

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

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

Тема роботи: «Дослідження ефективності заміни традиційних видів палива
альтернативними при випаленні залізорудних окатишів»

Виконав:

магістрант групи МЧМ-24м _____ Антон ФІЛІПОВ

Керівник кваліфікаційної роботи _____ Сергій САВЕЛЬЄВ

Нормоконтролер _____ Сергій САВЕЛЬЄВ

Завідувач кафедри _____ Сергій САВЕЛЬЄВ

Кривий Ріг

2025 р.

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КИВОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Гірничо-металургійний
Кафедра Металургії чорних металів і ливарного виробництва
Спеціальність 136 «Металургія»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедрою _____

«__» _____ 20__р.

ЗАВДАННЯ

на випускню кваліфікаційну роботу

студента Філіпова Антона Вікторовича

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи: Дослідження ефективності заміни традиційних видів палива альтернативними при випаленні залізородних окатишів.

Затверджена наказом ректора КНУ від «30» червня 2025р. №15

2. Термін здачі студентом закінченої роботи 01 грудня 2023 р.

3. Вихідні дані до роботи: об'єкт та процес дослідження, умови дослідження

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити)

4.1. Обґрунтування актуальності теми

4.2. Критичний аналіз звітів про НДР, літературних джерел

4.3. Викладення оброблених даних досліджень і їх аналіз

4.4. Економічна оцінка результатів роботи

4.5. Санітарно – екологічна оцінка

4.6. Заключення

4.7. Список літературних джерел

5. Консультанти по проекту (роботі)

Розділ	Консультант розділу	Підпис, дата	
		видачі завдання	виконання завдання
Критичний аналіз літературних джерел			
Викладення оброблених результатів досліджень та їх аналіз			
Економічна оцінка результатів НДР			
Санітарно-екологічна оцінка результатів НДР			

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

Номер етапу	Назва етапів виконання магістерської роботи	Термін виконання етапів	Примітка
1	Критичний аналіз літературних джерел і передового досвіду працюючих підприємств	27.09.2023	
2	Результати досліджень і їх аналіз	25.10.2023	
3	Економічна оцінка результатів НДР	14.11.2023	
4	Санітарно-екологічна оцінка результатів НДР	21.11.2023	
5	Оформлення пояснювальної записки	26.11.2023	
6	Виконання графічної частини	28.11.2023	
7	Подання дипломного проекту до кафедри	30.11.2023	
8	Захист проекту в ДЕК		

7. Дата видачі завдання 15 червня 2025 р.

Студент-магістрант _____

(підпис)

Керівник проекту (роботи) _____

(підпис)

РЕФЕРАТ

до випускної кваліфікаційної роботи на тему:

Дослідження ефективності заміни традиційних видів палива альтернативними при випаленні залізорудних окатишів

Пояснювальна записка: 83 с., 6 табл., 3 рис., 45 джерел.

Об'єкт дослідження: альтернативні види палива

Предмет дослідження: Процес випалення залізорудних окатишів та вплив заміни традиційних видів палива альтернативними на його ефективність.

Мета роботи: Оцінити можливість і ефективність використання альтернативних видів палива замість традиційних у процесі випалення залізорудних окатишів та визначити їх вплив на якість продукції, енерговитрати та економічні показники.

Методи дослідження: аналіз науково-технічної літератури та нормативних документів, порівняльний аналіз характеристик традиційних та альтернативних палив, техніко-економічна оцінка використання альтернативного палива, аналітичні розрахунки параметрів процесу випалення.

Результати роботи: Отримано оцінку ефективності заміни традиційного палива альтернативним у процесі випалення залізорудних окатишів. Встановлено вплив альтернативних палив на теплотехнічні параметри агрегату, якість окатишів та економічні показники. Сформовано рекомендації щодо доцільності їх впровадження з урахуванням технічних, енергетичних і виробничих умов.

ВИПАЛЕННЯ ОКАТИШІВ, АЛЬТЕРНАТИВНЕ ПАЛИВО, ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, МЕТАЛУРГІЯ, ЗАЛІЗОРУДНІ ОКАТИШІ, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА, ЯКІСТЬ ПРОДУКЦІЇ.

Методичні вказівки до виконання випускної кваліфікаційної роботи для здобувачів за другим ступенем вищої освіти (магістр) освітньо-професійних програм «Металургія чорних металів» і «Ливарне виробництво чорних та кольорових металів і сплавів» для спеціальності 136 «Металургія» усіх форм навчання.

Зміст

Вступ	3
Розділ 1. Теоретичні основи процесу випалення залізорудних окатишів та паливного забезпечення	5
1.1. Сутність і значення процесу випалення залізорудних окатишів у металургійному виробництві	5
1.2. Основні стадії виробництва окатишів та роль термічної обробки	9
1.3. Традиційні види палива, що застосовуються у випаленні: характеристика, властивості та енергоємність	15
Розділ 2. Аналіз альтернативних видів палива для випалення залізорудних окатишів	23
2.1. Класифікація альтернативних джерел палива, придатних для металургії	23
2.2. Техніко-економічні характеристики альтернативного палива (біомаса, відходи, вторинні гази, водень, RDF тощо)	34
2.3. Вплив різних типів альтернативного палива на якість випалених окатишів	44
Розділ 3. Оцінка ефективності заміни традиційного палива альтернативним у процесі випалення окатишів	47
3.1. Методика техніко-економічного оцінювання ефективності заміни палива	47
3.2. Порівняння енерговитрат, собівартості та викидів при використанні традиційного та альтернативного палива	49
3.3. Розрахунок зниження викидів CO ₂ , NO _x , SO _x у результаті впровадження альтернативного палива	54
4. Охорона праці	59
5. Економічна частина	65
Висновки	70
Список використаної літератури	72

ВСТУП

Актуальність дослідження. Залізорудні окатиші зазвичай містять оксиди заліза та різні додаткові матеріали, призначені для регулювання хімічного складу та покращення механічних і металургійних властивостей окатишів. Залізорудні окатиші є життєво важливими джерелами заліза у виробництві сталі. Через постійно зростаючий попит на сталь, виробництво залізорудних окатишів значно розширилося за останні роки. Світові тенденції розвитку металургії свідчать, що впровадження альтернативних палив є важливим кроком на шляху до декарбонізації галузі та зниження енергетичної залежності.

Метою роботи є аналіз техніко-економічної та екологічної ефективності заміни традиційних видів палива альтернативними під час процесу випалення залізорудних окатишів.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

- розкрити сутність й значення процесу випалення окатишів у металургійному виробництві;
- охарактеризувати основні стадії виробництва окатишів й роль термічної обробки;
- проаналізувати традиційні види палива, що застосовуються під час випалення, та оцінити їх енергоємність;
- дослідити класифікацію та властивості альтернативних джерел палива, придатних для використання в металургії;
- виконати порівняльну оцінку енерговитрат, собівартості і рівня забруднення атмосфери при застосуванні різних типів палива;
- проаналізувати економічну та екологічну доцільність впровадження альтернативного палива у процес випалення залізорудних окатишів.

Об'єктом дослідження є процес випалення залізорудних окатишів в металургійному виробництві.

Предметом дослідження є вплив використання альтернативних видів палива на енергетичну ефективність, собівартість й екологічні показники процесу випалення.

Наукова новизна полягає в систематизації техніко-економічних характеристик різних типів палива, а також в комплексній оцінці їх енергетичної ефективності та екологічної безпечності.

Практична значущість отриманих результатів полягає в можливості використання запропонованих висновків й розрахунків для оптимізації паливного забезпечення на металургійних підприємствах.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПРОЦЕСУ ВИПАЛЕННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОКАТИШІВ ТА ПАЛИВНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

1.1. Сутність і значення процесу випалення залізорудних окатишів у металургійному виробництві

Процес випалення залізорудних окатишів є одним із ключових етапів підготовки залізорудної сировини до подальшого використання у доменному або прямому відновленні. Цей технологічний процес має визначальне значення у сучасному металургійному виробництві, оскільки саме він забезпечує отримання високоякісного агломерату з необхідними фізико-хімічними характеристиками для ефективного виплавлення чавуну або сталі.

Сутність випалення окатишів полягає у тепловій обробці сформованих з подрібненої залізорудної сировини кульок, званих окатишами, при високих температурах - зазвичай у межах від 1200 до 1350 °C [1]. У процесі випалення відбувається комплекс фізичних і хімічних перетворень, зокрема дегідратація, видалення летких сполук, окиснення двовалентного заліза до тривалентного, а також фазові зміни, які приводять до зміцнення структури окатиша. Основною метою цього процесу є забезпечення достатньої міцності, термостійкості та пористості готового продукту, які є необхідними для подальших стадій металургійного циклу.

Під час випалення досягається спікання мінеральних частинок в окатишах, що сприяє утворенню міцного зцементованого тіла. Цей процес зазвичай здійснюється в спеціальних промислових агрегатах, таких як обертові печі або решітчасті випалювальні установки [5, с. 32]. Вибір обладнання залежить від типу сировини, необхідної продуктивності та економічної доцільності. Крім того, важливим є контроль температурного режиму, оскільки перегрів може призвести до розплавлення поверхні окатишів і втрати їх пористості, а недостатній нагрів - до недостатньої міцності кінцевого продукту.

З позиції технологічного аналізу, якість випалених залізорудних окатишів відіграє критично важливу роль у забезпеченні високої ефективності доменного процесу. Справа в тому, що фізико-механічні характеристики окатишів, зокрема їхня міцність на стиск, абразивна стійкість, терmostійкість та пористість, прямо впливають на поведінку шихти під час проходження через різні температурні зони доменної печі. Особливо важливим показником є газопроникність шихтового шару, яка визначає, наскільки ефективно відновлювальні гази (переважно CO та H_2) можуть проникати крізь масу сировини, забезпечуючи рівномірний перебіг хімічних реакцій.

Високоміцні окатиші формують більш стійку й стабільну шихту, яка не руйнується під дією механічного навантаження і високих температур. Завдяки цьому зберігається пориста структура шару матеріалу в печі, що, у свою чергу, гарантує належний рівень газопроникності. Коли газові потоки безперешкодно проходять через шихту, досягається рівномірне розподілення тепла по всьому об'єму доменної печі. Це дозволяє уникати локальних перегрівів або, навпаки, недостатнього нагріву в окремих зонах, що вкрай небажано, оскільки такі температурні коливання можуть порушити стабільність термохімічних процесів і навіть призвести до дефектів у кінцевій продукції.

Окрім фізичних параметрів, не менш важливим є хімічний склад випалених окатишів. При правильному режимі випалення досягається висока ступінь гомогенізації матеріалу - тобто, рівномірний розподіл основних компонентів, таких як Fe_2O_3 , SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , CaO та інших домішок, які беруть участь у подальших реакціях під час плавлення [18]. Хімічна однорідність сировини є критично важливою для стабільного перебігу відновлювальних реакцій у доменній печі, оскільки вона забезпечує передбачуваність поведінки матеріалу при взаємодії з газами й коксовим жаром.

Стабільна хімічна структура випалених окатишів також сприяє більш повному відновленню заліза, тобто перетворенню оксидів заліза на металеве

залізо з мінімальними втратами. Це безпосередньо впливає на коефіцієнт корисного використання сировини, знижує утворення шлакових залишків і сприяє збільшенню виходу чавуну або сталі на одиницю витраченого ресурсу [16]. В умовах сучасного виробництва, де економія сировини та енергії є першочерговим завданням, такі показники мають стратегічне значення [7, с. 35].

Більше того, використання якісно випалених окатишів дає змогу знизити витрати коксу - дорогого і енергомісткого компоненту доменного процесу. Це досягається завдяки підвищенню ефективності газодинаміки всередині печі та кращій терморегуляції. Таким чином, навіть незначне покращення технологічних характеристик окатишів у процесі випалення може дати суттєвий економічний ефект при великомасштабному виробництві.

Підсумовуючи, можна зробити висновок, що якісне випалення окатишів - це не просто допоміжна операція у ланцюжку підготовки сировини, а один із фундаментальних чинників, що забезпечує стабільність, енергоефективність і високу продуктивність доменного виробництва. Високомісні, хімічно однорідні окатиші є основою для раціонального використання ресурсів, підвищення екологічної безпеки та зменшення собівартості готової металопродукції.

З економічної точки зору, удосконалення технологічного процесу випалення залізорудних окатишів має суттєвий вплив на загальну ефективність металургійного виробництва. Насамперед, модернізація обладнання та впровадження енергоощадних технологій дозволяє істотно скоротити споживання паливно-енергетичних ресурсів, таких як природний газ, кокс або електроенергія [19, с. 6163]. У результаті зменшуються виробничі витрати, що, своєю чергою, безпосередньо впливає на зниження собівартості готової металопродукції. Такі покращення не лише позитивно позначаються на фінансових показниках підприємства, але й дозволяють ефективніше реагувати на коливання ринку та зберігати конкурентоспроможність у галузі.

Крім економії енергоресурсів, модернізовані методи випалення сприяють значному зниженню рівня шкідливих викидів у навколишнє середовище. Зокрема, впровадження замкнених систем газоочистки, утилізація тепла та використання менш токсичних палив дозволяють мінімізувати викиди оксидів азоту, сірки, вуглецю та твердих частинок у атмосферу. Це особливо важливо в умовах зростання екологічних вимог як на національному рівні, так і з боку міжнародних регуляторів [5, с. 33]. Своєчасне впровадження екологічно чистих технологій не тільки покращує імідж підприємства як соціально відповідального, але й знижує ризики накладення штрафних санкцій за перевищення допустимих рівнів забруднення.

Окрему увагу варто приділити логістичним аспектам, які також значною мірою залежать від рівня ефективності процесу випалення. Високоякісні, механічно міцні окатиші мають кращі характеристики з точки зору транспортування та зберігання. Вони менше руйнуються під час перевезення залізничним або автомобільним транспортом, що дозволяє знизити рівень втрат матеріалу через утворення пилу та дрібних фракцій. Це, у свою чергу, зменшує витрати на повторну переробку, сортування або утилізацію відходів. Крім того, стабільна якість окатишів сприяє раціональнішому використанню складів і зменшенню площ, необхідних для зберігання сировини, що також впливає на оптимізацію логістичних витрат.

У сучасних умовах, коли на перший план виходять питання екології та енергоефективності, дедалі більшого значення набуває застосування передових технологій у процесі випалення - зокрема використання вторинного тепла, вдосконалених систем контролю температури, а також впровадження цифрових інструментів моніторингу й оптимізації процесу. Це дозволяє не лише підвищити якість готових окатишів, але й знизити загальну собівартість металопродукції [19, с. 6163].

Підсумовуючи, слід зазначити, що випалення залізородних окатишів - це не просто підготовчий етап, а високотехнологічний процес, від ефективності якого значною мірою залежить результат усього металургійного

виробництва. Глибоке розуміння сутності цього процесу, а також постійне вдосконалення технологій випалення, є запорукою стабільної роботи металургійних підприємств і підвищення конкурентоспроможності металопродукції на світовому ринку.

1.2. Основні стадії виробництва окатишів та роль термічної обробки

Процес виробництва залізорудних окатишів є одним із фундаментальних етапів у ланцюгу підготовки сировини для металургійної промисловості. Окатиші - це дрібнозернисті кульки з концентрованої залізорудної маси, які призначені для подальшого використання в доменному або прямому відновленні заліза. Їх виготовлення охоплює кілька послідовних технологічних стадій, кожна з яких має своє призначення і виконує важливу функцію у формуванні якісного кінцевого продукту.

Початковим та надзвичайно відповідальним етапом у процесі виробництва залізорудних окатишів є підготовка сировини, яка створює основу для всіх наступних стадій технологічного циклу. Цей етап охоплює кілька важливих операцій, зокрема подрібнення, зневоднення та збагачення залізорудної маси [19, с. 6164]. Основна мета - отримати сировину з необхідними фізичними, хімічними та гранулометричними характеристиками, які забезпечать ефективність формування окатишів і їхню придатність для подальшої термічної обробки.

На першій підстадії - подрібнення руди - вихідний матеріал, що надходить із кар'єрів або шахт, піддається механічній дії з метою зменшення розмірів частинок [5, с. 32]. Цей процес зазвичай виконується у дробарках та млинах, де великі шматки руди подрібнюються до стану дрібнодисперсної маси. Подрібнення необхідне для того, щоб вивільнити цінні залізовмісні мінерали від пустої породи та створити умови для ефективного наступного збагачення.

Після подрібнення здійснюється збагачення залізорудної пульпи, яке має на меті підвищення вмісту заліза у сировині шляхом видалення легких та нерудних включень. На цьому етапі застосовуються методи магнітної, гравітаційної або флотаційної сепарації - в залежності від типу руди та вмісту домішок. Найпоширенішими домішками, які підлягають видаленню, є кремнезем (SiO_2), глинисті мінерали, сірчані сполуки, а також фосфор та інші небажані хімічні елементи. Ці компоненти є шкідливими, оскільки вони ускладнюють процес відновлення заліза, збільшують шлакове навантаження у доменній печі та погіршують якість металопродукції [7, с. 35].

Наступним важливим кроком є зневоднення збагаченої сировини, під час якого з матеріалу видаляється надлишкова волога. Цей процес зазвичай здійснюється за допомогою фільтрів (дискових, стрічкових, камерних) або центрифуг. Досягнення потрібного рівня вологості є надзвичайно важливим: надто волога маса погано гранулюється, втрачає пластичність і може призвести до руйнування окатишів у процесі сушіння чи випалення. З іншого боку, занадто суха сировина також є проблемною, оскільки втрачає зв'язуючі властивості, що унеможливорює формування міцних сирих гранул [20, с. 167].

