

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ІМ. Ю.М.ПОТЕБНИ

Металургія

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проект

Друкарі (магістрівський)

(рівень вищої освіти)

на тему Використання технології вугання гарячих відновлювальних газів для виробництва електроенергії та вугню.

Виконав: студент 11 курсу, групи Р.1360-мсі-3
спеціальності 136 Металургія
(код і назва спеціальності)

освітньої програми Металургія чорних металів
(код і назва освітньої програми)

спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

Бедушка Віадислав Володимирович
(ініціали та прізвище)

Керівник доц., к.т.н. Кириченко О.Г.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц., к.т.н. Несіренко Т.М.
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2021

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра металургії
Рівень вищої освіти другий (магістрський)
Спеціальність 136 Металургія
(код та назва)
Освітня програма Металургія чорних металів
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри [підпис]
« 25 » серпня 20 21 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Басушка Володимир Володимирович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Використання технології буріння глибоких відновлювальних газів для буршмацельної виробництва газу

керівник роботи доц. к.т.н. Киріченко Олексій Іванович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 30 » 06 20 21 року № 975-С

2 Строк подання студентом роботи 30. 11. 20 21 р.

3 Вихідні дані до роботи Російськими процесів буріння глибоких відновних газів в останню піс. Використання дано технології буріння ПАТ "Научно-технічна компанія "Тектор" виробства, РСТУ, ТУ.

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Розділ 1. Розділ 2. Розділ 3. Розділ 4. Висновки. Список використаних джерел.

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) Розділ 1, розділ 2, розділ 3, розділ 4 - та креслення

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1	доц. Кириченко О.П.		
Розділ 2	доц. Кириченко О.П.		
Розділ 3	доц. Кириченко О.П.		
Розділ 4	доц. Кириченко О.П.		

7 Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, Реферат	30.06.21-31.08.21	
2	Розділ 1	01.09.21-20.09.21	
3	Розділ 2	21.09.21-15.10.21	
4	Розділ 3	16.10.21-30.11.21	
5	Розділ 4, висновки	01.11.21-15.11.21	
6	Графічна частина	16.11.21-30.11.21	

Студент Бордученко І.В.
 (підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проекту) Кириченко О.П.
 (підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер Р.М. Роща
 (підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Розрахунково-пояснювальна записка: 87 с., 15 табл., 11 рис., 33 джерела

ГАРЯЧІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ГАЗИ, ДОМЕННА ПІЧ, ПРИРОДНИЙ ГАЗ, КОКС, КОНВЕРСІЯ, ГОРН, ШАХТА, ПРІФУРМЕННИЙ РЕАКТОР-ГАЗИФІКАТОРИ, ПАЛЬНИК, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ.

Тема кваліфікаційної роботи: Використання технології вдування гарячих відновлювальних газів для вдосконалення виробництва чавуну.

Мета роботи – розробка з урахуванням вже наявних технологій найбільш перспективного і економічно вигідного способу вдування гарячих відновних газів в доменну піч.

У **розділі 1** представлений літературний огляд питання вдування гарячих відновних газів; аналіз різних способів одержання гарячих відновлювальних газів та оцінки їх ефективності.

У **розділі 2** представлений розрахунок показників доменної плавки з метою вибору оптимального складу і кількості гарячого відновного газу, який подається у піч.

У **розділі 3** наведено результати визначення оптимальної витрати гарячих відновлювальних газів у технологічних умовах України.

У **розділі 4** проведено дослідження процесу кисневої конверсії природного газу для умов доменної печі комбінату "Запоріжсталь"; представлена технічна характеристика промислової установки по конверсії природного газу; проведений розрахунок економічної ефективності застосування гарячих відновлювальних газів з температурою 1050 °С на доменній печі № 3 металургійного комбінату "Запоріжсталь".

Запропонована технологія рекомендується для дослідно-промислових випробувань в доменних цехах України.

АНОТАЦІЯ

Бадулка В.В. Використання технології вдування гарячих відновлювальних газів для вдосконалення виробництва чавуну.

