, %	Міцність		Вміст класів, %		
		Скидання, раз	Опір стиску, кг/обкот	+18 мм	8 – 18 мм	- 8 мм
Базовий	10,20	4,2	1,1	10,1	83,8	6,0
Дослідний I	10,05	4,9	1,15	14,3	82,3	6,0
Дослідний II	10,15	4,0	1,0	14,8	82,0	6,4
Дослідний III	10,20	4,20	1,10	12,04	82,03	6,0

Режимні параметри термічної обробки залізородних обкотишів і технологічні характеристики функціонування випалювальної машини як у вихідному (базовому), так і в експериментальному періодах експлуатації наведено у таблиці 4.12.

Інкорпорація твердого палива до складу шихтової суміші зумовила істотну інтенсифікацію кінематичних характеристик агрегату: робоча швидкість переміщення випалювальних візків була збільшена з 1,8–2,0 м/хв до 1,9–2,2 м/хв. Паралельно з цим зафіксовано приріст температурних параметрів у вакуум-камері № 15 — від 280–350 °С до стабілізованого діапазону 340–360 °С.

Додаткова теплота, що генерується внаслідок внутрішнього спалювання твердого палива у структурі огрудкованого матеріалу, а також за рахунок підвищеного нагрівання повітряного потоку у зоні охолодження, забезпечила можливість суттєвого зниження сумарної витрати природного газу, який споживається випалювальною машиною. Його витрата зменшилась із 3960–4360 м<sup>3</sup>/год до 3470–3710 м<sup>3</sup>/год. У той же час у переточному колекторі було зафіксовано приріст температури теплоносія з 860–870 °С до 900–930 °С.

У дослідних циклах роботи агрегату також встановлено зниження кількості обпаленого повернення з 20–30 т/год до 15–20 т/год. Наслідком цього стало підвищення годинної продуктивності випалювальної машини з 258,6 т/год до 281 т/год. При цьому питома витрата природного газу на процес спікання зменшилася з 16,8 м<sup>3</sup>/т до 12,3–13,1 м<sup>3</sup>/т, а питома витрата електроенергії — з 32,3–37,1 кВт·год/т до 29,3–33,8 кВт·год/т готових обкотишів.

Показники механічної міцності обпалених гранул та фракційний склад дріб'язку в готовій продукції залишилися в межах технологічної норми. Однак відмічено підвищення вмісту монооксиду заліза з 1,4 % до 3,67–4,11 %. Незначне зниження міцнісних характеристик пояснюється збільшенням пористості обпалених обкотишів, що є природним наслідком інтеграції твердопаливної компоненти до їх мікроструктури.

Комплексний аналіз отриманих даних однозначно вказує на те, що застосування обкотишів, модифікованих твердим паливом, супроводжується підвищенням температури у переточному колекторі на 40–70 °С, що корелює з інтенсифікацією екзотермічної реакції окиснення магнетиту в зоні охолодження.

Результати розрахункового моделювання впливу зміни витрати природного газу на термодинаміку газових продуктів, які надходять у зону спікання (див. Додаток Б), демонструють, що збільшення витрати природного газу на кожні 100 м<sup>3</sup>/год спричинює відповідне зростання температури димових газів, які надходять у тепловий тракт агрегату, що, у свою чергу, істотно впливає на рівноважні теплотехнічні умови процесу спікання.