Паралельно з основними операціями проводиться регулювання гранулометричного складу, тобто визначення та коригування розподілу частинок за розмірами. Це робиться для забезпечення однорідності майбутніх окатишів [5, с. 33]. Якщо частинки надто дрібні, вони можуть знизити проникність шихти в доменній печі, а надто великі - погіршити міцність гранул і утворити дефекти при випаленні. Тому до сировини можуть додавати фракції оптимального розміру або регулювати швидкість перемішування в огрудкувачах, щоб досягти рівномірного складу.

Загалом, підготовка сировини - це не просто допоміжна операція, а повноцінний технологічний етап, який значною мірою визначає подальший успіх процесу грудкування. Від якості реалізації всіх підстадій залежить, наскільки рівномірними, механічно стійкими та придатними до випалення будуть сформовані окатиші. Неправильно підготовлена сировина може

призвести до серйозних технологічних збоїв на наступних етапах - зокрема до утворення дефектів, втрати продуктивності або навіть псування великої партії продукції. Саме тому контроль на етапі підготовки сировини є обов'язковим і проводиться із застосуванням сучасного лабораторного та автоматизованого обладнання.

Другим етапом у технологічному процесі виробництва залізорудних окатишів є змішування концентрату з в'язучими речовинами та формування окатишів певної геометричної форми. Ця стадія відіграє ключову роль у створенні сирих гранул, які повинні відповідати певним параметрам щодо розміру, форми, механічної міцності та стійкості до подальших термічних впливів. Від правильності виконання цієї операції залежить якість подальшої термічної обробки, а також показники готового продукту - залізорудних окатишів [12].

Після завершення стадії підготовки сировини, збагачений та зневоднений залізорудний концентрат подається до змішувального обладнання, де відбувається введення в'язучих матеріалів, які виконують роль сполучних елементів між дрібнодисперсними частинками. У промисловій практиці найчастіше використовуються неорганічні в'язучі, зокрема бентонітова глина - природний мінерал, який має високі пластичні властивості й здатність до набухання у водному середовищі. Завдяки цим характеристикам бентоніт створює міцні капілярні зв'язки між частинками концентрату, що забезпечує високу міцність «сирих» окатишів до випалення. У деяких випадках, залежно від типу залізної руди або технологічних вимог, можуть застосовуватись органічні в'язучі речовини - наприклад, лігносульфонати, крохмаль або синтетичні полімери [11].

Окрім в'язучих, до сировинної суміші можуть вводитись додаткові мінеральні або коригуючі добавки, які покращують хімічний склад або технологічні властивості кінцевого продукту. Наприклад, вапняк (CaCO_3) додається для регулювання вмісту кальцію, який впливає на температуру плавлення шлаку та сприяє кращому відновленню заліза у доменній печі [7, с.

35]. Також можуть використовуватися доломіт, магнезит або інші мінеральні домішки - залежно від специфіки виробництва та вимог до якості окатишів [27].

Після дозування всіх компонентів відбувається інтенсивне перемішування суміші, яке здійснюється у спеціальних змішувачах. Метою цієї операції є досягнення однорідного розподілу в'язучих та добавок по всьому об'єму маси, а також формування певного рівня вологості, що є критично важливим для якісного гранулювання. Оптимальний рівень вологості зазвичай коливається в межах 8-10%, оскільки саме при такому значенні суміш має найкращі умови для формування щільних, але пластичних гранул.

Готова, рівномірно зволожена та збагачена суміш подається до грануляційного обладнання, серед якого найпоширенішими є дискові (тарілчасті) та барабанні гранулятори. Принцип їхньої роботи базується на обертанні робочої поверхні під певним кутом, завдяки чому дрібні частинки концентрату починають злипатися між собою, поступово формуючи кулясті гранули - «сирі окатиші». У процесі обертання до них прилипають нові шари матеріалу, тому гранула «росте», поки не досягне необхідного діаметра, який зазвичай становить від 8 до 16 мм. Важливою умовою є досягнення оптимального часу перебування сировини в окатишнику, а також підтримання правильного кута нахилу диска чи барабана, швидкості обертання та вологості суміші - лише за умови балансу цих параметрів можливе утворення гранул з правильною формою і достатньою міцністю.

«Сирі» окатиші, що виходять з грануляторів, ще не мають достатньої міцності для використання у металургії, однак їхні розміри, геометрія та початкова структура вже повинні відповідати технологічним нормам, оскільки на наступній стадії - термічній обробці - буде відбуватися зміцнення, спікання та остаточне формування їхньої фізико-хімічної стабільності.

Таким чином, етап змішування та формування окатишів - це надзвичайно складний і водночас тонко налаштований процес, який поєднує

знання з області хімії, фізики дисперсних систем та механіки грануляції. Від його якісного виконання залежить не лише подальший успіх випалення, а й здатність окатишів витримувати механічні навантаження, зберігати форму при транспортуванні, а також ефективно брати участь у відновлювальних процесах у доменних та інших печах.

Після завершення формування сирих окатишів, які ще не мають достатньої міцності та стабільності для використання у високотемпературних металургійних процесах, настає один із ключових технологічних етапів - термічна обробка. Ця стадія є надзвичайно важливою, оскільки саме вона забезпечує фізико-хімічне дозрівання окатишів: перехід від сипкої, слабо зв'язаної гранули до структурно сформованого, міцного продукту, стійкого до механічних та термічних навантажень [12]. Термохімічна стабільність, міцність, пористість та відновлюваність кінцевих окатишів формуються саме в ході цього складного багатоступеневого процесу.

Термічна обробка окатишів умовно поділяється на чотири послідовні фази: сушіння, попередній прогрів, випалення і контрольоване охолодження. Кожна з них має своє функціональне навантаження та специфічний температурний режим, тому від точного дотримання технологічних параметрів на кожному етапі залежить якість кінцевого продукту [20, с. 167].

На початку термічного циклу окатиші проходять стадію сушіння, яка передбачає видалення вологи, накопиченої під час формування. Зазвичай вологість сирих окатишів становить 8-10%, і вона повинна бути знижена до рівня, який унеможливорює паровий вибух всередині гранули під час нагріву. Сушіння проводиться при температурі в межах 200-400 °С, зазвичай за рахунок використання гарячих газів, що відводяться з пізніших зон термоагрегату. На цьому етапі відбувається випаровування вільної вологи без порушення цілісності структури окатиша. Порушення режиму сушіння - надто швидке або повільне нагрівання - може призвести до утворення тріщин або деформацій.

Далі слідує фаза попереднього нагріву (прогріву), під час якої температура окатишів підвищується до 800-1000 °С. У цій температурній зоні відбуваються первинні фізико-хімічні процеси, зокрема окиснення заліза у складі концентрату (наприклад, FeO - Fe_2O_3), а також часткове спікання поверхневих шарів гранули. Це важливий перехідний етап, який готує окатиші до високотемпературного випалення. Темп нагріву має бути поступовим, аби уникнути температурного шоку, що може спричинити мікротріщини.

Найвідповідальнішою частиною термічної обробки є випалення, що відбувається зазвичай у температурному діапазоні 1200-1350 °С. Саме на цьому етапі відбувається остаточне спікання частинок концентрату, завдяки чому гранули набувають остаточної міцності, термостійкості та стійкості до подальших фізичних і хімічних впливів [5, с. 32]. Під час випалення відбувається також глибоке окиснення заліза до гематиту (Fe_2O_3) - термодинамічно стабільної форми, зручної для подальшого відновлення в доменній печі або інших металургійних агрегатах. У структурі окатиша формуються контактні зони між зернами, що забезпечують високу міцність при стисканні та опір до стирання під час транспортування. Випалення проводиться у спеціальних печах - подових, обертових або стрічкових (наприклад, типу Гоффмана чи Лепель) - з використанням газових або твердопаливних джерел тепла.

Завершальним етапом термічної обробки є поступове охолодження, яке зазвичай проводиться до температури нижче 100 °С. Ця фаза надзвичайно важлива, оскільки надто швидке зниження температури може викликати термічні деформації, розтріскування та внутрішні напруження в тілі окатишів. Охолодження відбувається у спеціальних зонах або установках, де застосовується прямий або зворотний потік повітря. Часто для економії енергії тепле повітря від охолодження використовується повторно, наприклад, для сушіння сирих окатишів, що дозволяє підвищити енергоефективність всього циклу.

Таким чином, термічна обробка залізорудних окатишів - це складний, багатоступеневий процес, який виконує не лише функцію зміцнення структури, але й забезпечує формування кінцевих фізико-хімічних характеристик матеріалу. Лише завдяки правильно організованим етапам сушіння, прогріву, випалення та охолодження можливо отримати продукт, що відповідає вимогам сучасної металургії - зокрема, високій міцності, термостійкості, рівномірному хімічному складу та стабільній реакційній здатності у процесах відновлення заліза. Без ефективної термічної обробки виробництво якісних окатишів було б неможливим, а отже, порушувався б увесь ланцюг металургійного виробництва. Роль термічної обробки у виробництві окатишів є визначальною. Саме вона забезпечує перетворення нестійкої, вологонесучої маси у готовий матеріал з високими експлуатаційними характеристиками. Без якісного випалення окатиші не мали б необхідної міцності, пористості та хімічної стабільності, що унеможливило б їх ефективне використання в металургійних процесах. Таким чином, кожна з термічних стадій - від сушіння до охолодження - є критично важливою для отримання кінцевого продукту, що відповідає вимогам сучасного виробництва сталі.

1.3. Традиційні види палива, що застосовуються у випаленні: характеристика, властивості та енергоємність

У технологічному процесі випалення залізорудних окатишів вирішальну роль відіграє правильно підібране паливо, яке слугує основним джерелом теплової енергії, необхідної для забезпечення фазових перетворень, окисних реакцій та спікання матеріалу при високих температурах. Протягом десятиліть у металургійній галузі сформувався набір традиційних видів палива, що використовуються у випалювальних агрегатах - переважно це природний газ, вугільний пил та мазут [10, с. 137]. Кожен із цих енергоносіїв має свої фізико-

хімічні властивості, рівень теплотворної здатності, вплив на якість випалених окатишів і характер екологічного навантаження на довкілля.

У сучасному металургійному виробництві, зокрема у технології випалення залізорудних окатишів, природний газ займає провідне місце серед традиційних джерел енергії, які використовуються для забезпечення необхідного температурного режиму [20, с. 167]. Його широка популярність зумовлена рядом важливих технологічних, економічних та екологічних переваг, які вигідно відрізняють цей вид палива від інших - твердих і рідких.

Основу природного газу становить метан (CH_4) - найпростіший вуглеводень, частка якого в більшості випадків перевищує 90% у загальному об'ємі. Саме завдяки високій концентрації метану природний газ має значну теплотворну здатність, яка зазвичай становить близько 35-38 мегаджоулів на кубічний метр (МДж/м^3). Цей показник дає змогу ефективно досягати високих температур, необхідних для процесу спікання окатишів, а саме в діапазоні від 1200 до 1350 °C, з мінімальними втратами тепла. Такий температурний режим є критично важливим для забезпечення повноцінного фізико-хімічного перетворення сировини в готовий продукт із відповідними експлуатаційними характеристиками [12].

Серед ключових технологічних переваг застосування природного газу можна виділити його чистоту згоряння. На відміну від вугільного пилу або мазуту, під час спалювання метану утворюється вкрай мала кількість твердих залишків, таких як зола чи сажисті частинки [10, с. 137]. Крім того, об'єм сірчистих сполук (SO_x) у відпрацьованих газах є незначним, що дозволяє знизити рівень атмосферного забруднення та зменшити навантаження на систему газоочистки. Також відсутність великої кількості домішок запобігає накопиченню відкладень на стінках печей і теплообмінного обладнання, що подовжує термін їхньої експлуатації та знижує потребу в частому обслуговуванні [28].

Окремої уваги заслуговує зручність транспортування та зберігання природного газу, який може подаватися до промислових підприємств по

газопроводах з високою стабільністю тиску. Це дозволяє точно дозувати паливо, підтримуючи стабільний температурний профіль у різних зонах випалювального агрегату. Така гнучкість у регулюванні параметрів згоряння є особливо важливою в умовах, коли потрібна висока однорідність якості продукції, адже навіть незначні температурні коливання можуть призвести до утворення окатишів з неоднорідною структурою або недостатньою міцністю.

Завдяки своїм властивостям природний газ добре піддається автоматизації процесу згоряння, що дозволяє не лише покращити енергоефективність, а й оптимізувати експлуатаційні витрати, пов'язані з контролем процесу. Системи автоматичного керування подачею газу в реальному часі дозволяють гнучко реагувати на зміну параметрів сировини, режиму печі та продуктивності агрегату, що сприяє зменшенню втрат енергії та підвищенню економічної ефективності всього процесу випалення.

Таким чином, природний газ, незважаючи на свою високу ефективність, екологічну чистоту та технологічну зручність, потребує ретельного управління ризиками, пов'язаними з його постачанням та вартістю. У сучасних умовах підприємства все частіше розглядають комбіновані паливні системи або альтернативні джерела енергії як резервні або допоміжні, що дозволяє забезпечити стійкість та безперервність випалювального процесу, навіть за умови нестабільного зовнішнього середовища.

Серед традиційних видів палива, що активно застосовуються в процесах випалення залізорудних окатишів, важливе місце займає вугільний пил - це дрібнодисперсний матеріал, отриманий шляхом механічного подрібнення кам'яного або бурого вугілля до порошкоподібного стану [31]. Така форма палива забезпечує кращий контакт із повітрям у зоні згоряння, сприяючи інтенсивнішому теплоутворенню, рівномірному розподілу температури в печі та підвищенню ефективності теплопередачі. Вугільний пил часто використовують як альтернативу природному газу або як частину комбінованих паливних систем, що дозволяє гнучко реагувати на економічні та технічні умови конкретного підприємства [10, с. 139].

Однією з найвагоміших переваг вугільного пилу є його висока масова теплова потужність. Залежно від виду вугілля, з якого його вироблено, теплотворна здатність може коливатися в межах 25-30 мегаджоулів на кілограм (МДж/кг). Цей показник часто перевищує аналогічне значення для природного газу, що робить вугільний пил енергоємним і продуктивним джерелом тепла, здатним забезпечити температурні режими, необхідні для повноцінного випалення окатишів - включаючи фазове перетворення заліза, спікання матеріалу та формування необхідної міцності гранул [13, с. 249].

Завдяки своїй порошкоподібній структурі, це паливо може подаватися в зону згоряння тонко розпиленним потоком, що забезпечує швидке займання, повне згоряння частинок у повітряному середовищі та рівномірне теплове навантаження в зоні випалення. Такий режим сприяє зниженню локальних перегрівів і покращує якість оброблюваних окатишів, запобігаючи їх деформації чи перегорянню [36]. Крім того, можливість дозованої подачі пилу через спеціальні пальники або форсунки дозволяє точно регулювати інтенсивність процесу згоряння, адаптуючи його до змін у продуктивності печі або властивостях шихти.

З економічної точки зору, вугільний пил є привабливим видом палива завдяки відносно низькій вартості одиниці енергії. У регіонах із розвиненою вугільною промисловістю (наприклад, в Україні, Китаї, Індії чи Польщі) та стабільним внутрішнім ринком вугілля, його використання дає змогу значно скоротити витрати на енергоресурси [10, с. 137]. Оскільки вугільний пил може вироблятися безпосередньо на підприємстві або в його близькому оточенні, зменшуються логістичні витрати на транспортування, а також знижується залежність від імпорту дорогого природного газу, що особливо важливо в умовах геополітичної чи енергетичної нестабільності.

Проте, разом із перевагами, використання вугільного пилу має цілу низку суттєвих технологічних та екологічних викликів. Перш за все, в процесі згоряння такого палива утворюється велика кількість твердих залишків - золи, що накопичується у печах, димових каналах і фільтрах, потребуючи

регулярного очищення та спеціальної утилізації [2]. Окрім того, викиди сірчистих (SO_2) та азотистих (NO_x) сполук, що виникають під час згоряння, мають негативний вплив на довкілля - вони сприяють утворенню кислотних дощів, погіршують якість атмосферного повітря та порушують екологічну рівновагу.

Ще одним важливим аспектом є необхідність спеціального обладнання для підготовки палива. Для досягнення необхідної дисперсності вугілля перед подачею до печі воно має бути тонко подрібнене до стану пилу, а це потребує наявності потужних млинів, класифікаторів, циклонів, сепараторів і систем транспортування. Усе це ускладнює організацію паливного господарства, підвищує витрати на експлуатацію, обслуговування та безпеку. Особливо важливо контролювати пилоутворення в приміщеннях, оскільки вугільний пил є вибухонебезпечним і може спричинити займання або вибух при контакті з відкритим полум'ям або іскрою.

Для зменшення негативного впливу на довкілля в місцях використання вугільного пилу впроваджуються високоефективні системи фільтрації та очищення відпрацьованих газів, зокрема електрофільтри, рукавні фільтри, скрубери та установки десульфурації. Також часто застосовуються адсорбенти та каталізатори, що нейтралізують шкідливі компоненти газового потоку перед викидом у атмосферу.