Кваліфікаційна випускна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 136 – Металургія, науковий керівник О.Г.Кириченко. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М.Потебні, кафедра металургії, 2021.

У роботі ставиться завдання розробити з урахуванням вже наявних технологій найбільш перспективного і економічно вигідного способу вдування гарячих відновних газів в доменну піч.

Представлений літературний огляд питання вдування гарячих відновних газів; аналіз різних способів одержання гарячих відновлювальних газів та оцінки їх ефективності. розрахунок показників доменної плавки з метою вибору оптимального складу і кількості гарячого відновного газу, який подається у піч

Наведено результати визначення оптимальної витрати гарячих відновлювальних газів у технологічних умовах України. Проведено дослідження процесу кисневої конверсії природного газу для умов доменної печі комбінату "Запоріжсталь"; представлена технічна характеристика промислової установки по конверсії природного газу; проведений розрахунок економічної ефективності застосування гарячих відновлювальних газів з температурою 1050 °с на доменній печі № 3 металургійного комбінату "Запоріжсталь".

Ключові слова: ГАРЯЧІ ВІДНОВЛЮВАЛЬНІ ГАЗИ, ДОМЕННА ПІЧ, ПРИРОДНИЙ ГАЗ, КОКС, КОНВЕРСІЯ, ГОРН, ШАХТА, ПРІФУРМЕННИЙ РЕАКТОР-ГАЗИФІКАТОРИ, ПАЛЬНИК, ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ.

АННОТАЦИЯ

Бадулка В.В. Использование технологии вдувания горячих восстановительных газов для усовершенствования производства чугуна.

Квалификационная выпускная работа по получению степени высшего образования магистра по специальности 136 – Metallurgy, научный руководитель А.Г.Кириченко. Запорожский Национальный университет. Инженерный учебно-научный институт им. Ю.М.Потебни, кафедра металлургии, 2021.

В работе ставится задача разработать с учетом уже имеющихся технологий наиболее перспективного и экономически выгодного способа вдувания горячих восстановительных газов в доменную печь.

Представлен литературный обзор вопроса вдувания горячих восстановительных газов; анализ различных способов получения горячих восстановительных газов и оценку их эффективности; расчет показателей доменной плавки с целью выбора оптимального состава и количества горячего восстановительного газа, подаваемого в печь.

Приведены результаты определения оптимального расхода горячих восстановительных газов в технологических условиях Украины. Проведены исследования процесса кислородной конверсии природного газа для условий доменной печи комбината "Запорожсталь"; представлена техническая характеристика промышленной установки по конверсии природного газа; произведен расчет экономической эффективности применения горячих восстановительных газов с температурой 1050 °C на доменной печи № 3 металлургического комбината "Запорожсталь".

Ключевые слова: ГОРЯЧИЕ ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ ГАЗЫ, ДОМЕННАЯ ПЕЧЬ, ПРИРОДНЫЙ ГАЗ, КОКС, КОНВЕРСИЯ, ГОРН, ШАХТА, ПРИФУРМЕННЫЙ РЕАКТОР-ГАЗИФИКАТОР, ГОРЖНИК, ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ

ANNOTATION

Badulka V.V. Use of hot reducing gas injection technology to improve pig iron production. Qualifying final work on obtaining a master's degree in specialty 136 - Metallurgy, scientific supervisor A.G. Kirichenko. Zaporizhzhya National University. Engineering Research Institute, Department of Metallurgy, 2021.

In this work, the task is to develop, taking into account the existing technologies, the most promising and economically profitable method for injecting hot reducing gases into a blast furnace.

A literary review of the issue of injection of hot reducing gases is presented; analysis of various methods of obtaining hot reducing gases and assessment of their effectiveness. Calculation of indicators of blast-furnace smelting in order to select the optimal composition and amount of hot reducing gas supplied to the furnace.