Таблиця 4.12

## Параметри роботи випалювальної машини

Параметри роботи випалювальної машини	Базовий період	Дослідний період
<b>Загальні показники</b>		
Кількість сирих обкотишів зі складального конвеєра, т/год	400-440	430-500
Кількість повернення після роликового грохоту, т/год	60-80	50-70
Кількість сирих обкотишів, що укладаються на машину, т/год	340-360	360-380
Висота шару обкотишів, мм	460-480	460-480
Висота постелі, мм	100	100
Швидкість машини, м/хв.	1,8-2,0	1,9-2,2
Кількість обпаленого повернення, т/год	20-30	15-20
Питома витрата газу, м <sup>3</sup> /год	15,3-16,8	12,3-13,1
<b>Температурно-вакуумний режим по зонах</b>		
<b>Зона сушки I:</b>		
Тиск під шаром, мм у ст.	500-600	500-600
Температура теплоносія під шаром, °С	230-290	300-500
<b>Зона сушки II :</b>		
Розрідження над шаром, мм в. ст.	15-25	15-25
Розрідження під шаром, мм в.ст.	400-450	450-480
Температура в горні, °С	200-220	220-230
<b>Зона підігріву:</b>		
Розрідження над шаром, мм в. ст.	5-10	
Температура в горні, °С	500-700	
<b>Зона спікання:</b>		
Розрідження над шаром, мм в.ст.	2-6	
Температура по пальниках, °С		
1	870-990	850-950
2	1050-1150	1000-1100
3	1150-1250	1150-1200
4	1200-1270	1170-1270
5	1220-1250	1200-1240
6	1220-1250	1200-1240
7	1150-1200	1130-1170

Температура по вакуум камерам і камерам дуття, °С		
2	230-290	300-340
10	150-180	120-140
12	180-200	160-180
13	200-250	180-220
14	270-340	310-350
15	280-350	340-360
16	110-130	350-400

Отримані у результаті промислових випробувань кількісні та якісні показники переконливо демонструють, що зафіксоване зменшення питомої витрати природного газу сягає 65,2 %, причому відповідний енергетичний дефіцит, який за умов традиційної технологічної схеми компенсувався би збільшенням подачі газового пального, у дослідній конфігурації компенсується теплом, генерованим унаслідок гетерогенного окиснення вуглецевмісної фракції твердопаливної компоненти обкотишів киснем циркулюючого теплоносія. Зазначений процес, будучи термодинамічно сприятливим при параметрах, характерних для зони охолодження та високотемпературного перетікання, формує додатковий ентальпійний вклад, що еквівалентний значній частці заміщеної газової енергії.

Комплексна інтерпретація отриманих даних, інтегрована з положеннями розробленої термокінетичної концепції комбінованого спікання огрудкованих матеріалів, свідчить про її повну узгодженість із емпірично верифікованими тенденціями. Зокрема, наведені результати підтверджують теоретико-аналітичну модель, згідно з якою введення твердого палива у шихтову композицію здатне ініціювати додаткові внутрішньосарові реакції окиснення, інтенсифікувати поверхнево- і внутрішньопористий теплообмін та, відповідно, знижувати потребу у зовнішньому енергетичному забезпеченні з боку газового пального (табл. 4.13).

Додатковим аспектом, що посилює технологічну та енергетичну ефективність процесу, є встановлене у промислових умовах підвищення продуктивності випалювальної машини на 8,66 %. Даний приріст продуктивності, будучи

наслідком оптимізованого термодинамічного режиму та пришвидшених процесів фазових і структурних перетворень у обкотишах, спричинив пропорційне зменшення питомої витрати електроенергії приблизно на 10 %, що свідчить про підвищення загальної енергоефективності системи.

Особливої уваги заслуговує повне, багаторівневе та методологічно значиме узгодження між теоретичними положеннями, результатами лабораторно-моделювальних експериментів, даними промислової апробації та підсумковими характеристиками впровадженої у виробництво вдосконаленої технології спікання. Конвергенція цих незалежних джерел інформації не лише підтверджує валідацію розробленої наукової гіпотези, але й свідчить про її практичну застосовність, надійність і здатність забезпечувати суттєвий технологічний приріст у реальних умовах металургійного підприємства.

Таблиця 4.13

Характеристика обпалених обкотишів

Періоди	Хімічний склад					
	Fe <sub>общ</sub>	Fe	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	S
Базовий	59,8	1,4	5,7	0,75	7,6	
Дослідний I	60,44	3,93	5,24	0,80	7,96	0,04
Дослідний II	59,8	4,11	5,43	1,03	8,31	0,08
Дослідний III	59,9	3,67	5,5	0,84	7,9	0,07
Періоди	Основність, од.	Вміст дріб'язку, 5 мм, %	Опір стиску, кг/обкот	Міцність у барабані, %		Продуктивність машини, т/год
				+5 мм	-0,5 мм	
Базовий	0,80	5,6	227	91,1	8,0	258,6
Дослідний I	0,74	5,2	213	87,9	10,5	281,6
Дослідний II	0,78	5,1	210	89,6	9,30	279,4
Дослідний III	0,80	5,3	217	88,6	10,1	272,0