Мазут є одним із традиційних джерел теплової енергії, що активно застосовується в металургійних процесах випалення залізрудних окатишів, особливо в умовах відсутності газопостачання або обмеженого доступу до вугілля [13, с. 249]. Йдеться про важкий залишковий продукт переробки нафти, який отримують після виділення легких фракцій - таких як бензин, гас і дизельне паливо. Мазут належить до високов'язких рідких палив, що відрізняються густотою, темним кольором і значним вмістом органічних сполук із високою молекулярною масою. Саме через свою фізичну природу він потребує спеціальних умов зберігання та підготовки до згоряння, зокрема

попереднього підігріву до температури, яка дозволяє йому легко перетікати, розпорошуватись та ефективно згорати.

З погляду енергетичного потенціалу, мазут має високу теплотворну здатність, яка в середньому становить 39-42 мегаджоулі на кілограм (МДж/кг). Це робить його одним із найпотужніших за енергоємністю традиційних видів палива, що дозволяє досягати в зоні випалення високих і стабільних температур без необхідності збільшення об'ємів пального. Такий рівень теплової потужності повністю відповідає потребам випалювальних печей, де потрібен контрольований температурний режим для повноцінного спікання окатишів, зміцнення їх структури та формування стабільних фізико-хімічних властивостей [36].

При належному технологічному супроводі та коректному налаштуванні палиникових пристроїв мазут здатен забезпечити рівномірне теплове навантаження по всьому перетину печі. Це є надзвичайно важливим для якісного випалення окатишів, оскільки запобігає локальним перегрівам або, навпаки, недостатньому прогріву, що може призвести до нерівномірності гранул, дефектів у їхній структурі або зниження механічної міцності [14, с. 75]. Крім того, мазут дозволяє оперативно змінювати температуру у процесі виробництва, що зручно при коливаннях продуктивності або зміні складу шихти.

Разом з тим, застосування мазуту як енергоносія має ряд істотних недоліків, які потрібно враховувати при організації випалювального процесу. Перш за все, екологічний вплив є значно більшим, ніж у випадку з природним газом або навіть вугільним пилом. Під час згоряння мазуту викидаються у повітря великі об'єми оксидів сірки (SO_x), що утворюються внаслідок високого вмісту сірки у паливі. Також у продуктах горіння присутні важкі вуглеводні, зольні залишки, сажа та оксиди азоту (NO_x), що негативно впливають на навколишнє середовище і здоров'я персоналу. Це обумовлює необхідність встановлення складних і дорогих систем очищення

відпрацьованих газів - таких як скрубери, електрофільтри, нейтралізатори кислотних викидів тощо.

Ще одним серйозним викликом є технічна складність логістики та підготовки мазуту до використання. Через високу в'язкість цей тип пального не може зберігатися або транспортуватися без підігріву. Це вимагає наявності спеціального теплоізовованого обладнання - резервуарів, насосів, підігрівачів, трубопроводів, які повинні працювати при підвищених температурах. Крім того, подача мазуту до пальників повинна бути ретельно відрегульована, інакше виникає ризик неповного згоряння, що призводить до зниження ККД, утворення сажі та закупорювання пальникових каналів.

У порівнянні з природним газом, мазут є більш вибагливим в експлуатації, потребує серйозних капіталовкладень у паливну інфраструктуру та регулярного обслуговування, що робить його менш привабливим для підприємств, які прагнуть автоматизації й екологічної відповідності. Проте в тих випадках, коли газ недоступний, а вугілля не виправдовує себе з економічного чи технічного боку, мазут залишається реальним варіантом забезпечення випалювальних агрегатів тепловою енергією, особливо за умови впровадження технологій вторинної утилізації тепла та модернізації очисних систем.

Таблиця 1.1- Порівняльна характеристика видів палива

Вид палива	Теплотворна здатність	Основні плюси	Основні мінуси
Природний газ	35-38 МДж/м ³	Чисте згоряння, автоматизація, стабільне тепло	Висока ціна, залежність від постачання
Вугільний пил	25-30 МДж/кг	Дешевизна, доступність, енергоємність	Викиди пилу, сірки, зола, потреба в фільтрації
Мазут	39-42 МДж/кг	Висока теплова потужність	Складність у зберіганні та викиди шкідливих речовин

Отже, традиційні види палива, що застосовуються у випаленні окатишів, мають свої переваги та обмеження, які необхідно враховувати при проєктуванні та експлуатації випалювальних агрегатів. Природний газ вважається найбільш екологічно безпечним і технологічно зручним, вугільний пил - доступним і економічним, а мазут - потужним, але складним у використанні. Вибір палива залежить не лише від технічних можливостей підприємства, а й від економічної доцільності, логістичної доступності та екологічних нормативів. У сучасних умовах дедалі більшого значення набуває енергоефективність та зменшення вуглецевого сліду, тому поступово традиційні джерела енергії доповнюються або замінюються альтернативними, зокрема відновлюваними чи вторинними енергоресурсами.

Розділ 2. Аналіз альтернативних видів палива для випалення залізорудних окатишів

2.1. Класифікація альтернативних джерел палива, придатних для металургії

У сучасних умовах функціонування металургійної промисловості надзвичайно важливою є необхідність пошуку ефективних, екологічно безпечних та економічно доцільних видів палива, які можуть використовуватися як альтернатива традиційним енергоносіям, зокрема природному газу, вугіллю чи мазуту. Така необхідність обумовлена як підвищенням вартості викопного палива на світовому ринку, так і поступовим вичерпанням природних ресурсів, що викликає потребу в більш гнучких та сталих енергетичних рішеннях для забезпечення процесів високотемпературної обробки сировини - зокрема, випалення залізорудних окатишів.

Альтернативні види палива, які можуть бути використані в металургійних процесах, зокрема у виробництві окатишів, доцільно класифікувати за кількома ознаками [39]. Перш за все, за походженням альтернативні палива можна поділити на біогенні, промислові відходи та синтетичні палива. Кожна з цих груп має свої характерні особливості, як з точки зору хімічного складу, так і термохімічних характеристик, що визначає їх придатність до застосування в умовах високотемпературних металургійних печей [14, с. 75].

Біогенні види палива являють собою широкую групу енергоносіїв, які утворюються внаслідок природних біологічних процесів або є результатом переробки органічних матеріалів рослинного чи тваринного походження. До цієї категорії відносяться численні типи сировини, котрі мають здатність до відновлення в межах одного або кількох життєвих циклів, що робить їх важливим компонентом у переході на сталу енергетику. Основними

представниками біогенного палива є, зокрема, подрібнені деревні відходи, такі як тріска та тирса, які часто утворюються в процесі механічної обробки деревини на лісопильних та деревообробних підприємствах. Ці залишки зазвичай піддаються сушінню та гранулюванню для отримання паливних пелет, які мають високу насипну густину, зручні для транспортування й зберігання характеристики, а також характеризуються стабільними показниками тепловіддачі [41].

У дослідженні Kieush L. [1] була розглянута можливість заміни деякого об'єму природного газу лушпинням соняшника. За рахунок низької витрати природного газу і мінімальних температур обпалу було досягнуто 60 об.% заміни природного газу, зі збільшенням загального споживання газу вдалося замінити мінімум 40 об.%, що пояснюється тим, що при великій витраті природного газу утворюється великий тепловий потік. Оскільки швидкість згоряння лушпиння соняшнику у пальнику обмежена, при великій її кількості, що подається у пальник, вона не встигає повністю згоріти у зоні факела, а тепловий потік змінює міцність залізорудних окатишів. В цілому вугілля, біомаса чи інше тверде паливо містить різну кількість вуглецю, кисню, водню, азоту, сірки, вологи і золи [2]. Частина палива, яка фактично бере участь у процесі горіння, називається горючою масою, частина, яка не бере участі у горінні, називається баластом, наприклад як зола/шлак [16, 41]. Серед цих елементів небажана присутність сірки, оскільки вона реагує з вологою димового газу утворюючи сірчану кислоту, яка є надзвичайно корозійною для металевих елементів обпалювальної машини [1, с. 67]. Лімітуючим фактором при заміні природного газу паливом рослинного походження є обмежений час що необхідний для повного згорання частинок твердого палива.

Під час великої витрати природного газу утворюється великий тепловий потік. Оскільки швидкість згоряння лушпиння соняшнику у пальнику обмежена, при великій її кількості, що подається у пальник, вона не встигає повністю згоріти у зоні факела, а тепловий потік змінює міцність залізорудних окатишів. Ефективність вигорання частинок палива також впливає на

відкладення на вогнетривкій футеровці й на перехід лужноземельних металів у газову фазу [5, с. 32].

Тож необхідно розрахувати такий розмір частинок, який забезпечить повне згоряння палива й не завдасть впливу на технологічний процес обпалу окатишів [30, с. 204]. Згоряння частинки передбачає складні фізичні й хімічні взаємодії. Частинка, що потрапила у гарячий газовий потік, нагрівається за рахунок теплообміну $Q_{ср}$ й випромінювання $Q_{рр}$ від потоку гарячого газу й від навколишнього середовища. Надалі при контакті із киснем відбувається видалення летючих й горіння коксового залишку [2, 4].

Швидкість нагріву вугільних частинок у період займання становить близько 103-104 K/с. Отримані експериментальні дані показують, що час вигорання великих фракцій антрацитового пилу у досліджених умовах пропорційно квадрату вихідного розміру вугільних частинок й слабо залежить від температури газового середовища, що характерно для дифузійного режиму горіння. Важливо зауважити, що великі частки антрациту (≥ 150 мкм) й за порівняно низьких температур ($T_g = 1200 \div 1400$ K) вигоряють у дифузійному режимі до дуже малих розмірів - 20 мкм й нижче [5].

Відповідно до результатів досліджень [5], процес горіння вуглецевого палива складається з чотирьох стадій. Перша стадія - прогрів частки до початку займання летких речовин. Для частки розміром 750 мкм, ця стадія тривала 1,125 с. Друга стадія - горіння летких у газовій фазі. Тривалість її становить 0,312 с. Фронт полум'я газоподібних летких має форму сфери, дещо витягнуту у вертикальному напрямку. Всередині сфери полум'я чітко видно ще темна вугільна порошок, що не світиться. На фотографіях у цей період спостерігаються також гарячі струмені, що проникають за межі сфери полум'я, - це можуть бути викиди рідких продуктів термічного розкладання вугілля. Третя стадія - розігрів коксового залишку - настає після завершення полум'яного горіння летких. Подальший розігрів коксового залишку відбувається внаслідок хімічного реагування його з киснем. Четверта стадія - вигорання коксового залишку - завершальна стадія процесу. Для частки, що

розглядалася, ця стадія тривала 6,3 с [7]. Відносна частка часу вигорання летких становить лише 5-3%. у інтервалі $V_L = 12 \div 60\%$, час горіння летких практично не змінюється, це ж можна сказати й про тривалість займання коксового залишку [7].

До категорії промислових відходів, які можуть бути використані як джерело теплової енергії в різних виробничих процесах, у тому числі й у металургії, відносять низку техногенних матеріалів, що утворюються внаслідок функціонування промислових підприємств різних галузей. Такими відходами можуть слугувати відпрацьовані технічні мастила, які втрачають свої експлуатаційні властивості в процесі тривалого використання у двигунах, редукторах або гідравлічних системах. Ці рідини, після відповідної попередньої підготовки - наприклад, фільтрації, дегазації або термічного очищення - можуть застосовуватися як рідке паливо, здатне забезпечити високу температуру згоряння у промислових печах.

Ще одним поширеним типом вторинного палива є зношені гумові вироби, серед яких найбільшу частку становлять старі автомобільні шини. Внаслідок механічного подрібнення й додаткової термічної або хімічної обробки вони можуть бути перетворені в подрібнений гумовий гранулят або порошок, що служить основою для твердого пального з високим енергетичним потенціалом. За аналогічною схемою утилізуються полімерні матеріали, які втратили споживчу цінність - наприклад, відходи упаковки, пластикові ємності, технічна плівка та вироби з поліетилену, поліпропілену, ПВХ тощо. Згоряння подібних речовин супроводжується значним тепловиділенням, однак потребує спеціалізованих умов для запобігання викиду токсичних компонентів, таких як діоксини, фурани або хлорорганічні сполуки.

Також значний енергетичний ресурс прихований у відходах текстильної промисловості - залишках синтетичних тканин, обрізках, волокнистих матеріалах на основі полімерів, які не підлягають подальшій переробці в швейному або меблевому виробництві. Аналогічно, у нафтохімічній промисловості в процесі очищення, фільтрації чи осадження з'являються так

звані шлами - пастоподібні або напівтверді утворення, насичені вуглеводнями, які при термічній обробці виділяють значну кількість енергії, хоча й вимагають складної процедури підготовки перед спалюванням [37].

Особливу увагу варто приділити твердим побутовим відходам (ТПВ), які після сортування, видалення органічної фракції та механічної обробки можуть бути перетворені на альтернативне тверде паливо. У європейській та світовій практиці воно відоме під назвами RDF (Refuse Derived Fuel) - паливо з побутових відходів або SRF (Solid Recovered Fuel) - тверде відновлене паливо. Такі матеріали формуються у вигляді гранул або фрагментованої суміші, яка має стабільну теплоту згоряння та здатна замінити традиційні види палива у цементній, енергетичній та металургійній промисловості. До переваг RDF/SRF відноситься не лише доступність сировини, а й можливість значного зменшення обсягів захоронення сміття на полігонах, що, у свою чергу, позитивно впливає на екологічний стан довкілля.

Разом з тим, застосування промислових та побутових відходів як енергетичного ресурсу супроводжується низкою технологічних та екологічних викликів. Перш за все, хімічний склад таких відходів є нестабільним, що ускладнює прогнозування параметрів згоряння. Присутність небажаних домішок, таких як хлор, сірка, важкі метали або токсичні органічні сполуки, під час термічної обробки може призводити до утворення забруднювальних викидів у повітря, які становлять потенційну загрозу для навколишнього середовища та здоров'я людини. З цієї причини будь-яке використання альтернативного палива, що базується на промислових залишках або ТПВ, має супроводжуватися застосуванням вискоєфективних систем фільтрації й очищення димових газів - таких як електрофільтри, рукавні фільтри, адсорбційні установки або багатоступенева каталізаторна нейтралізація.

Крім того, важливо впроваджувати системи контролю якості сировини ще на етапі її збирання та підготовки, що дозволяє виключити небезпечні домішки й забезпечити стабільність параметрів палива [27]. Успішна

інтеграція таких видів енергетичних ресурсів у технологічний цикл можливе лише за умов відповідності паливно-технічних характеристик вимогам конкретного виробництва, наприклад, температурному режиму печей, режиму горіння, допустимому вмісту золи та швидкості утворення шкідливих компонентів [2].

Отже, промислові та побутові відходи, за умови їхньої правильної підготовки й екологічно безпечного спалювання, можуть виступати ефективним джерелом альтернативної енергії, що дозволяє не тільки скоротити залежність від викопних ресурсів, але й вирішити важливі завдання у сфері поводження з відходами. Такий підхід відповідає загальносвітовим трендам переходу до циркулярної економіки та сталого розвитку виробничих систем [34, с. 1186].

Окрему та надзвичайно перспективну групу альтернативних джерел енергії становлять синтетичні види палива, які отримуються шляхом цілеспрямованої хімічної трансформації різноманітної вуглецевмісної сировини. До такої сировини можуть належати як органічні залишки біомаси, так і вугілля різних марок, а також тверді побутові відходи, що пройшли процес попереднього сортування [6, с. 89]. Ключовими технологіями, які дозволяють здійснювати перетворення цієї сировини у корисні паливні компоненти, є газифікація, піроліз та синтетичний синтез - зокрема, процеси, засновані на методиках типу Fischer-Tropsch, що дозволяють отримати широкий спектр вуглеводневих сполук у рідкому або газоподібному стані [9].

Газифікація передбачає високотемпературну обробку вуглецевмісних матеріалів у присутності контрольованої кількості кисню або пари, унаслідок чого утворюється синтез-газ - газова суміш, що в основному складається з водню (H_2) та чадного газу (CO). Цей газ може бути безпосередньо використаний як паливо або слугувати сировиною для подальшого хімічного синтезу. Піроліз, у свою чергу, є процесом термічного розкладу органічних речовин за відсутності кисню, що дозволяє отримати кілька фракцій

продуктів: рідке паливо (піролізна олія), тверді залишки (вуглецевий залишок або біовугілля) та газову суміш, придатну для спалювання [10, с. 138].

На основі синтез-газу, отриманого з будь-якої сировини - починаючи від сільськогосподарських решток і закінчуючи пластиком чи кам'яним вугіллям - за допомогою каталітичних процесів можливо отримати рідкі палива, які мають близькі до традиційних нафтопродуктів характеристики. Серед них найбільш відомими є метанол, диметиловий ефір (DME), а також різні синтетичні вуглеводні, включаючи синтетичну нафту, яка надалі може бути перероблена на бензин, дизель або інші види моторного палива. Особливої уваги заслуговує технологія Fischer-Tropsch, яка дозволяє перетворювати синтез-газ на рідкі паливні сполуки з точним контролем їхньої молекулярної структури, що є критично важливим для стабільності процесів горіння.

Головною технічною перевагою синтетичних палив є можливість точного налаштування їх складу відповідно до потреб конкретного виробництва. Це означає, що у порівнянні з традиційними викопними видами палива, де склад визначається природним походженням, синтетичне паливо може бути адаптоване за такими параметрами, як теплота згоряння, вміст шкідливих домішок (наприклад, сірки або важких металів), швидкість горіння, в'язкість, температура займання тощо. Така гнучкість в інженерному налаштуванні є особливо цінною в умовах металургійного виробництва, де паливо повинне відповідати суворим вимогам термічного режиму та впливати на стабільність технологічного процесу, зокрема - у випаленні залізрудних окатишів [29, с. 291].