## Висновки

1. На основі проведеного комплексу лабораторних досліджень було сформовано та експериментально обґрунтовано режим комбінованого спікання обкотишів, який пройшов повний цикл промислової верифікації та подальше впровадження на виробничих потужностях фабрики огрудкування Центрального ГЗК. Ключовою ознакою технологічної концепції є інтегроване введення до шихтової композиції тонкодисперсного твердого палива з одночасним використанням високотемпературних продуктів згоряння природного газу як зовнішнього теплоносія для обігрівання шару матеріалу. Такий конструктивно-технологічний підхід забезпечує реалізацію двокомпонентного джерела теплоти, що формує підвищений рівень термодинамічної стабільності процесу спікання.

2. Виявлено, що сумарна теплова енергія, генерована внаслідок часткового окиснення твердопаливної фракції в об'ємі шару та додаткового теплопереносу високотемпературного повітря із зон охолодження, приводить до суттєвого зниження потреби випалювальної машини у зовнішньому газовому паливі. Зокрема, експлуатаційні витрати природного газу зменшено з 3960–4360 до 3470–3710 м<sup>3</sup>/год, тоді як температура теплоносія в переточному колекторі зросла з 860–870 °С до 900–930 °С. Одночасно зафіксовано зменшення обсягів обпаленого повернення (з 20–30 до 15–20 т/год), підвищення годинної продуктивності випалювальної машини (з 258,6 до 281 т/год) та істотне зниження питомої витрати природного газу (з 16,8 до 12,3–13,1 м<sup>3</sup>/т). Питома витрата електроенергії також демонструє позитивну тенденцію – зниження з 32,3–37,1 до 29,3–33,8 кВт·год/т. Водночас структурно-механічні показники обпалених обкотишів зберігають стабільність, не демонструючи погіршення міцності, тоді як зростання вмісту монооксиду заліза з 1,4 % до 3,67–4,11 % корелює з активізацією окиснювальних процесів у високотемпературному середовищі.

3. Промислові апробації технологічних схем спікання обкотишів, модифікованих введенням у шихту замасленої окалини та заміною коксикової складової аргілітом, підтвердили доцільність та перспективність застосування таких добавок у реальних виробничо-металургійних умовах. Отримані результати свідчать про можливість формування альтернативних шихтових композицій, які забезпечують належний рівень термоструктурної стабільності гранульованого матеріалу та сприятливо впливають на енергоекономічні показники процесу.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Сучасні тенденції розвитку технологій виробництва офлюсованих та неофлюсованих залізородних обкотишів визначають стратегічну необхідність широкомасштабного впровадження багатокомпонентних енерго- та ресурсозберігаючих технологічних рішень. У контексті зростаючої енергетичної волатильності, вимог до екологічної стійкості металургійної сировинної бази та ускладнення мінерально-сировинного складу природних і техногенних ресурсів, підвищення ефективності процесів огрудкування передбачає синергетичне поєднання методів комбінованого теплопідведення, оптимізованої підготовки шихтових компонентів і залучення значних обсягів залізовмісних техногенних мінералізованих матеріалів. Наукова й практична актуальність проведених досліджень визначається відповідністю стратегічним положенням Концепції розвитку гірничо-металургійного комплексу України та реальними техніко-економічними умовами функціонування гірничозбагачувальних комбінатів.

1. Сформульовано та теоретично обґрунтовано наукові засади зниження питомих енерговитрат та підвищення ресурсної ефективності у виробництві залізородних обкотишів шляхом інтеграції комбінованих паливних систем у процеси високотемпературної обробки та паралельного залучення до виробничого циклу залізовмісних відходів, заскладованих у хвостосховищах. Керування тепломасообмінними процесами за умов використання в шихті твердих палив реалізовано на основі закономірностей вертикальної інтенсифікації теплопередачі та масоперенесення в порозійному шарі, що дозволило підвищити керованість і прогностичність термодинаміки загального процесу спікання. У частині утилізації техногенних продуктів збагачення запропоновано науково обґрунтовану методологію їх підготовки з урахуванням зональної неоднорідності хвостосховищ та мінералогічної специфіки фракцій із підвищеним вмістом магнетиту та гематиту.

2. Розроблено теоретичну платформу інтенсифікації процесів високотемпературного окисного спікання шляхом регульованої генерації теплоти, що виділяється при окисненні вуглецю твердого палива та додаткового

оксидного відновлення-відпалювання магнетиту з наступним його реокисненням у зоні охолодження. Комплексний аналіз фізико-хімічної поведінки твердого палива при рівномірному введенні його в об'єм обкотиша дозволив виявити закономірності чергування редуційних та окисних стадій, а також часткове просторово-часове накладання теплогенерувальних реакцій. Встановлено, що 65–75 % вуглецю бере участь у відновних процесах на етапі інтенсивного прогрівання, формуючи передумови для температурного розшарування високотемпературного та низькотемпературного теплоносіїв у вертикальному профілі апарата. Створено узагальнену термодинамічну модель прогнозування утворення монооксиду заліза залежно від фактора вуглецевмісної добавки, основності, температури та тривалості термообробки.

3. Обґрунтовано на системному рівні вплив вуглецю твердого палива як активного енергомінералотвірного компонента на металургійні властивості обкотишів у багатокомпонентних оксидних системах Fe–O–C–Si–Ca. Виявлено, що введення 0,6–0,8 % вуглецю дозволяє істотно зменшити температурний градієнт між периферією та ядром обкотиша, мінімізувати структурну зональність, інтенсифікувати формування розплаву у внутрішніх областях зерна та підвищити пористість термообробленого матеріалу. У доменних умовах це трансформується в покращену відновлюваність в області середніх температур, підвищення температури початку фільтрації первинного розплаву, зниження маси первинного шлаку та зменшення концентрації FeO у ньому.

4. Виконано повний цикл прикладних досліджень з подальшою розробкою технології спікання на машинах нового покоління, що забезпечує підвищення продуктивності та зниження питомих енерговитрат. Промислові випробування підтвердили достовірність теоретичних висновків: продуктивність випалювальної машини збільшено з 258,6 до 281 т/год; питому витрату природного газу знижено з 16,8 до 12,3–13,1 м<sup>3</sup>/т; питому витрату електроенергії — з 32,3–37,1 до 29,3–33,8 кВт·год/т. Водночас температура високотемпературного теплоносія зросла з 860–870 °C до 900–930 °C, а вміст FeO в обкотишах збільшився з 1,4 % до 3,67–4,11 .

5. На основі розгорнутого аналізу просторово-часових параметрів формування пляжових зон хвостосховища доведено, що цей техногенний об'єкт функціонує як природний гравітаційно-сегрегаційний класифікатор тонкошарового типу. Систематизовано закономірності осадження мінеральних часток залежно від швидкості потоку, гідродинамічних характеристик тонкого шару пульпи, коефіцієнтів тертя та кінетики руху частинок у градієнтних полях. На основі цих закономірностей побудовано математичну модель формування техногенного родовища, параметри якої ідентифіковано за фактичними даними хвостосховища Центрального ГЗК. Порівняння експериментальних і модельних профілів концентрації оксидів заліза уздовж пляжу демонструє високу узгодженість, що підтверджує адекватність моделі й дозволяє використовувати її для проектування контурів зон підвищеного вмісту заліза. Середній вміст Fe у магнетитових фракціях становив 10,1 %, що є підставою для їх промислового залучення.