Однак, незважаючи на велику кількість технічних переваг, широкомасштабне впровадження синтетичних палив у промисловість на сьогодні залишається обмеженим. Основною причиною цього є висока технологічна складність та енергоємність процесів їхнього виробництва. Побудова газифікаційних установок, піролізних реакторів або Fischer-Tropsch-синтезаторів вимагає значних капіталовкладень, складного обладнання,

високого рівня автоматизації та контролю, а також обов'язкової наявності кваліфікованого персоналу для обслуговування таких систем [8, с. 782].

Ще одним стримуючим фактором є потреба у стабільному джерелі якісної сировини, оскільки ефективність хімічних перетворень напряму залежить від складу та вологості вихідного матеріалу. Побутові відходи, наприклад, можуть мати змінний хімічний склад, наявність домішок або забруднень, що ускладнює їх застосування без додаткової сортувальної та підготовчої обробки. Крім того, повна екологічна безпека таких палив можлива лише за умови суворого дотримання норм очищення газів, утилізації побічних речовин і контролю за хімічними процесами в режимі реального часу.

Залежно від фізичного стану, в якому альтернативне паливо перебуває за стандартних умов температури та тиску, його класифікують на три основні групи: тверде, рідке та газоподібне. Такий поділ є базовим для розуміння принципів транспортування, зберігання, технології подачі до зони горіння, а також характеру хімічних процесів, які відбуваються під час згоряння палива у промислових установках, зокрема в металургійних печах.

Тверді альтернативні палива охоплюють найбільший спектр матеріалів, які мають щільну структуру та зберігають свою форму в нормальних умовах. До цієї групи входять різноманітні види біомаси, серед яких слід виокремити деревну тріску, подрібнені аграрні залишки, гранульовані пелети, брикети, а також вуглефіковані продукти, отримані шляхом піролізу [25, с. 41]. Окрему нішу займає вторинне тверде паливо (RDF/SRF), виготовлене з побутових або промислових відходів після попередньої обробки. RDF зазвичай складається з паперу, текстилю, пластику та легкозаймистих залишків, які не підлягають іншій утилізації. Також до твердих видів альтернативного пального можна віднести вугільний пил - тонкодисперсний залишок, що утворюється при подрібненні вугілля, та здатен використовуватись у пиловугільному паливоподачному обладнанні [43]. Переваги твердих палив включають їхню зручність у довготривалому зберіганні, низьку вибухонебезпечність та

відносну простоту дозування, однак вони потребують складніших систем подачі та повільніше розпалюються у порівнянні з рідкими чи газоподібними аналогами.

Рідкі альтернативні палива - це речовини, які перебувають у рідкому стані при нормальних температурних умовах і мають високу плинність. До них насамперед належать відпрацьовані мастила, що після очищення можуть бути використані як паливо для котлів або печей. Крім цього, поширеним різновидом є біодизель - рідина, яку отримують шляхом трансестерифікації жирів рослинного чи тваринного походження. Цей тип палива має властивості, близькі до дизельного пального, але характеризується кращими екологічними показниками, оскільки не містить сірки та викидає менше сажі. Також серед рідких варіантів альтернативного пального виділяють синтетичні рідини, що створюються у ході складних хімічних процесів (наприклад, за технологією Fischer-Tropsch), зокрема метанол, синтетичний бензин або інші вуглеводневі сполуки. Рідкі палива зручні в системах з форсунковим впорскуванням, мають високу теплоту згоряння та забезпечують рівномірну подачу теплової енергії, однак потребують герметичних резервуарів для зберігання та систем захисту від протікань.

Газоподібні альтернативні палива вирізняються тим, що при звичайних умовах перебувають у газовому стані та мають здатність швидко поширюватися, що дає змогу забезпечувати миттєве займання та повне згоряння. У цю групу входить біогаз, що утворюється внаслідок анаеробного бродіння органічних речовин, зокрема сільськогосподарських або харчових відходів. Основними компонентами біогазу є метан (CH_4) і вуглекислий газ (CO_2), причому вміст метану визначає його енергетичну цінність. Ще одним представником є синтез-газ - штучно створена газова суміш оксиду вуглецю та водню, яка може бути отримана внаслідок газифікації вуглецевмісної сировини. Водень, як потенційно стратегічне паливо майбутнього, також входить до цього переліку [8, с. 782]. Він має високу теплоту згоряння та не

утворює викидів вуглекислого газу при спалюванні, але потребує спеціальних умов зберігання через свою леткість і вибухонебезпечність.

Кожен з перелічених агрегатних станів альтернативного палива має свої технологічні переваги та обмеження, які впливають на доцільність його застосування у тих чи інших промислових процесах. Тверде паливо зручне в умовах масового спалювання у шахтних або обертових печах, рідке - у форсуночних системах, а газоподібне - у пальникових пристроях з високоточною подачею [34, с. 1186]. Вибір оптимального виду пального має ґрунтуватися на ретельному аналізі потреб виробництва, вимог до температурного режиму, систем очищення викидів, а також наявної інфраструктури зберігання та транспортування.

Крім традиційних підходів до класифікації альтернативних видів палива за агрегатним станом, походженням або технологією виробництва, доцільно вводити додатковий критерій - рівень екологічної безпеки та обсяг шкідливих викидів, які утворюються внаслідок їх згоряння у промислових умовах. Такий підхід дозволяє комплексно оцінювати потенціал пального не лише з точки зору його енергетичної цінності, але й з позиції відповідності сучасним природоохоронним нормам і стандартам у сфері охорони атмосферного повітря.

Основними забруднюючими компонентами, що можуть утворюватися під час спалювання різних типів пального, є:

1. вуглекислий газ (CO_2) - основний парниковий газ, який прямо впливає на глобальне потепління;
2. оксиди азоту (NO_x) - речовини, що утворюються при високотемпературному згорянні в присутності атмосферного азоту, спричиняють утворення кислотних дощів та фотохімічного смогу;
3. оксиди сірки (SO_x) - побічні продукти горіння сірковмісного палива, що є джерелом кислотного забруднення довкілля;
4. леткі органічні сполуки (ЛОС) - токсичні або канцерогенні речовини, які утворюються внаслідок неповного згоряння або

термічного розкладу органічних залишків, зокрема пластикових відходів, мастил, текстилю тощо.

З огляду на вищезазначене, всі альтернативні види палива можна умовно ранжувати за екологічною чистотою в процесі їх термічного використання. Одними з найменш шкідливих, з точки зору екології, вважаються водень та біогаз. Водень при згорянні утворює виключно водяну пару, не продукуючи ані CO_2 , ані оксидів сірки, а за дотримання оптимального температурного режиму - й мінімальну кількість оксидів азоту. Біогаз, хоча й містить частку CO_2 у своєму складі, має значну перевагу завдяки вуглецевій нейтральності, адже вуглець, який вивільняється в процесі його спалювання, був попередньо поглинутий біомасою з атмосфери під час біологічного росту [17, с. 14].

Синтетичні гази, такі як синтез-газ, залежно від способу одержання та очищення, можуть мати досить низький рівень шкідливих викидів, однак при їхньому спалюванні важливо враховувати наявність домішок - наприклад, сірководню або органічних залишків. У той же час тверде альтернативне паливо (зокрема RDF або брикети з промислових відходів), незважаючи на високу теплоту згоряння, часто містить значну кількість домішок, які при термічному розкладі здатні утворювати складні токсичні компоненти, включаючи діоксини, фурани, хлорорганічні сполуки тощо. Це вимагає наявності багаторівневих систем газоочистки, фільтрації золи, а також технологічного моніторингу викидів у режимі реального часу.

Біопаливо рослинного походження (пелети, тріска, солома) займає проміжне місце у цьому спектрі. Його перевагою є мінімальний вміст сірки та металів, проте при спалюванні в неконтрольованих умовах можуть виникати проблеми з утворенням твердих частинок (золи), що потребують утилізації або фільтрації [2].

Отже, при оцінці доцільності використання того чи іншого виду альтернативного палива для випалення залізорудних окатишів доцільно враховувати не лише енергетичні характеристики, але й доступність ресурсу, екологічні аспекти, вплив на хімічний склад продукції, а також можливості

адаптації існуючого обладнання під нові умови експлуатації [29, с. 291]. Лише комплексний аналіз усіх перелічених факторів дозволяє зробити обґрунтований вибір на користь конкретного палива, яке не лише задовольнятиме потреби виробництва, але й сприятиме сталому розвитку металургійної галузі в цілому.

2.2. Техніко-економічні характеристики альтернативного палива (біомаса, відходи, вторинні гази, водень, RDF тощо)

Вибір оптимального виду палива для процесу випалення залізорудних окатишів вимагає не лише врахування фізико-хімічних властивостей паливної сировини, але й комплексної оцінки техніко-економічних показників. У випадку альтернативного палива доцільно розглядати такі ключові параметри: теплота згоряння, вологість, зольність, наявність шкідливих домішок, специфіка підготовки до використання, вплив на хід технологічного процесу, а також вартість впровадження та експлуатації у виробничому ланцюзі [29, с. 291].

Біомаса є однією з ключових категорій відновлюваних джерел енергії, яка формується з органічних речовин, що походять переважно з рослинної сировини, а в окремих випадках - з біогенних відходів тваринного походження [22]. У контексті використання як альтернативного палива в промислових високотемпературних процесах, зокрема при випаленні залізорудних окатишів, найбільший інтерес становить твердопаливна біомаса [17, с. 14]. До неї належать такі види матеріалів, як обрізки деревини, залишки лісозаготівельної та деревообробної діяльності (тирса, тріска, кора), аграрні відходи (солома, лушпиння соняшника, стебла кукурудзи), а також спеціально підготовлені тверді паливні форми - пелети та брикети, які виготовляються шляхом пресування подрібненої сировини [25, с. 41].

Ключовою технічною характеристикою біомаси є її теплота згоряння, яка в середньому становить від 12 до 18 МДж/кг, але може коливатися в

залежності від типу рослинної сировини, рівня вологості, способу обробки та умов зберігання. Наприклад, сухі деревні пелети з хвойних порід дерева можуть мати теплоту згоряння до 18 МДж/кг, тоді як сирі агровідходи із вологістю понад 25% - лише 10-12 МДж/кг [6, с. 89]. Для забезпечення стабільного та ефективного горіння, рекомендований рівень вологості біомаси не повинен перевищувати 12-15%, оскільки надлишок вологи значно знижує температуру факельного горіння, збільшує витрати на випарювання води, спричиняє утворення конденсату в димових каналах і зменшує загальний ККД теплотехнічного обладнання [15, с. 830].

Ще одним важливим показником є зольність, яка в більшості видів біомаси варіюється в межах 1,5-5%, проте може бути вищою у сировині з великим вмістом мінеральних домішок або залишків ґрунту [42]. Низька зольність є перевагою, оскільки зменшує частоту очистки теплообмінних поверхонь, мінімізує зношування футерівки печей і сприяє стабільнішій роботі паливної системи. Однак необхідно враховувати, що у випадку використання аграрних залишків (соломи, лушпиння), зола може мати підвищену хімічну активність та тенденцію до утворення шлаків при високих температурах [7, с. 35].

З екологічної точки зору, головною перевагою біомаси є її вуглецева нейтральність. Це означає, що кількість вуглекислого газу, який виділяється в процесі згоряння, відповідає тій кількості, яку рослина акумулювала з атмосфери протягом свого життєвого циклу в процесі фотосинтезу. Таким чином, біомаса не сприяє загальному підвищенню рівня CO₂ в атмосфері, на відміну від викопних палив, де вуглець "вивільняється" з геологічних покладів [44]. До того ж, при правильному проектуванні процесу спалювання біомаса майже не утворює сіркових оксидів, оскільки містить надзвичайно низький рівень сірки (менше 0,1%).

З економічної точки зору, привабливість біомаси як палива визначається її локальною доступністю. У регіонах з розвиненим сільським господарством, деревообробною промисловістю або тваринництвом така сировина доступна у

великих обсягах, що значно знижує витрати на транспортування. Крім того, за належної організації логістики, можливо забезпечити безперервне постачання палива впродовж усього року [21]. Однак, варто враховувати сезонність заготівлі, особливо для аграрних залишків, що потребує створення великих складських площ для зберігання, захищених від атмосферних опадів [15, с. 830]. Вартість біомаси значно коливається в залежності від форми (насипна або пресована), відстані транспортування та ринку пелет. У середньому ціна деревних пелет становить від 60 до 120 доларів США за тонну, тоді як необроблені відходи можуть бути навіть безкоштовними для підприємства, якщо воно саме є виробником деревини або агросировини [41].

До недоліків використання біомаси також належить її нестабільність за фізико-хімічними властивостями. Це ускладнює точне прогнозування теплового балансу печей та потребує коригування режимів горіння [6, с. 89]. Для вирішення цієї проблеми все частіше використовуються змішані паливні стратегії - наприклад, поєднання біомаси з RDF або природним газом, що дозволяє забезпечити стабільну температуру та інтенсивність процесу випалу [24].

Підсумовуючи, можна стверджувати, що біомаса є перспективним видом палива для часткового або повного заміщення викопних енергоносіїв у металургійних процесах, зокрема в операціях випалення залізорудних окатишів [26]. Висока екологічна безпечність, достатній енергетичний потенціал, локальна доступність і можливість адаптації до різних технологічних схем роблять біомасу доцільним вибором за умов правильної організації ланцюга постачання, сушіння, зберігання та спалювання [22].

Серед сучасних альтернативних джерел енергії, які можуть бути ефективно застосовані в промислових теплотехнічних процесах, особливу увагу заслуговує тверде відновлене паливо (RDF, Refuse Derived Fuel) - енергетичний ресурс, що утворюється шляхом механіко-біологічної або термомеханічної обробки побутових і промислових відходів. За своєю природою RDF є комплексною сумішшю горючих фракцій твердих відходів,

зокрема полімерних матеріалів (пластик), паперу, картону, текстилю, деревини, гуми та залишків упаковки, які були відокремлені від інертної, органічної та вологовмісної маси. Його виробництво передбачає декілька технологічних етапів: сортування, подрібнення, осушення, а іноді - грануляцію або брикетування для зручності транспортування й зберігання.

Основною характеристикою RDF, яка визначає його потенціал як замітника традиційних викопних видів палива, є висока теплота згоряння, що зазвичай становить від 20 до 25 МДж/кг, залежно від домінуючих компонентів у складі. За цим показником RDF можна порівняти з бурим вугіллям або низькосортним коксом, що дозволяє розглядати його як повноцінну альтернативу у високотемпературних процесах, таких як випалення залізорудних окатишів у металургії [23]. Проте слід розуміти, що RDF не є паливом із стабільним складом - його хімічні та фізичні характеристики суттєво коливаються, оскільки вони залежать від типу відходів, технології підготовки та рівня очистки.

Одним із критичних аспектів використання RDF у промислових печах є наявність потенційно небезпечних компонентів, зокрема сполук хлору, фтору, важких металів (кадмій, свинець, ртуть), а також залишків фарб, клеїв, плівок або лаків. Під час спалювання таких елементів можуть утворюватися токсичні продукти горіння, включаючи діоксини, фурани, а також високотемпературні оксиди азоту та сірки. У зв'язку з цим впровадження RDF як джерела енергії вимагає високого рівня технологічного супроводу: це включає застосування ефективних газоочисних систем (циклонів, скрубєрів, електрофільтрів, рукавних фільтрів тощо), моніторинг викидів у реальному часі, а також адаптацію пальникового обладнання для роботи зі змішаним, непостійним за якістю паливом.

Крім технічних викликів, важливо оцінити економічну доцільність впровадження RDF у виробничі ланцюги. У регіонах, де функціонує добре налагоджена система роздільного збирання, сортування та переробки твердих побутових відходів, RDF може бути надзвичайно дешевим ресурсом. Часто

навіть сам процес прийому такого палива є вигідним для промислових споживачів, оскільки оператори систем поводження з відходами платять за його утилізацію. Вартість RDF у такому випадку може бути нижчою в кілька разів, ніж традиційного викопного палива, а підприємство отримує подвійну вигоду: зниження паливних витрат і виконання екологічних нормативів щодо скорочення викидів CO₂.

Втім, у регіонах, де система сортування та переробки відходів знаходиться на початковій стадії розвитку або відсутня взагалі, RDF може виявитися недоступним у необхідних обсягах або низької якості, що потребуватиме додаткових інвестицій у інфраструктуру його підготовки. Також важливо враховувати, що впровадження RDF потребує сертифікації палива, а його використання регламентується рядом екологічних і технічних норм, які відрізняються залежно від країни чи регіону.

У загальному підсумку, RDF представляє собою перспективний енергетичний ресурс подвійного призначення: з одного боку, це джерело теплової енергії, яке за характеристиками наближається до традиційного вугілля, а з іншого - інструмент для утилізації значного обсягу відходів, які інакше потрапили б на полігони. Його раціональне використання дозволяє зменшити залежність промисловості від невідновлюваних ресурсів, скоротити обсяги сміттєзвалищ і знизити загальне екологічне навантаження. Проте ефективність такої заміни напряду залежить від технологічної готовності підприємства до роботи з нестабільним паливом, а також від наявності екологічно безпечної системи утилізації газоподібних продуктів згоряння.

Вторинні гази, які утворюються в результаті технологічних процесів металургійного або хімічного виробництва, представляють собою значний потенціал для використання як альтернативного джерела енергії у випалювальних процесах, зокрема при виробництві залізорудних окатишів [35]. До таких газів належать коксовий газ, доменний газ, конвертерний газ та інші побічні газоподібні продукти, що утворюються під час переробки сировини або виготовлення металу [29, с. 291]. Ці гази містять у своєму складі

горючі компоненти - зокрема оксид вуглецю (CO), водень (H_2), метан (CH_4) та інші вуглеводні - які і забезпечують їм енергетичну цінність.

Теплота згоряння вторинних газів коливається в широкому діапазоні - приблизно від 3 до 10 МДж на кубічний метр газу (МДж/м^3), що безпосередньо залежить від їхнього точного хімічного складу та концентрації горючих складових. Наприклад, коксовий газ з високим вмістом водню і оксиду вуглецю демонструє вищу теплоту згоряння, ніж доменний газ із більшим вмістом неактивних домішок. Ця енергетична цінність дозволяє ефективно використовувати вторинні гази для підтримання температурного режиму у печах випалу, знижуючи потребу в традиційних видах палива.

Водень сьогодні вважається одним із найперспективніших і найінноваційніших джерел палива майбутнього, яке має величезний потенціал для радикального зменшення екологічного навантаження на промисловість та енергетику. Його основною перевагою є надзвичайно висока теплота згоряння - близько 120 мегаджоулів на кілограм (МДж/кг), що значно перевищує аналогічні показники для традиційних викопних палив, таких як вугілля чи природний газ. Важливо підкреслити, що при спалюванні водню утворюється виключно водяна пара, а отже, відсутні викиди шкідливих парникових газів, зокрема вуглекислого газу (CO_2), за умови, що водень отриманий з відновлюваних джерел енергії, так званого «зеленого» водню. Це робить його одним із ключових інструментів у процесах декарбонізації, особливо в енергоємних галузях, таких як металургія, хімічна промисловість та транспорт.

Використання водню як палива у технологічних процесах випалу залізорудних окатишів відкриває нові можливості для зниження викидів CO_2 та підвищення екологічної безпеки виробництва [29, с. 290]. Водень здатен забезпечити стабільне горіння при високих температурах, що необхідно для якісного випалу, при цьому значно зменшуючи вуглецевий слід промислових підприємств.

Проте, незважаючи на значні переваги, застосування водню пов'язане з низкою технічних та економічних викликів, які наразі обмежують його масове впровадження. По-перше, водень має низьку об'ємну енергоємність - це означає, що для зберігання і транспортування великої кількості енергії необхідно або сильно стискати газ до високих тисків (понад 200 бар), або охолоджувати до криогенних температур (-253°C), що потребує дорогого та складного обладнання. По-друге, водень є дуже вибухонебезпечним газом, що ставить високі вимоги до систем безпеки, герметичності обладнання і контролю процесів, щоб уникнути ризиків займання або витоків.

Ще одним фактором, який наразі стримує широке застосування водню, є його висока вартість виробництва, особливо «зеленого» водню, який добувають за допомогою електролізу води з використанням електроенергії з відновлюваних джерел (сонячних, вітрових чи гідроелектростанцій). Вартість цієї технології поки що значно перевищує ціну на традиційні вуглеводневі палива, що зумовлює економічні труднощі для підприємств, які бажають перейти на водневі технології. Однак експерти прогнозують, що з подальшим розвитком електролізних систем, масштабуванням виробництва та зниженням вартості відновлюваної електроенергії ціни на зелене паливо будуть поступово знижуватися, що зробить водень більш конкурентоспроможним.

Таким чином, водень як альтернативне паливо для металургійних процесів є високотехнологічним і екологічно безпечним рішенням з великим потенціалом для майбутнього, проте його широке впровадження вимагає подолання значних інфраструктурних, технічних та економічних бар'єрів. Робота в цьому напрямку активно триває, і поступове вдосконалення технологій, а також розширення ринку водню, ймовірно, зроблять його ключовим елементом зеленої трансформації важкої промисловості.

Промислові та побутові відходи органічного походження, до яких належать різноманітні матеріали, такі як текстильні залишки, гумові вироби, пластик, а також шлами та відпрацьовані мастильні матеріали, після відповідної підготовки можуть бути ефективно використані як джерело

альтернативного енергетичного палива у вигляді рідких або твердих компонентів. Зокрема, відпрацьовані мастила, які проходять процедури очищення від механічних домішок, води та інших забруднювачів, демонструють значну теплоту згоряння, що коливається в межах від 35 до 40 мегаджоулів на кілограм (МДж/кг). Це робить їх конкурентоспроможними щодо традиційних рідких палив, таких як мазут чи дизельне пальне, які широко застосовуються у промислових теплогенеруючих установках.

Використання цих відходів у якості палива дозволяє не лише зменшити обсяги накопичення небезпечних відходів, а й частково замінити викопні енергоресурси, що позитивно впливає на економічну складову виробництва та екологічний баланс регіонів, де розвинена промислова діяльність і є значні обсяги таких відходів. Окрім мастил, тверді органічні відходи - наприклад, зношені гумові вироби або пластик після механічного подрібнення та додаткової обробки - можуть бути перетворені у тверде паливо або використані як сировина для виробництва альтернативних твердих паливних матеріалів, таких як RDF (Refuse Derived Fuel).

Разом із тим, слід враховувати, що спалювання таких матеріалів пов'язане з певними екологічними ризиками [38]. Органічні відходи часто містять у своєму складі домішки хлору, сірки, важких металів та інших токсичних елементів, які при горінні можуть утворювати шкідливі гази, зокрема діоксини, фурани, оксиди сірки та азоту, а також леткі органічні сполуки [27]. Саме тому для безпечного використання таких видів палива необхідне встановлення комплексних систем багатоступеневої очистки димових газів, що включають фільтри, скрубери, каталізатори та інші технології, спрямовані на мінімізацію викидів забруднювачів у атмосферу.

З технічної точки зору, адаптація існуючих теплогенеруючих або металургійних установок для роботи з рідкими та твердими видами палива, отриманими з промислових і побутових відходів, потребує модернізації систем подачі, контролю горіння та очистки викидів. Це дозволяє знизити

ризиків, пов'язаних з нерівномірністю характеристик сировини та забезпечити стабільність технологічного процесу.

Отже, промислові та побутові відходи органічного походження, після їх ретельної підготовки, мають значний потенціал для застосування в якості альтернативного палива. Їх використання сприяє не тільки вирішенню проблем утилізації великої кількості відходів, а й зменшенню залежності від традиційних викопних палив, що позитивно впливає на екологічну ситуацію та економічну ефективність підприємств, особливо в регіонах із розвинутою промисловістю.

Таблиця 2.1 - Порівняння техніко-економічних характеристик альтернативного палива, придатного для випалення залізрудних окатишів

№	Вид палива	Теплота згоряння, МДж/кг або МДж/м³	Вологість, %	Зольність, %	Складність використання	Орієнтовна ціна, дол./т.	Рівень шкідливих викидів	Коментарі щодо застосування
1	Біомаса (пелети, тріска)	14-18 (в сухому стані)	10-20	2-5	Низька	60-120	Низький	Доступна, потребує сушки та подрібнення
2	RDF (альтернативне тверде паливо)	20-25	10-15	15-25	Середня	30-70	Середній-високий	Необхідна фільтрація газів, нестабільний склад

3	Вторинні гази (доменний , коксовий)	3-10 (МДж/ м³)	-	-	Висока	- (побічн ий продукт)	Середні й	Потрібна газозбірна система, стабілізац ія тиску
4	Водень (зелений)	~120 (МДж/ кг)	0	0	Висока	>3000	Дуже низьки й	Висока екологічні сть, дорогий і складний в зберіганні
5	Відпрацьо вані мастила	35-40	<1	до 1	Середня	100-200	Високи й (при неповн ому очищен ні)	Необхідн а очистка, обережне використа ння
6	Біогаз	18-25 (МДж/ м³ CH ₄)	-	-	Середня	20-50 (залежн о від джерела)	Низьки й- середні й	Вимагає біореакто рів та систем осушки
7	Синтез-газ	10-15 (МДж/ м³)	-	-	Висока	Висока (залежи ть від техноло гії)	Середні й	Потрібна складна установка газифікац ії

Узагальнюючи, можна зробити висновок, що техніко-економічні характеристики альтернативного пального значно варіюються залежно від його походження, фізичних властивостей та рівня підготовки до використання. Біомаса та RDF демонструють хорошу теплоту згоряння і відносну доступність, але потребують стабільного логістичного ланцюга та

контролю якості. Вторинні газы та промислові відходи забезпечують утилізацію побічних продуктів виробництва, проте вимагають складної інфраструктури. Водень, як перспективне екологічно чисте паливо, має значний потенціал, але поки що залишається економічно обмеженим для масового впровадження. Раціональне поєднання кількох джерел альтернативного пального з урахуванням їхніх технічних характеристик, наявності в конкретному регіоні та екологічних вимог може стати ефективною стратегією для забезпечення сталого функціонування випалювальних агрегатів у металургії.

2.3. Вплив різних типів альтернативного палива на якість випалених окатишів

Впровадження альтернативних видів палива у процес випалення залізорудних окатишів стає важливою складовою модернізації металургійного виробництва, спрямованої на підвищення екологічності та економічної ефективності технологічних процесів. Однак вибір конкретного виду альтернативного палива безпосередньо впливає не лише на екологічні показники і витрати, а й на кінцеву якість випалених окатишів, що визначає їх придатність для подальшого використання у доменних печах [26].

Перш за все, якість окатишів характеризується низкою параметрів: механічною міцністю, пористістю, хімічним складом, рівномірністю випалу, а також здатністю до агломерації та спікання під впливом високих температур. Всі ці характеристики залежать від умов горіння палива, температурного режиму, а також складу продуктів згоряння, які безпосередньо формуються вибраним видом енергоносія.

Біомаса, як одне з найпоширеніших альтернативних палив, має відносно низьку теплоту згоряння порівняно з традиційним вугіллям або мазутом [45]. Це вимагає підвищення об'ємів спалюваного палива для досягнення необхідної температури випалу. Водночас біомаса зазвичай має низький вміст

золи та сірки, що сприяє зменшенню утворення шкідливих домішок у готових окатишах [2]. Однак у разі недостатньої якості біосировини або невідповідної технології сушіння та подрібнення існує ризик нерівномірного горіння, що може призвести до появи недоспалених або пересушених зон в агрегатах. Це негативно позначається на однорідності структури окатишів та їхній механічній міцності.

Вторинні гази металургійного виробництва, такі як коксовий або доменний газ, мають досить стабільний склад і помірну теплоту згоряння. Використання цих газів дозволяє забезпечити рівномірний температурний режим в камерах випалу, що позитивно впливає на формування однорідної пористої структури окатишів, оптимальну міцність та мінімізацію тріщин [30, с. 204]. Крім того, застосування таких газів знижує потребу у додатковому паливі, що позитивно впливає на економічну ефективність процесу. Проте через наявність домішок і можливість коливань у складі газу необхідно ретельно контролювати умови горіння для запобігання утворенню шкідливих сполук, які можуть негативно вплинути на якість продукції.

Водень, як високоефективне і екологічно чисте паливо, забезпечує високу температуру полум'я та майже повну відсутність викидів вуглецевих сполук. Це створює оптимальні умови для повного випалу залізорудних часток, сприяє утворенню міцної і рівномірної структури окатишів з високою стійкістю до механічних навантажень [29, с. 290]. Проте через високу температуру горіння водню важливо суворо контролювати температурний режим, аби уникнути перегріву, який може спричинити піролізні процеси або надмірне спікання, що знижує пористість і, відповідно, якість окатишів.

Тверді побутові та промислові відходи, зокрема RDF, мають значний енергетичний потенціал, однак їх неоднорідний склад може призводити до нерівномірності горіння і утворення локальних зон з підвищеним вмістом шкідливих домішок, таких як хлор і важкі метали [25, с. 42]. Внаслідок цього можливе погіршення хімічного складу окатишів і появи дефектів у структурі, що знижує їхню якість і продуктивність у доменних печах. Тому застосування

такого палива вимагає вдосконалення систем підготовки і контролю палива, а також модернізації технологічного обладнання.

Загалом, вплив альтернативного палива на якість випалених залізорудних окатишів визначається балансом між тепловою потужністю, стабільністю горіння, хімічним складом продуктів згоряння і можливістю контролю технологічного процесу. Раціональний вибір виду палива, оптимізація режимів його застосування і впровадження систем контролю якості є ключовими факторами для забезпечення стабільного виробництва окатишів високої якості, які відповідають сучасним вимогам металургійної галузі.

Розділ 3. Оцінка ефективності заміни традиційного палива альтернативним у процесі випалення окатишів

3.1. Методика техніко-економічного оцінювання ефективності заміни палива

Оцінка ефективності впровадження альтернативних видів палива замість традиційних енергоносіїв у процесі випалення залізорудних окатишів є складним багатофакторним завданням, яке потребує системного підходу та інтеграції технічних, економічних і екологічних аспектів. Для отримання об'єктивної та достовірної оцінки застосовується комплексна методика техніко-економічного аналізу, яка включає кількісне вимірювання ключових показників, порівняння альтернативних варіантів та прогнозування їх впливу на виробничі процеси [29, с. 292].

Першим кроком у методиці є збір і систематизація початкових даних про характеристики як традиційного, так і альтернативного палива. До них належать фізико-хімічні властивості (теплота згоряння, вологість, вміст золи, склад продуктів горіння), технологічні параметри (умови спалювання, температурний режим, сумісність із існуючим обладнанням), а також економічні показники (вартість сировини, логістичні витрати, інвестиції в модернізацію технології) [4, с. 746].

Далі проводиться технічний аналіз, який включає оцінку впливу заміни палива на параметри процесу випалу: стабільність горіння, температура, швидкість та рівномірність випалювання, а також якість отриманих окатишів. Важливо враховувати можливі зміни в експлуатації обладнання, потребу у додаткових системах очищення газів або модернізації паливоподачі. Результати технічного аналізу дозволяють визначити доцільність використання конкретного виду альтернативного палива з огляду на виробничі стандарти та технологічні вимоги.

Економічна оцінка базується на порівнянні сумарних витрат, пов'язаних з використанням різних типів палива, включаючи закупівельну ціну, транспортні витрати, вартість зберігання і підготовки палива, а також витрати на модернізацію обладнання та експлуатаційне обслуговування. Особливу увагу приділяють аналізу впливу зміни палива на продуктивність виробництва і собівартість випалених окатишів [30]. Крім того, до економічної моделі інтегруються можливі фінансові вигоди від зниження екологічних платежів або штрафів, пов'язаних з викидами забруднюючих речовин.

Одним із важливих елементів методики є екологічна оцінка, що включає аналіз викидів парникових газів, оксидів азоту, сірки, пилу та інших шкідливих речовин у атмосферу. Цей аналіз дозволяє оцінити потенційний екологічний ефект від заміни палива, що має значення як для дотримання нормативних вимог, так і для поліпшення іміджу підприємства.

Для комплексної оцінки ефективності застосовується метод багатокритеріального аналізу, що дозволяє інтегрувати технічні, економічні та екологічні показники в єдину модель, оцінити співвідношення переваг і недоліків кожного варіанта, а також зробити обґрунтований вибір оптимального рішення. Зазвичай використовуються індекси ефективності, що поєднують показники собівартості виробництва, енергоспоживання, рівня викидів і якості продукції.

Таким чином, запропонована методика техніко-економічного оцінювання дозволяє всебічно проаналізувати потенціал заміни традиційного палива альтернативним у процесі випалення залізорудних окатишів, враховуючи як технологічні особливості, так і економічні реалії і екологічні вимоги. Вона створює надійну основу для прийняття стратегічних рішень, спрямованих на підвищення конкурентоспроможності і сталості металургійного виробництва.

3.2. Порівняння енерговитрат, собівартості та викидів при використанні традиційного та альтернативного палива

Оцінка заміни традиційних видів палива альтернативними джерелами енергії у процесі випалення залізорудних окатишів передбачає всебічний аналіз трьох основних аспектів: енерговитрат, собівартості виробництва та рівня забруднюючих викидів. Кожен із цих параметрів є ключовим фактором, що впливає на загальну ефективність та доцільність впровадження альтернативних технологій у металургійному виробництві.

Перш за все, аналіз енерговитрат фокусується на порівнянні кількості первинної енергії, необхідної для випалу окатишів при застосуванні традиційного палива, такого як природний газ, вугілля або мазут, та альтернативних видів палива - біомаси, відходів, RDF, водню чи вторинних газів [15, с. 830]. Важливо враховувати не лише теплоту згоряння конкретного палива, але й ефективність процесу його використання з урахуванням специфіки теплового режиму та режимів горіння. Наприклад, біомаса має нижчу теплоту згоряння у порівнянні з вугіллям, однак завдяки більш чистому горінню і можливості використання сучасних пальникових систем загальні енерговитрати можуть бути знижені [17, с. 15]. Так само застосування водню забезпечує високу теплопродуктивність і більш повне згоряння без утворення CO₂, що позитивно впливає на енергетичну ефективність процесу.

Другим важливим критерієм є собівартість виробництва, яка включає в себе комплекс витрат на придбання палива, транспортування, зберігання, а також можливі додаткові інвестиції у модернізацію устаткування, необхідного для адаптації технологічного процесу під альтернативні джерела енергії. У більшості випадків традиційне паливо характеризується стабільною ціною і налагодженою логістикою, тоді як альтернативні джерела енергії можуть вимагати значних капіталовкладень на етапі впровадження, проте у подальшому здатні забезпечити економію за рахунок зниження витрат на екологічні платежі або використання місцевої сировини. Наприклад, RDF або

біомаса можуть бути дешевшими у регіонах із розвиненою системою збору та переробки відходів, що робить їх вигідними з економічної точки зору [17, с. 14]. Водночас застосування водню поки що обмежене через високу вартість виробництва та складність систем зберігання.