6. На базі сукупності теоретичних та експериментальних положень сформульовано комплекс інженерно-технологічних рекомендацій щодо промислової утилізації залізовмісних техногенних відходів як складової розширеної мінерально-сировинної бази. Запропоновані рішення забезпечують можливість інтеграції техногенних ресурсів у виробничий цикл отримання обкотишів із прогнозованими металургійними властивостями.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Дишлевич І.І., Захарченко В.М. Стан і проблеми доменного виробництва України // Праці V міжнародного конгресу доменників «Виробництво чавуну на межі століть». – Дніпропетровськ: Пороги, 1999. – С. 15–18.
2. Єфименко Г.Г., Ігнатов М.В., Ковальов Д.О. Стан, проблеми та перспективи залізорудної промисловості й виробництва окускованої металургійної сировини // Праці V міжнародного конгресу доменників «Виробництво чавуну на межі століть». – Дніпропетровськ: Пороги, 1999. – С. 18–31.
3. До питання про якість залізорудних матеріалів / Можаренко М.М., Гладков М.О., Нестеров О.С. та ін. // Сталь. – 1997. – № 8. – С. 3–5.
4. Вплив частки окатишів ЦГЗК у шихті на ефективність роботи доменних печей КДГМК «Криворіжсталь» / Дубина О.В., Шеремет В.А., Донськов Є.Г. та ін. // Металургійна і гірничорудна промисловість. – 2001. – № 2. – С. 8–11.
5. К'єлман І. Деякий досвід застосування шихт із підвищеним вмістом лугів // *Jernkontorets Annaler*. – 1994. – Т. 158. – № 2. – С. 39–49.
6. Кіріта К. Використання двовимірної математичної моделі доменної печі для вивчення впливу властивостей агломерату на перебіг плавки // *Тецу то хагане*. – 1985. – Т. 71. – № 4. – С. 61–65.
7. Дослідження в промислових умовах металургійних властивостей залізорудних матеріалів / Беляков В.М., Мірко В.А. та ін. // *Металург*. – 1985. – № 6. – С. 24–27.
8. Kven W. Sinter versus Pellets // *Steel Times*. – 1980. – August. – P. 585–588.
9. Журавльов Ф.М., Севернюк В.В., Лялюк В.П. Перспективи виробництва високоякісної окускованої залізорудної сировини // Праці V міжнародного конгресу доменників «Виробництво чавуну на межі століть». – Дніпропетровськ: Пороги, 1999. – С. 86–89.

10. Матеріали відвідування металургійних підприємств Америки // Чорні метали. – 1977. – № 2. – С. 18–24.
11. Доменна плавка на 100 % окатишів // Експрес-інформація (серія «Підготовка сировинних матеріалів і виробництво чавуну»). – 1985. – Вип. 8. – С. 5.
12. Гаврилюк Л.Я. Про ефективність використання залізорудних окатишів у доменній плавці // Металург. – 1973. – № 8. – С. 8–11.
13. Застосування офлюсованих окатишів у доменній плавці / Бабарикін М.М., Філатов А.Д., Брайченко В.П. та ін. // Сталь. – 1970. – № 8. – С. 673–683.
14. Про вплив окатишів на перебіг доменної плавки / Похвісєв О.М., Юсфін Ю.С., Пареньков О.Є. та ін. // Сталь. – 1973. – № 3. – С. 260–268.
15. Плискановський С.Т., Шокул О.А., Гулига Д.В. Робота доменних печей із застосуванням окатишів ЦГЗК // Металург. – 1971. – № 12. – С. 4–6.
16. Савельєв М.І., Федченко В.М., Брагін Ю.С. Стан доменного виробництва у 1989–1994 рр.: аналітичний огляд. – Асоціація доменників. – Москва–Тула, 1995. – 35 с.
17. Петерс К.Х., Люнген Г.Б. Стан доменного виробництва у ФРН // Stahl und Eisen. – 1990. – Т. 110. – № 2.
18. Мовчан В.П., Ванюкова Н.Д., Ковальов Д.О. Досвід виробництва залізорудних офлюсованих окатишів на Центральному ГЗК із використанням глин попутного видобутку як зв'язувальної добавки // Метал і лиття України. – 1999. – № 8–9. – С. 21–23.
19. Мовчан В.П., Ванюкова Н.Д., Ковальов Д.О. Розробка технології активації глини та її використання для виробництва окатишів // Металургійна і гірничорудна промисловість. – 1999. – № 2–3. – С. 65–67.