Третій критичний аспект - це екологічні показники, зокрема обсяг викидів забруднюючих речовин у атмосферу, що формуються в результаті спалювання різних видів палива [38]. Викиди CO_2 , оксидів азоту (NO_x), сірководню, а також летких органічних сполук є основними забруднювачами, які впливають на екологічну безпеку виробництва та відповідають за екологічні платежі підприємств. Традиційні види палива, особливо вугілля та мазут, є джерелами значних викидів CO_2 та інших шкідливих газів, що створює додаткове навантаження на навколишнє середовище. Альтернативні ж палива, зокрема біомаса і водень, характеризуються суттєво нижчим рівнем викидів. Біомаса, завдяки своїй вуглецевій нейтральності, не збільшує загальний баланс парникових газів, а водень при спалюванні практично не генерує CO_2 , що робить його екологічно найчистішим паливом [43]. Проте деякі види альтернативного палива, такі як RDF або відходи промислового походження, можуть містити домішки, що потребують додаткової очистки димових газів і контролю процесу згоряння для мінімізації токсичних викидів [27]. Сумарний порівняльний аналіз цих трьох параметрів дозволяє оцінити не лише технічну доцільність, але й економічну вигідність та екологічну безпеку впровадження альтернативних видів палива у виробництво. Ефективна заміна традиційного палива альтернативним має забезпечувати зниження загальних енерговитрат, скорочення собівартості випалення окатишів, а також суттєве зменшення обсягів шкідливих викидів, що у свою чергу сприяє підвищенню конкурентоспроможності підприємства та збереженню навколишнього середовища.

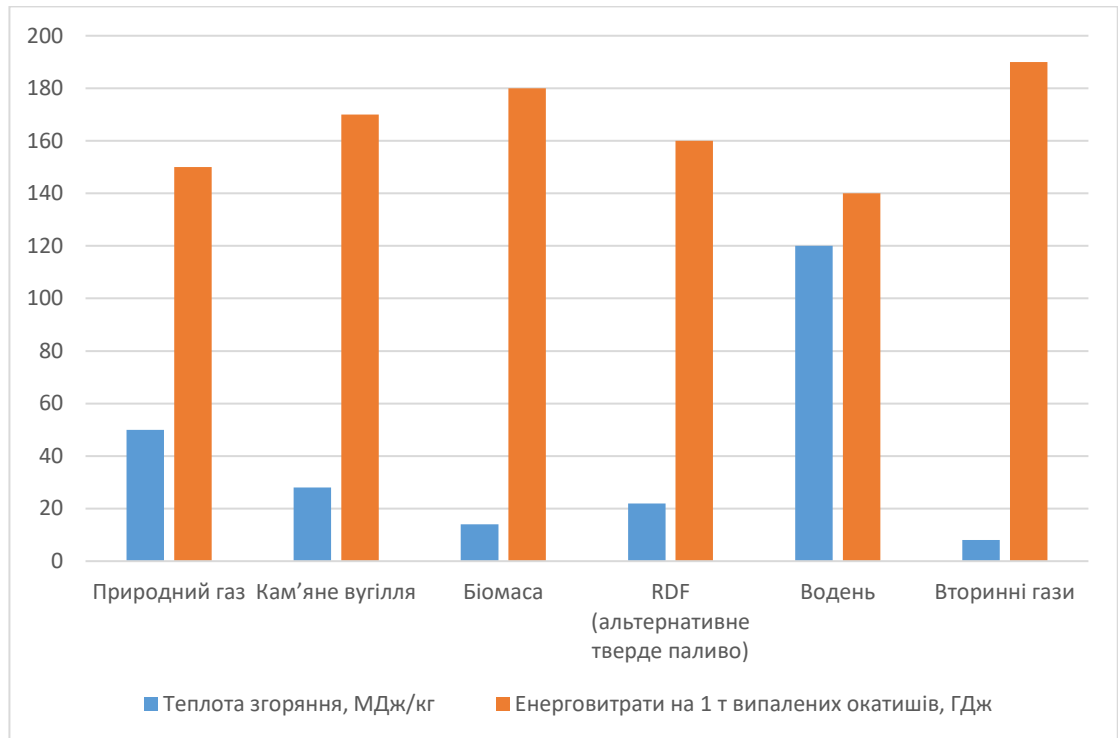


Рис. 3.1- Порівняння енерговитрат і теплотворної здатності палива

Найбільш енергоефективними й екологічно прийнятними видами палива є водень і природний газ, тоді як біомаса може бути перспективною альтернативою в рамках переходу до сталого виробництва.

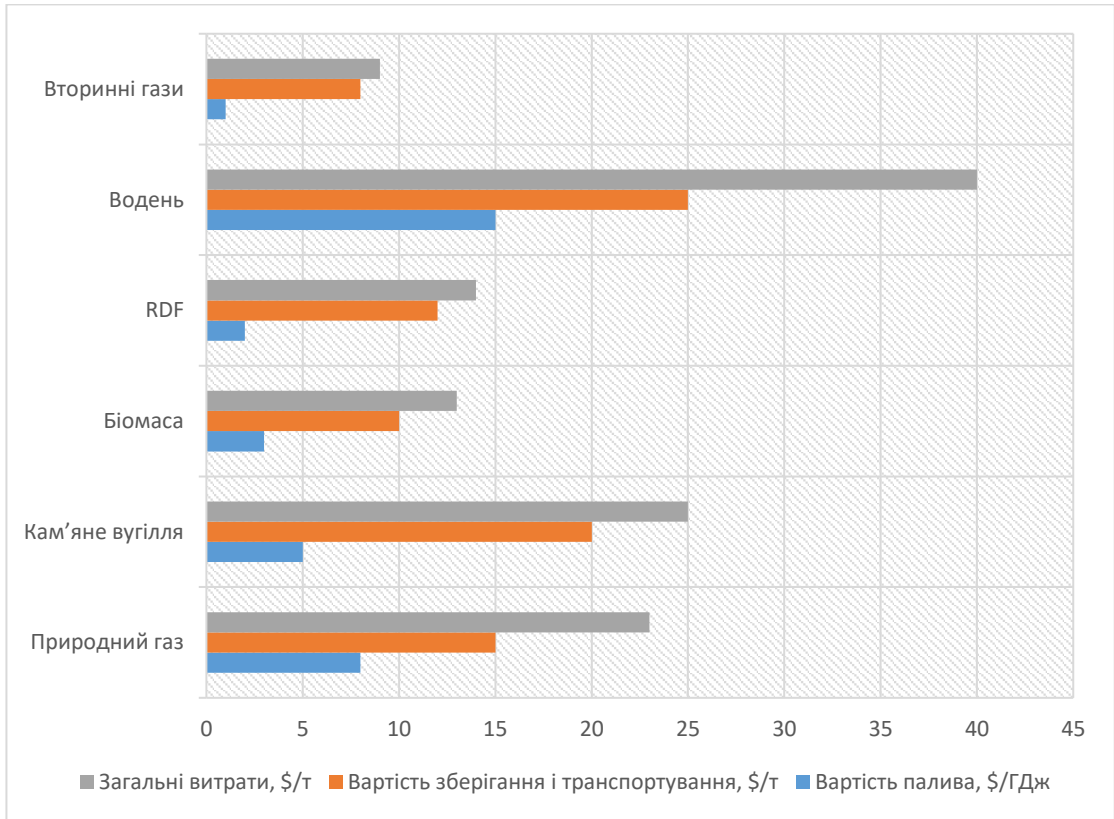


Рис. 3.2- Собівартість палива та витрати на зберігання і транспортування

Отже, можна зазначити, що з точки зору економічної доцільності перевагу мають біомаса, RDF і вторинні гази, тоді як водень, попри екологічні переваги, поки що поступається за економічними показниками.

Таблиця 3.1- Викиди основних забруднюючих речовин при спалюванні палива (кг/т окатишів)

Тип палива	CO ₂ , кг	NO _x , кг	SO ₂ , кг	Леткі органічні сполуки, кг	Примітки
Природний газ	2200	8	1,5	0,3	Відносно чисте горіння
Кам'яне вугілля	2800	12	10	1,2	Високі викиди
Біомаса	0*	6	0,5	0,6	Вуглецева нейтральність
RDF	2000	10	8	2,0	Можливі токсичні домішки

Водень	0	2	0	0	Екологічно чисте
Вторинні гази	1500	7	2	0,8	Викиди залежать від очищення

*Викиди CO₂ біомаси прийняті за вуглецеву нейтральність (викиди компенсуються поглинанням рослинами).

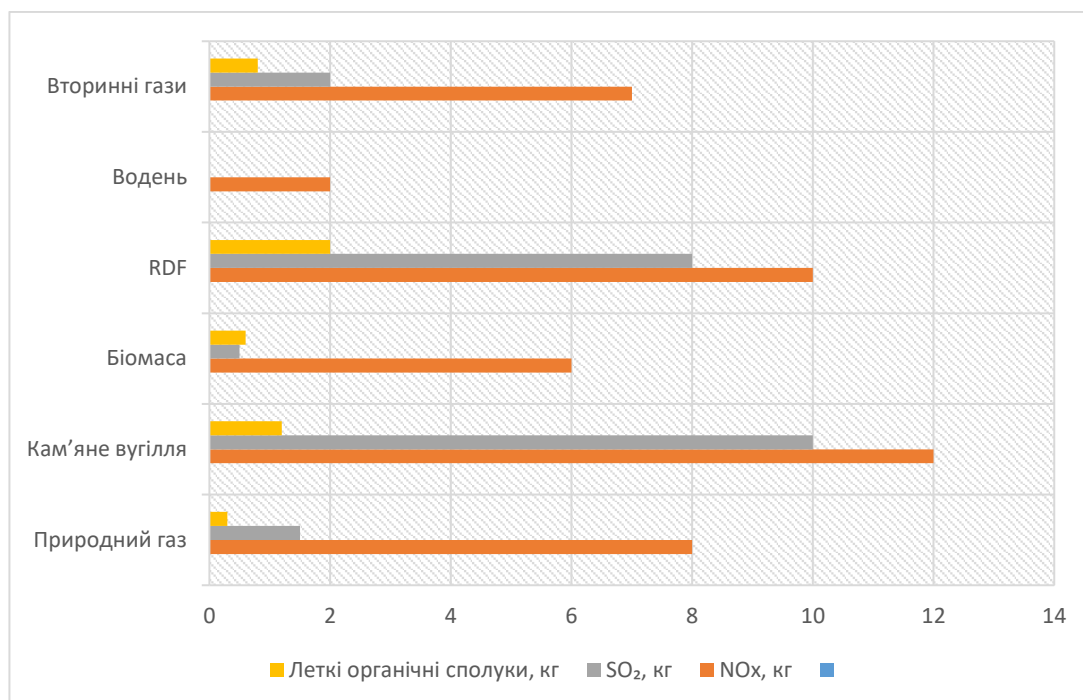


Рис. 3.3- Викиди основних забруднюючих речовин при спалюванні палива (кг/т окатишів)

З екологічної точки зору, пріоритетними для використання є водень, біомаса та природний газ, тоді як кам'яне вугілля та RDF потребують додаткових технологій очищення або заміни більш екологічними альтернативами.

Таким чином, комплексний підхід до порівняння енерговитрат, собівартості та екологічних показників є ключовим інструментом для прийняття обґрунтованих рішень у сфері впровадження альтернативних технологій у металургійному секторі.

3.3. Розрахунок зниження викидів CO₂, NO_x, SO_x у результаті впровадження альтернативного палива

Одним із ключових критеріїв оцінювання ефективності впровадження альтернативного палива в технологічних процесах випалення залізорудних окатишів є зменшення шкідливих викидів у атмосферу, зокрема таких, як вуглекислий газ (CO₂), оксиди азоту (NO_x) та оксиди сірки (SO_x) [30]. Розрахунок потенційного зниження цих забруднюючих речовин дозволяє об'єктивно оцінити екологічні переваги заміни традиційних викопних енергоносіїв, таких як природний газ або кам'яне вугілля, на альтернативні джерела енергії [33].

Перш за все, для проведення розрахунків необхідно встановити базові значення викидів CO₂, NO_x та SO_x при спалюванні традиційного палива на одиницю продукції - в даному випадку, на тонну випалених окатишів. Ці дані, як правило, отримуються на основі лабораторних досліджень або експлуатаційної статистики металургійних підприємств. Наприклад, при спалюванні природного газу в середньому утворюється близько 2200 кг CO₂, 8 кг NO_x і 1,5 кг SO_x на тонну продукції. Для кам'яного вугілля відповідні значення викидів є вищими і можуть сягати 2800 кг CO₂, 12 кг NO_x та 10 кг SO_x.

Далі визначаються аналогічні показники для альтернативних видів палива, що розглядаються для заміни. Біомаса, як паливо з вуглецевою нейтральністю, формально не збільшує сумарний вміст CO₂ в атмосфері, оскільки викиди під час горіння компенсуються поглинанням цього газу під час росту рослинної сировини. Викиди NO_x та SO_x для біомаси, зазвичай, дещо нижчі або порівнянні з традиційними видами палива, при цьому їхні значення можуть варіюватися в залежності від виду біомаси і умов спалювання [6, с. 87]. Використання RDF (Refuse Derived Fuel) дозволяє суттєво скоротити викиди CO₂, зменшуючи їх приблизно на 20-30% порівняно з кам'яним вугіллем, хоча NO_x і SO_x можуть залишатися на рівні близькому

до традиційного палива, або дещо нижчими за рахунок сучасних систем очищення газів. Водень як паливо характеризується практично повною відсутністю CO_2 та SO_x викидів, а кількість NO_x залежить від режимів горіння, але загалом є значно нижчою у порівнянні з викопними джерелами. Вторинні гази, що утворюються як побічний продукт металургії, містять менше горючих речовин, тому їх теплотворна здатність і викиди, як правило, нижчі, що також сприяє зменшенню екологічного навантаження.

Для практичного розрахунку зниження викидів здійснюють порівняння обсягів викидів за умови використання традиційного палива та альтернативного, з урахуванням енерговитрат на одиницю продукції. Наприклад, якщо при спалюванні природного газу на виробництво 1 тонни окатишів необхідно 150 ГДж енергії з відповідними викидами CO_2 - 2200 кг, а при переході на біомасу теплотою згоряння 14 МДж/кг та енерговитратами 180 ГДж на тонну - викиди CO_2 еквівалентні нулю, то загальне зниження CO_2 складе приблизно 2200 кг на тонну продукції. Аналогічно розраховуються зміни викидів NO_x і SO_x , використовуючи питомі показники для кожного виду палива та враховуючи можливості очисних систем [44].

Важливо підкреслити, що реальні результати зниження викидів залежать від багатьох факторів, серед яких технологічна оснащеність підприємства, якість альтернативного палива, ефективність систем очищення димових газів, а також дотримання режимів горіння. Тому розрахунки слід розглядати як орієнтовні.

Наведемо вихідні дані:

1. Обсяг випалення: 1 тонна залізорудних окатишів (одиниця продукції для розрахунку).
2. Потреба в енергії для випалення (теплова енергія): 150 ГДж на 1 тонну окатишів (постійна для всіх варіантів, для спрощення).

Таблиця 3.2- Характеристики палива (теплота згоряння та викиди на одиницю енергії):

Вид палива	Теплота згоряння, МДж/кг або МДж/м ³	Викиди CO ₂ , кг/ГДж	Викиди NO _x , г/ГДж	Викиди SO _x , г/ГДж
Природний газ	35,8	56	0,05	0,02
Кам'яне вугілля	25	95	0,08	0,07
Біомаса	15	0	0,03	0,01
RDF	22	65	0,06	0,03
Водень	120	0	0,02	0

Перший етап. Розрахунок необхідної маси палива на 1 тонну окатишів.

Для кожного виду палива розрахуємо необхідну кількість для забезпечення 150 ГДж теплової енергії.

$$m = 150 \text{ ГДж} / \text{теплота згоряння (ГДж/кг або ГДж/м}^3\text{)}$$

Для природного газу (теплота в МДж/м³, 1 ГДж = 1000 МДж):

$$m_{\text{газ}} = 150\,000 \text{ МДж} / 35.8 \text{ МДж/м}^3 = 4190 \text{ м}^3$$

Для кам'яного вугілля:

$$m_{\text{вугілля}} = 150\,000 / 25 = 6000 \text{ кг}$$

Для біомаси:

$$m_{\text{біомаса}} = 150\,000 / 15 = 10\,000 \text{ кг}$$

Для RDF:

$$m_{\text{RDF}} = 150\,000 / 22 = 6818 \text{ кг}$$

Для водню:

$$m_{\text{водень}} = 150\,000 / 120 = 1250 \text{ кг}$$

Другий етап. Розрахунок викидів CO₂, NO_x, SO_x на 1 тонну окатишів

Викиди на одиницю енергії множимо на необхідну енергію:

$$E_{\text{CO}_2} = 150 \text{ ГДж} \times \text{викиди CO}_2 \text{ на ГДж}$$

Аналогічно для NO_x та SO_x.

Викиди CO₂ (кг/тонна окатишів):

1. Природний газ:

$$150 \times 56 = 8400 \quad 150 \times 56 = 8400 \text{ кг}$$

2. Кам'яне вугілля:

$$150 \times 95 = 14250 \quad 150 \times 95 = 14250 \text{ кг}$$

3. Біомаса:

0 кг (вуглецева нейтральність)

4. RDF:

$$150 \times 65 = 9750 \quad 150 \times 65 = 9750 \text{ кг}$$

5. Водень:

0 кг

Викиди NO_x (кг/тонна окатишів):

1. Природний газ:

$$150 \times 0.05 = 7.5 \quad 150 \times 0.05 = 7.5 \text{ кг}$$

2. Кам'яне вугілля:

$$150 \times 0.08 = 12 \quad 150 \times 0.08 = 12 \text{ кг}$$

3. Біомаса:

$$150 \times 0.03 = 4.5 \quad 150 \times 0.03 = 4.5 \text{ кг}$$

4. RDF:

$$150 \times 0.06 = 9 \quad 150 \times 0.06 = 9 \text{ кг}$$

5. Водень:

$$150 \times 0.02 = 3 \quad 150 \times 0.02 = 3 \text{ кг}$$

Викиди SO_x (кг/тонна окатишів):

1. Природний газ:

$$150 \times 0.02 = 3 \quad 150 \times 0.02 = 3 \text{ кг}$$

2. Кам'яне вугілля:

$$150 \times 0.07 = 10.5 \quad 150 \times 0.07 = 10.5 \text{ кг}$$

3. Біомаса:

$$150 \times 0.01 = 1.5 \quad 150 \times 0.01 = 1.5 \text{ кг}$$

4. RDF:

$$150 \times 0.03 = 4.5 \quad 150 \times 0.03 = 4.5 \text{ кг}$$

5. Водень:

0 кг

Третій етап. Обчислення зниження викидів при переході на альтернативне паливо. Візьмемо за базу природний газ і порівняємо з іншими.

Таблиця 3.5- Показники викидів при переході на альтернативне паливо

Паливо	Зниження CO ₂ (%)	Зниження NO _x (%)	Зниження SO _x (%)
Кам'яне вугілля	-69,6	-60	-250
Біомаса	100	40	50
RDF	15,8	20	50
Водень	100	60	100

Отже, можна стверджувати, що використання біомаси або водню дає максимальне зниження викидів CO₂, а також значно скорочує NO_x та SO_x. RDF забезпечує помірне зниження CO₂ та значне зниження SO_x порівняно з природним газом. Кам'яне вугілля, навпаки, значно збільшує всі викиди порівняно з природним газом. Водень, хоча й дорогий, має майже нульові викиди CO₂ та SO_x і низькі NO_x.

4. Охорона праці

Перехід металургійного підприємства від традиційних видів палива (природний газ, вугільний пил, мазут) до альтернативних (біомаса, RDF/SRF, синтетичні гази, водень, суміш природного газу з воднем, промислові відходи) не лише змінює технологічні параметри процесу випалення окатишів, але й суттєво трансформує систему охорони праці та промислової безпеки. Зміна типу палива означає зміну фізико-хімічних властивостей пального, характеру його транспортування, способів зберігання, пожежонебезпечності, токсичності продуктів горіння та вимог до експлуатації обладнання. Це, у свою чергу, формує нові ризики для працюючих та потребує перегляду організаційних, технічних і санітарно-гігієнічних заходів охорони праці.

Перехід підприємства від традиційних видів палива – таких як вугільний пил та мазут – до альтернативних (біомаса, RDF/SRF, синтетичні гази, водень або суміші природного газу з воднем) істотно впливає на структуру небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Це зумовлено зміною хімічного складу палива, параметрів горіння, умов його транспортування та зберігання. На практиці це означає, що значна частина ризиків, характерних для традиційних палив, знижується або повністю усувається, а нові ризики, які з'являються під час використання альтернативних палив, є більш контрольованими та піддаються ефективному технічному управлінню.

Традиційні види палива, що застосовуються на підприємствах із випалення залізорудних окатишів, характеризуються високим вмістом шкідливих компонентів, які у процесі горіння переходять у газову фазу. Зокрема, під час спалювання вугільного пилу та мазуту утворюються значні концентрації оксидів сірки (SO_2), оксидів азоту (NO_x), твердих частинок (попіл, зола, сажа), а також канцерогенних ароматичних вуглеводнів, таких як бенз(а)пірен. У робочих зонах паливоприготувальних цехів та на ділянках обслуговування випалювальних машин це створює стійкий фон загазованості,

що перевищує гігієнічні нормативи, особливо у періоди пікових навантажень печей. Працівники регулярно піддаються впливу продуктів неповного згоряння мазуту, нафтопродуктів та вугілля, що призводить до підвищення ризику професійних бронхолегеневих захворювань, алергічних реакцій та хронічних отруєнь.

У випадку переходу на альтернативні види палива спостерігається суттєве покращення гігієнічних умов праці. Наприклад, біомаса, RDF/SRF або синтез-газ характеризуються низьким вмістом сірки, важких металів і летких органічних сполук, що зменшує концентрацію токсичних продуктів горіння у виробничих приміщеннях у 2–4 рази. Значне зниження твердих частинок у димових газах (особливо у порівнянні з пилоподібним вугіллям) призводить до меншого запилення повітря робочої зони та зменшує загрозу розвитку пневмоконіозів.

Особливо суттєвий ефект спостерігається при використанні водню або суміші водню з природним газом ($H_2 + CH_4$). За рахунок повного відсутності вмісту сірки у водні рівень викидів SO_x знижується на 70–90%, а при оптимізації режимів горіння концентрації NO_x можуть зменшитись на 40–60%. Оскільки водень не утворює сажі та твердих частинок, робоча зона стає практично вільною від твердих аерозолів, які є основною причиною забруднення фільтрів, поверхонь обладнання та респіраторів працівників. Це сприяє зменшенню контактів персоналу з небезпечними продуктами горіння, покращує якість повітря у виробничих приміщеннях і приводить до зниження рівня гострих та хронічних професійних захворювань.

Загалом, впровадження альтернативного палива дозволяє створити більш безпечні та комфортні санітарно-гігієнічні умови на ділянках обслуговування печей, транспортування палива та газоочистки, що прямо впливає на зменшення захворюваності персоналу та полегшення умов їхньої праці.

Одним із найсерйозніших ризиків, притаманних роботі з вугільним пилом, є його вибухонебезпечність. Пилові частинки з високою дисперсністю

мають велику площу поверхні та при певній концентрації у повітрі формують вибухонебезпечні газопилові хмари. Навіть незначне джерело займання – електрична іскра, статичний розряд, нагріта поверхня – може спричинити миттєвий вибух, який супроводжується ударною хвилею, руйнуванням технологічних споруд і тяжкими травмами персоналу. На практиці це змушує підприємство утримувати складні аспіраційні системи, проводити регулярне прибирання пилу, монтувати вибухові клапани та використовувати іскробезпечне обладнання.

Відмова від вугільного пилу у процесі випалення окатишів і перехід на альтернативні види палива дають змогу істотно знизити ці ризики. Біомаса та RDF/SRF можуть містити певну кількість пилових фракцій, однак їх вибухонебезпечність є значно нижчою, а обсяги пилу – меншими в рази. Це дозволяє скоротити потребу у масштабних пилоприготувальних цехах, зменшити експлуатаційні витрати на аспірацію, знизити навантаження на працівників, відповідальних за очищення обладнання та усунення відкладень.

Застосування водню хоч і не позбавлене ризиків, проте небезпека у цьому випадку має інший характер і є більш передбачуваною та технічно контрольованою. На відміну від пилу, водень не утворює нашарувань, не накопичується на поверхнях, не створює вибухонебезпечних твердих відкладень, що потребують ручного очищення. Його основна небезпека полягає у можливості витоку, але вона ефективно контролюється за допомогою герметичних трубопроводів, датчиків концентрації водню, систем аварійного перекриття та вентиляції. Таким чином, кількість ризиків, пов'язаних із накопиченням горючих матеріалів у виробничих приміщеннях, фактично зводиться до мінімуму.

Таким чином, перехід на альтернативні види палива зменшує загальну вибухонебезпечність виробничого процесу, скорочує витрати на системи пилоподавлення та підвищує рівень безпеки працівників, що обслуговують печі та паливну інфраструктуру.

Перехід на альтернативні газові види палива (синтез-газ, природний газ, суміші природного газу з воднем або чистий водень) суттєво змінює характер цих ризиків. Газові палива не утворюють важких смолистих відкладень, які є типовими для мазуту, тому потреба у трудомістких і небезпечних роботах з очищення пальників практично зникає. Газ не потребує підігріву перед подачею, а отже, усувається фактор контакту з гарячими рідинами. Пальникові пристрої модернізованих печей із газовим живленням забезпечують повністю автоматизований режим роботи, а подача палива здійснюється через герметичні трубопроводи з дистанційним керуванням та системами аварійного перекриття.

У результаті кількість робіт, які персонал має виконувати безпосередньо біля гарячих ділянок печі, суттєво скорочується. Працівники менше контактують із високими температурами, токсичними парами або нестабільними полум'яними потоками, а більшість операцій переходить у режим автоматизованого контролю. Це суттєво знижує рівень виробничого ризику, зменшує навантаження на обслуговуючий персонал та підвищує загальний рівень охорони праці на підприємстві.

Перехід від традиційних видів палива до альтернативних зумовлює необхідність глибокої модернізації виробничої інфраструктури та перегляду вимог до організації робочих місць. Зміни стосуються не лише технологічного обладнання, але й систем вентиляції, очищення повітря, пожежної безпеки, а також структури управління виробничими процесами. Унаслідок впровадження газових, водневих чи біомасових палив змінюється характер шкідливих та небезпечних факторів, що вимагає адаптації виробничого середовища до нових умов. Водночас більшість модернізацій має позитивний вплив на рівень охорони праці, оскільки зменшує участь працівників у небезпечних операціях і переводить значну частину процесів у дистанційний або автоматизований режим.

Загалом, модернізація системи пожежної безпеки у зв'язку із заміною палива дозволяє значно зменшити кількість потенційних джерел займання,

покращити локалізацію аварійних ситуацій та забезпечити швидшу реакцію на загрозу виникнення пожежі.

Заміна традиційного палива на альтернативне неминуче супроводжується підвищеними вимогами до професійної підготовки персоналу. Працівники повинні адаптуватися до нових технологічних процесів, обладнання та алгоритмів дій, що зумовлює необхідність оновлення програм навчання.

По-перше, підприємство має розробити нові інструкції з охорони праці, що відображатимуть специфіку роботи з альтернативними видами палива. Такі інструкції повинні охоплювати особливості експлуатації нових пальників, автоматизованих систем подачі палива, газоаналізаторів та датчиків безпеки. По-друге, необхідно проводити повторний та позаплановий інструктаж з пожежної безпеки, особливо у випадку використання водню, який має специфічні властивості та потребує особливої уваги.

Працівники повинні набути нових компетенцій: знань про фізико-хімічні характеристики водню, синтез-газу, біомаси чи RDF, умінь працювати з високотемпературним обладнанням та сучасними системами автоматизації. Також важливим є формування навичок швидкого реагування на витoki палива, порушення режиму горіння або перегрів технологічних вузлів.

Використання альтернативних видів палива потребує запровадження значно більш розгалужених систем моніторингу та контролю. Для забезпечення стабільної та безпечної роботи обладнання виникає необхідність у впровадженні термографічного контролю печей, який дозволяє виявляти перегрівання, дефекти облицювання чи аномалії у роботі пальників. Крім того, обов'язковим стає використання газоаналізаторів, які контролюють концентрації водню, оксиду вуглецю, вуглекислого газу та оксидів азоту. Такі системи дають змогу виявити небезпеку ще до того, як вона стане критичною.

Автоматизовані системи пожежогасіння, цифрові платформи управління подачею палива, а також системи моніторингу тиску і температури в реальному часі забезпечують високу точність діагностики та швидкість

реагування на порушення. Це дозволяє запобігати аваріям, зменшити рівень виробничих ризиків та підвищити загальний рівень безпеки підприємства.

Загалом впровадження альтернативних видів палива має переважно позитивний вплив на систему охорони праці. Використання газових, біомасових або водневих палив сприяє значному зниженню рівня токсичних викидів, поліпшенню мікроклімату робочої зони та зменшенню запиленості. Усуваються ризики пилових вибухів і розливів гарячого мазуту, зменшується кількість ручних операцій біля печей, знижується теплове навантаження на працівників, а також серйозно скорочуються ризики опіків, пожеж та аварій.

Разом з тим, певні нові ризики все ж виникають. До них належать вибухонебезпечність водню, нестабільність складу RDF, ризик самозаймання біомаси та складність контролю параметрів синтез-газу. Проте всі ці ризики є цілком керованими за умови правильної технічної модернізації, якісної підготовки персоналу та впровадження сучасних систем автоматизації та захисту. Саме поєднання технологічних рішень і належної організації охорони праці створює умови для підвищення безпеки та ефективності виробництва в умовах переходу на альтернативні види палива.

Запровадження альтернативних видів палива у процес випалення залізорудних окатишів приводить до суттєвого покращення системи охорони праці. Основний ефект – зниження рівня шкідливих та небезпечних факторів, характерних для традиційних видів палива, а саме: токсичних викидів, запиленості, ризику пилових вибухів, опіків та пожеж, важких ручних операцій.

5. Економічна частина

Заміна традиційних видів палива альтернативними енергетичними ресурсами стає дедалі актуальнішою у зв'язку з вимогами до зниження впливу промислових процесів на навколишнє середовище, а також з необхідністю забезпечення сталого розвитку в умовах обмежених природних ресурсів. Одним із таких процесів є випалення залізорудних окатишів, яке є важливим етапом у виробництві заліза та сталі. Традиційно для цього процесу використовуються органічні види палива, такі як природний газ або вугілля. Однак у зв'язку зі зростаючими екологічними вимогами та економічною необхідністю зменшення витрат на енергоносії, виникає потреба у пошуку альтернативних джерел енергії.

Відповідно, однією з основних задач є оцінка економічної ефективності заміни традиційних видів палива на альтернативні, такі як біомаса, RDF (відновлювальний тверде паливо), водень та вторинні гази. Оцінка має на меті не тільки визначення собівартості використання кожного виду палива, а й аналіз можливих екологічних і технологічних переваг та недоліків, які можуть виникнути при їх впровадженні.

Вихідні дані

1. Потреба на випалення: $150 \text{ ГДж} = 150\,000 \text{ МДж}$ на 1 т окатишів.
2. Теплотворні показники палива:
 - Природний газ – $35,8 \text{ МДж/м}^3$.
 - Біомаса (суха) – $=15 \text{ МДж/кг}$ (середнє значення 14–18).
 - RDF – 22 МДж/кг .
 - Водень – $=120 \text{ МДж/кг}$.
 - Вторинні (побічні) гази – для розрахунку візьмемо 5 МДж/м^3 (середня оцінка між 3–10).
3. Ціни:
 - Природний газ = 40 грн/м^3 .
 - Біомаса (середня) = $90 \text{ \$/т}$.

- RDF = 50 \$/т.
 - Вторинні гази – фактично низька маржинальна вартість, візьмемо умовно 2 \$/1000 м³ (витрати на збір/транспортування/обробку), тобто 0,08 грн/м³ при курсі.
 - Водень – 3000 \$/т.
4. Курс для перерахунку \$ - грн: 40 грн / 1 \$ (припущення для розрахунків – в роботі вкажемо, що це умовна ставка; ви можете змінити під реальний курс).
5. Додаткові націнки/витрати (щоб відобразити зберігання, підготовку, транспортування, обробку і т.д.):
- Природний газ: 5% надбавка (мережеві/транспортні платежі, втрати).
 - Біомаса: 20% надбавка (сушка, подрібнення, зберігання, логістика).
 - RDF: 15% надбавка (підготовка, просіювання, сортування/фільтрація, додаткові очисні заходи).
 - Вторинні гази: 20% надбавка (витрати на збір/компресію/очищення).
 - Водень: 25% надбавка (компресія/зберігання/безпека – високі капвкладення в інфраструктуру).

Етап 1 – Розрахунок необхідної маси/об'єму палива на 150 ГДж

1. Природний газ

Теплотворність = 35,8 МДж/м³.

Потрібний об'єм $m_{gas} = 150000 \text{ МДж} / 35.8 \text{ МДж/м}^3 = 4\,190,503 \text{ м}^3$ - округлюємо до 4 190,50 м³.

2. Біомаса

Теплотворність = 15 МДж/кг.