20. Технологія виробництва офлюсованих залізорудних окатишів із введенням у шихту твердого палива / Мовчан В.П., Пугач М.Є., Литвинов О.П. та ін. // Гірничий журнал. – 2002. – № 6. – С. 58–59.
21. Мовчан В.П., Бережної М.М., Ковальов Д.О. Перспективи використання кам'яного вугілля при підготовці металургійної сировини // Сучасна металургія початку нового тисячоліття: зб. наук. праць. – Ч. 1. – Липецьк: ЛДТУ, 2001. – 149 с.
22. Ладигічев М.Г., Майзель Г.М., Баранов М.С. Використання пиловугільного палива при виробництві залізорудних окатишів // Тези доповідей науково-технічної конференції «Методичні основи нормування витрат палива в основних виробництвах чорної металургії». – Свердловськ, 1982. – С. 12–13.
23. Вінтовкін О.О., Уділов В.М. Пальникові пристрої випалювальних агрегатів металургійного виробництва. – Челябінськ: Металургія, 1991. – 336 с.
24. Ладигічев М.Г., Буткарєв О.П. Випалювання залізорудних окатишів при шаровому спалюванні твердого палива // Дослідження теплових процесів і агрегатів основних переділів чорної металургії. – М.: Металургія, 1987. – С. 8–11.
25. Ефективність використання пиловугільного палива в доменних цехах України / Плискановський С.Т., Бень Т.Г., Приходько Ю.О. та ін. // Металургійна і гірничорудна промисловість. – 1996. – № 1. – С. 8–12.
26. Вдування пиловугільного палива на порозі нового століття // Новини чорної металургії за кордоном. – 2001. – № 2. – С. 46–47.
27. Поліпшення якості сировинних матеріалів сприяє підвищенню витрат ПВП, що вдувається в доменну піч // Новини чорної металургії за кордоном. – 2001. – № 3. – С. 39–41.
28. Юровський О.З. Сірка кам'яного вугілля. – М.: Видавництво АН СРСР, 1960. – 125 с.

29. Карабасов Ю.С., Валавін В.С. Використання палива в агломерації. – М.: Металургія, 1996. – 264 с.
30. Мовчан В.П. Особливості формування відхідних газів при агломерації // Розробка рудних родовищ: наук.-техн. збірник (до 80-річчя КТУ). – Кривий Ріг, 2002. – С. 145–148.
31. Мовчан В.П. Вплив добавок антрациту в шихту на запиленість газових потоків при випалі окатишів // Розробка рудних родовищ: наук.-техн. збірник. – Вип. 79. – Кривий Ріг, 2002. – С. 72–76.
32. Іванова О.А., Равич Б.М. Збагачення вугілля. – М.: Знання, 1985. – 125 с.
33. Застосування колонної флотаційної машини для отримання малозольних концентратів / Гуремо В.В., Рубінштейн Ю.Б., Чижевський В.Б. // Кокс і хімія. – 1993. – № 5. – С. 12.
34. Віленський Т.В., Хемалян Д.М. Динаміка горіння пилоподібного палива. – М.: Енергія, 1998. – 246 с.
35. Голдобін Ю.М. Про кінетику горіння напівдисперсного коксового пилу // ІФЖ. – 1986. – Т. 50. – № 1. – С. 114–120.
36. Scott Zack. Improvements of pellets production at “Reserve Mining Co. iron ore plant” // Skill Mining Rev. – 1998. – Vol. 67. – № 46. – P. 18–20.
37. Воронов Є.М., Мещерякова Н.І., Делягін П.М. Використання низькоякісного вугілля для випалу залізорудних окатишів // Бюлетень науково-технічної інформації «Чорна металургія». – 1989. – № 5. – С. 6–19.
38. Алліс Чалмерс Ф. Використання вугілля замість природного газу на установці «решітка – трубчаста піч» // Праці симпозиуму з використання твердого палива при випалі окатишів. – Кривий Ріг, 1992.
39. Елінзон М.П., Васильков С.Г. Паливовмісні відходи у виробництві будівельних матеріалів. – М.: Стройиздат, 1990. – 223 с.

- 40.Васильков С.Г., Шойхит Б.М. Про механізм горіння палива при виробництві золааглопористого гравію із золи ТЕС // Будівельні матеріали. – 1997. – № 7. – С. 20.
- 41.Дослідження високотемпературної міцності карбонізованих рудно-паливних окатишів, виготовлених із залізних руд Красноярського краю / Чернишов О.М., Мерсева Г.П., Гесс Б.О. та ін. // Хіміко-термічна обробка залізних руд. – М.: Наука, 1999. – С. 78–86.