$m_{bio} = 150000 / 15 = 10\,000 \text{ кг} = 10,0 \text{ т.}$

3. RDF

Теплотворність = 22 МДж/кг.

$$m_{rdf} = 150000 / 22 = 6\,818,18 \text{ кг} = 6,818 \text{ т.}$$

4. Водень

$$\text{Теплотворність} = 120 \text{ МДж/кг.}$$

$$m_{H_2} = 150000 / 120 = 1\,250 \text{ кг} = 1,25 \text{ т.}$$

5. Вторинні газы (умовно 5 МДж/м³)

$$m_{sg} = 150000 / 5 = 30\,000 \text{ м}^3.$$

Етап 2 – Перерахунок вартості палива. Переводимо ціни у грн (курс 40 грн/\$):

$$1. \text{ Біомаса: } 90 \text{ \$/т} - 90 \times 40 = 3\,600 \text{ грн/т.}$$

$$2. \text{ RDF: } 50 \text{ \$/т} - 50 \times 40 = 2\,000 \text{ грн/т.}$$

$$3. \text{ Водень: } 3000 \text{ \$/т} - 3000 \times 40 = 120\,000 \text{ грн/т (тобто } 3 \text{ \$/кг} - 3 \times 40 = 120 \text{ грн/кг; для } 1\,250 \text{ кг це } 150000 \text{ грн).}$$

$$4. \text{ Вторинні газы: } 2 \text{ \$ / } 1000 \text{ м}^3 - 2 \text{ \$} = 80 \text{ грн / } 1000 \text{ м}^3 - 0,08 \text{ грн/м}^3.$$

Тепер обчислюємо базову вартість пального на 1 т окатишів (перед надбавками):

1. Чисто газ:

$$1. \text{ Об'єм: } 4\,190,50 \text{ м}^3.$$

$$2. \text{ Ціна: } 40 \text{ грн/м}^3.$$

$$3. \text{ Базова вартість} = 4\,190,50 \times 40 = 167\,620 \text{ грн.}$$

$$4. \text{ Додаємо націнку (мережа/витрати) 5\%: } 167\,620 \times 1,05 = 176\,001$$

грн.

2. Чисто біомаса:

$$1. \text{ Маса: } 10,0 \text{ т.}$$

$$2. \text{ Ціна: } 3\,600 \text{ грн/т.}$$

$$3. \text{ Базова вартість} = 10,0 \times 3\,600 = 36\,000 \text{ грн.}$$

$$4. \text{ Додаємо націнку (сушка/логістика) 20\%: } 36\,000 \times 1,20 = 43\,200$$

грн.

3. Суміш 40% газ / 60% біомаса:

$$1. \text{ Енергія газу} = 0,4 \times 150 \text{ ГДж} = 60 \text{ ГДж} = 60\,000 \text{ МДж.}$$

$$2. \text{ Об'єм газу} = 60000 / 35,8 = 1\,676,54 \text{ м}^3.$$

3. Базова вартість газу = $1\,676,54 \times 40 = 67\,061,6$ грн. Після 5% = 70 414 грн.
4. Енергія біомаси = $0,6 \times 150 \text{ ГДж} = 90 \text{ ГДж} = 90\,000 \text{ МДж}$.
5. Маса біомаси = $90000 / 15 = 6\,000 \text{ кг} = 6,0 \text{ т}$.
6. Базова вартість біомаси = $6 \times 3600 = 21\,600$ грн. Після 20% = 25 920 грн.
7. Разом (після націнок) = $70\,414 + 25\,920 = 96\,334$ грн (округлюємо до 96334 грн).
4. RDF:
 1. Маса: 6,818 т.
 2. Ціна: 2 000 грн/т.
 3. Базова вартість = $6,818 \times 2\,000 = 13\,636$ грн.
 4. +15% на підготовку/очищення = 15 682 грн.
 5. Вторинні газы:
 1. Об'єм: 30 000 м³.
 2. Ціна (умовна) = 0,08 грн/м³ - базова = $30\,000 \times 0,08 = 2\,400$ грн.
 3. +20% (збір/очищення) = 2 880 грн.
 6. Водень:
 1. Маса: 1 250 кг = 1,25 т.
 2. Ціна: 3 000 \$/т - 120 000 грн/т - за 1,25 т = 150 000 грн.
 3. +25% (компресія/зберігання/безпека) = 187 500 грн.

Таблиця 5.1 – Порівняння вартості палива на 1 т окатишів (після націнок)

Варіант палива	Потреба (м ³ або т)	Базова вартість (грн)	Надбавка (%)	Вартість з урахуванням націнки (грн)
Природний газ (чисто)	4190,50 м ³	167620	5%	176001
Біомаса (чисто)	10,00 т	36 000	20%	43200

Газ 40% / Біо 60% (по енергії)	газ 1 676,5 м ³ + біо 6,0 т	газ 67 062 + біо 21 600 = 88 662	газ 5% / біо 20%	96 334
RDF (чисто)	6,818 т	13 636	15%	15682
Вторинні гази (умовно)	30 000 м ³	2400	20%	2880
Водень (чисто)	1,25 т	150000	25%	187 500

Найекономічніший короткостроковий варіант (за ціною палива) – це вторинні гази (якщо їх можна ефективно збирати і стабілізувати) або RDF як відносно дешеве тверде паливо. Однак вони вимагають витрат на підготовку/очищення і можуть генерувати додаткові екологічні витрати. Найкращий компроміс між ціною, якістю та можливістю впровадження – суміш 40% газ / 60% біомаса. Вартість цього варіанту складає 96,334 грн/т окатишів. Технологічно це більш реалістичний шлях переходу: зберігається частина газової інфраструктури для стабільності процесу, а біомаса дає великий економічний і екологічний ефект

ВИСНОВКИ

У результаті проведеного дослідження визначено, що процес випалення залізорудних окатишів є однією з найбільш енергоємних і технологічно складних стадій виробництва окатишів. Саме на цій стадії формується міцність, структура й фізико-хімічні властивості кінцевого продукту, тому від оптимізації режимів випалення та вибору типу палива залежить як якість продукції, так і загальна економічна ефективність підприємства. Проведений аналіз сучасних джерел інформації дозволив узагальнити підходи до організації процесу випалення окатишів і з'ясувати, що традиційно в металургійній галузі домінують такі види палива, як природний газ і кам'яне вугілля [32]. Вони характеризуються стабільними теплотворними властивостями, проте мають істотні недоліки - високі витрати, залежність від імпортного постачання та значне антропогенне навантаження на довкілля через великі обсяги викидів CO_2 , SO_2 та інших шкідливих сполук.

Результати дослідження підтвердили доцільність поступового переходу до використання альтернативних джерел енергії під час випалення окатишів. До перспективних видів належать біомаса, RDF (тверде відновлюване паливо), водень і вторинні гази. Зокрема, водень має найвищу теплотворну здатність - близько 120 МДж/кг, забезпечує найменші енерговитрати на випалення (140 ГДж/т) й не створює шкідливих викидів. Біомаса, хоча і має нижчу теплоту згоряння, є вуглецево нейтральною, а її застосування відповідає принципам сталого розвитку. RDF-паливо може ефективно використовуватися як заміник кам'яного вугілля за умови створення відповідної інфраструктури й контролю якості [31].

Порівняльна оцінка витрат на паливо показала, що за економічними показниками найбільш доступними є вторинні гази (9 дол./т.), біомаса (13 дол./т.) й RDF (14 дол./т.), тоді як водень нині залишається найдорожчим енергоносієм (40 дол./т.). Водночас доведено, що використання альтернативних джерел дозволяє істотно зменшити загальні виробничі

витрати в довгостроковій перспективі за рахунок пониження плати за викиди, оптимізації енергоємності та можливості утилізації побічних продуктів виробництва.

Впровадження альтернативних видів палива в процес випалення залізорудних окатишів здатне суттєво знизити викиди шкідливих газів, особливо CO_2 , що є важливим кроком у напрямку екологізації металургійного виробництва та реалізації завдань декарбонізації промисловості загалом. Комплексний підхід до вибору типу палива, врахування техніко-економічних та екологічних аспектів дозволить оптимізувати процес і забезпечити сталий розвиток металургійної галузі в умовах сучасних викликів екології та енергетики.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Allendorf M.D., Spear K.E. Thermodynamic analysis of silica refractory corrosion in glass-melting furnaces // *Journal of the Electrochemical Society*. - 2001. - Vol. 148. - P. 59-67.
2. Bandyopadhyay R., Gupta S., Lindblom B., Jonsson S. Effect of coal ash characteristics on ash deposition in rotary kilns // *Proceedings of the 4th International Conference on Process Development in Iron and Steelmaking (SCANMET IV)*. - Swerea Mefos, Luleå, Sweden, 10-13 June 2012.
3. Benson S.A., Erickson T.A., Jensen R.R., Laumb J.D. Transformations model for predicting size and composition of ash during coal combustion // *Fuel Chemistry Division Preprints*. - 2002. - Vol. 47. - P. 796.
4. Benson S.A., Hurley J.P., Zygarlicke C.J., Steadman E.N., Erickson T.A. Predicting ash behavior in utility boilers // *Energy & Fuels*. - 1993. - Vol. 7. - P. 746-754.
5. Blott S.J., Pye K. Particle shape: a review and new methods of characterization and classification // *Sedimentology*. - 2008. - Vol. 55, No. 1. - P. 31-63.
6. Boström D., Skoglund N., Grimm A., Boman C., Öhman M., Broström M., Backman R. Ash transformation chemistry during combustion of biomass // *Energy & Fuels*. - 2011. - Vol. 26. - P. 85-93.
7. Bryers R.W. Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surfaces due to impurities in steam-raising fuels // *Progress in Energy and Combustion Science*. - 1996. - Vol. 22. - P. 29-120.
8. Carlborg M., Weiland F., Ma C., Backman R., Landälv I., Wiinikka H. Exposure of refractory materials during high-temperature gasification of woody biomass and peat mixture // *Journal of the European Ceramic Society*. - 2018. - Vol. 38. - P. 777-787.

9. Carlsson P., Ma C., Molinder R., Weiland F., Wiinikka H., Öhman M., Öhrman O. Slag formation during oxygen-blown entrained-flow gasification of stem wood // *Energy & Fuels*. - 2014. - Vol. 28. - P. 6941-6952.
10. Choi S., Kruger C.H. Modeling coal particle behavior under simultaneous devolatilization and combustion // *Combustion and Flame*. - 1985. - Vol. 61, No. 2. - P. 131-144.
11. De Moraes S.L., De Lima J.R.B., Ribeiro T.R. Iron Ore Pelletizing Process: An Overview // *IntechOpen: Iron Ores and Iron Oxide Materials*. - London, UK, 2018.
12. Forsmo S. Influence of Green Pellet Properties on Pelletizing of Magnetite Iron Ore. - Luleå: Luleå Tekniska Universitet, 2007.
13. Forsmo S., Forsmo S.-E., Samskog P.-O., Björkman B. Mechanisms in oxidation and sintering of magnetite iron ore green pellets // *Powder Technology*. - 2008. - Vol. 183. - P. 247-259.
14. Forsmo S., Vuori J. The determination of porosity in iron ore green pellets by packing in silica sand // *Powder Technology*. - 2005. - Vol. 159. - P. 71-77.
15. Grotkjær T., Dam-Johansen K., Jensen A.D., Glarborg P. An experimental study of biomass ignition // *Fuel*. - 2003. - Vol. 82, No. 7. - P. 825-833.
16. Hack K., Jantzen T., Müller M., Yazhenskikh E., Wu G. A novel thermodynamic database for slag systems and refractory materials // *Proceedings of the 5th International Congress on the Science and Technology of Steelmaking*. - Dresden, Germany, 2012.
17. Johansson A.-C., Wiinikka H., Sandström L., Marklund M., Öhrman O., Narvesjö J. Characterization of pyrolysis products produced from different Nordic biomass types in a cyclone pilot plant // *Fuel Processing Technology*. - 2016. - Vol. 146. - P. 9-19.
18. Jonsson C. Deposit Formation in the Grate-Kiln Process. - Luleå: Luleå Tekniska Universitet, 2013.

19. Jonsson C.Y., Stjernberg J., Wiinikka H., Lindblom B., Boström D., Öhman M. Deposit formation in a grate-kiln plant for iron-ore pellet production. Part 1: Characterization of process gas particles // *Energy & Fuels*. - 2013. - Vol. 27. - P. 6159-6170.
20. Kieush L., et al. Production of iron ore pellets by utilization of sunflower husks // *Acta Metallurgica Slovaca*. - 2021. - Vol. 27, No. 4. - P. 167-171.
21. Kleinhans U., Wieland C., Frandsen F.J., Spliethoff H. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: progress and challenges // *Progress in Energy and Combustion Science*. - 2018. - Vol. 68. - P. 65-168.
22. Li J., Paul M.C., Younger P.L., Watson I., Hossain M., Welch S. Characterization of biomass combustion at high temperatures based on an upgraded single particle model // *Applied Energy*. - 2015. - Vol. 156. - P. 749-755.
23. Lindblom B., Fredriksson C., Jonsson S., Nordin L.-O., Wiinikka H. Pilot scale tests of different coals for the usage in the grate-kiln process at LKAB // *Proceedings of the International Conference on Applied Energy (ICAE)*. - Suzhou, China, 5-8 July 2012.
24. Ma C., Backman R., Öhman M. Thermochemical equilibrium study of slag formation during pressurized entrained-flow gasification of woody biomass // *Energy & Fuels*. - 2015. - Vol. 29. - P. 4399-4406.
25. Paraschiv L.S., Serban A., Paraschiv S. Calculation of combustion air required for burning solid fuels (coal, biomass, solid waste) and analysis of flue gas composition // *Energy Reports*. - 2020. - Vol. 6. - P. 36-45.
26. Potts R. Induration of taconite pellets using a grate kiln system // *Annual Meeting of the Minnesota Section, AIME*. - Minneapolis, USA, 1991.
27. Raask E. Mineral Impurities in Coal Combustion: Behavior, Problems, and Remedial Measures. - Leatherhead: Taylor & Francis, 1985.
28. Sefidari H. Mechanisms of Deposit Formation in the Grate-Kiln Process. - Luleå: Luleå Tekniska Universitet, 2018.

29. Sefidari H., Lindblom B., Wiinikka H., Nordin L.-O., Mouzon J., Bhuiyan I.U., Öhman M. Effect of disintegrated iron-ore pellet dust on deposit formation in a pilot-scale pulverized coal furnace. Part I // *Fuel Processing Technology*. - 2018. - Vol. 177. - P. 283-298.
30. Sefidari H., Lindblom B., Wiinikka H., Nordin L.-O., Lennartsson A., Mouzon J., Bhuiyan I.U., Öhman M. Effect of disintegrated iron-ore pellet dust on deposit formation. Part II // *Fuel Processing Technology*. - 2018. - Vol. 180. - P. 189-206.
31. Sefidari H., Ma C., Fredriksson C., Lindblom B., Wiinikka H., Nordin L., Wu G., Yazhenskikh E., Müller M., Öhman M. Effect of co-firing coal and woody biomass upon slagging tendency in iron-ore pelletizing grate-kiln plants // *Fuel Processing Technology*. - 2020. - Vol. 199. - 106254.
32. Sefidari H., Wiinikka H., Lindblom B., Nordin L., Wu G., Yazhenskikh E., Müller M., Ma C., Öhman M. Comparison of high-rank coals with respect to slagging tendency at the transfer-chute of iron-ore pelletizing plants // *Fuel Processing Technology*. - 2019. - Vol. 193. - P. 244-262.
33. Spliethoff H. Combustion systems for solid fossil fuels // *Power Generation from Solid Fuels*. - 2010. - P. 221-359.
34. Srinivasachar S., Senior C.L., Helble J., Moore J. A fundamental approach to the prediction of coal ash deposit formation in combustion systems // *Symposium on Combustion*. - 1992. - Vol. 24. - P. 1179-1187.
35. Stjernberg J., Ion J., Antti M.-L., Nordin L.-O., Lindblom B., Odén M. Extended studies of degradation mechanisms in the refractory lining of rotary kilns // *Journal of the European Ceramic Society*. - 2012. - Vol. 32. - P. 1519-1528.
36. Stjernberg J., Jonsson C.Y., Wiinikka H., Lindblom B., Boström D., Öhman M. Deposit formation in a grate-kiln plant for iron-ore pellet production. Part 2: Characterization of deposits // *Energy & Fuels*. - 2013. - Vol. 27. - P. 6171-6184.
37. Stjernberg J., Isaksson O., Ion J. The grate-kiln induration machine: history, advantages, and drawbacks // *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. - 2015. - Vol. 115. - P. 137-144.

38. Spliethoff H. Combustion systems for solid fossil fuels // *Power Generation from Solid Fuels*. - 2010. - P. 221-359.
39. Tao J., Guo-qiang H., Min G., Guang-hui L., Xiao-hui F., Li-shun Y. Forming mechanism of rings in rotary-kiln for oxidized pellet // *Journal of Iron and Steel Research International*. - 2009. - Vol. 16. - P. 292-297.
40. Toporov D.D. Mathematical modelling and model validations // *Combustion of Pulverised Coal in a Mixture of Oxygen and Recycled Flue Gas*. - Boston: Elsevier, 2014. - P. 51-97.
41. Wiinikka H., Carlsson P., Johansson A.-C., Gullberg M., Ylipää C., Lundgren M., Sandström L. Fast pyrolysis of stem wood in a pilot-scale cyclone reactor // *Energy & Fuels*. - 2015. - Vol. 29. - P. 3158-3167.
42. Wiinikka H., Johansson A.-C., Sandström L., Öhrman O. Fate of inorganic elements during fast pyrolysis of biomass in a cyclone reactor // *Fuel*. - 2017. - Vol. 203. - P. 537-547.
43. Wiinikka H., Sepman A., Ögren Y., Lindblom B., Nordin L.-O. Combustion evaluation of renewable fuels for iron-ore pellet induration // *Energy & Fuels*. - 2019. - Vol. 33. - P. 7819-7829.
44. Wornat M.J., Hurt R.H., Davis K.A., Yang N.Y. Single-particle combustion of two biomass chars // *Symposium (International) on Combustion*. - 1996. - Elsevier.
45. Zhou H., Ma W., Zhang J., Xu Y., Zhao M. Ash deposition behavior under coal and wood co-firing conditions in a 300 kW downfired furnace // *Journal of the Energy Institute*. - 2018. - Vol. 91. - P. 743-755.