The results of determining the optimal flow rate of hot reducing gases in the technological conditions of Ukraine are presented. Research has been carried out on the process of oxygen conversion of natural gas for the conditions of a blast furnace at the Zaporizhstal plant; the technical characteristics of an industrial plant for the conversion of natural gas are presented; the calculation of the economic efficiency of using hot reducing gases with a temperature of 1050 °C at blast furnace № 3 of the metallurgical plant "Zaporizhstal" was made.

Key words: HOT REDUCING GASES, BLAST-FURNACE FURNACE, NATURAL GAS, COKE, CONVERSION, MINES, MINES, PRIME REACTOR-GASIFIERS, MINER, TECHNICAL AND ECONOMIC INDICATORS

ЗМІСТ

Загальна характеристика роботи	9
Вступ	13
1. Літературний огляд питання вдування гарячих відновних газів	18
1.1 Історичний аналіз різних способів одержання гарячих відновлювальних газів та оцінки їх ефективності	18
1.2 Аналітичний огляд способів вдування гарячих відновних газів різного складу у доменну піч	31
2 Розрахунок показників доменної плавки з метою вибору оптимального складу і кількості гарячого відновного газу, який подається у піч	54
3. Визначення оптимальної витрати гарячих відновлювальних газів у технологічних умовах України	63
4 Організаційно-економічні розрахунки	70
4.1 Дослідження процесу кисневої конверсії природного газу для умов доменної печі комбінату "Запоріжсталь"	72
4.2 технічна характеристика промислової установки по конверсії природного газу	76
4.3 Розрахунок економічної ефективності застосування гарячих відновлювальних газів з температурою 1050 °С на доменній печі № 3 металургійного комбінату "Запоріжсталь"	78
Висновки	82
Список використаних джерел	85

Загальна характеристика роботи

Актуальність проблеми. Серед глобальних викликів, з якими зіткнулося людство наприкінці ХХ – на початку ХХІ століття, значний вплив на зміну клімату та ефективність виробництва надали викиди парникових газів. За останні 20 років у всепланетному масштабі ці викиди практично подвоїлися. З метою їх зменшення та забезпечення сталого розвитку та підвищення ефективності виробництв, як відомо, прийнято низку міжнародних документів: Рамкова конвенція ООН про зміну клімату (1992 р.); Кіотський протокол до рамкової конвенції ООН про зміну клімату, що включає кількісні зобов'язання розвинених країн щодо зниження викидів парникових газів за період 2008-2012 р.р. (1997 р.) та Паризька угода щодо забезпечення збереження клімату на період до 2030 р.

Досягнення цих цілей за нинішнього вектора країни на індустріалізацію – завдання непросте, але цілком вирішуване. Один із способів зменшення викидів парникових газів, нині – частково забутий, але, як і раніше, перспективний і високоефективний. Йдеться про технологію ГВГ (гарячі відновлювальні гази) у чорній металургії.

Використання гарячих відновлювальних газів знайшло широке поширення в світовій практиці доменного виробництва. Всі доменні печі України, виплавляють в даний час чавун, працюють з вдуванням сирого природного газу в кількості 80-140 м³/т чавуну, що дозволяє економити 50-80 кг коксу/тонну чавуну і в деяких випадках отримати помітне підвищення продуктивності.

Подальше збільшення витрати природного газу лімітується цілим рядом факторів, основним з яких є значне зниження температурного рівня горна. Теоретична температура горіння холодного метану, що є переважаючим компонентом природного газу, в СО і Н₂, при нагріванні дуття до 1200 °С і вологості його 2%, складає всього 770 °С, в той час як для вуглецю коксу, що надходить в зону горіння з температурою близько 1500 °С, вона досягає при тих же параметрах дуття 2300 °С. Настільки велика різниця пояснюється, крім високої температури нагріву коксу в печі, ще двома обставинами:

- теплота згоряння вуглецю метану в СО в 3,3 рази менше, ніж теплота згоряння вуглецю коксу (внаслідок великої витрати тепла на розкладання метану);

- виділяється при горінні метану тепло розподіляється на значно більший обсяг газів, ніж при горінні вуглецю коксу (різниця в обсязі продуктів горіння становить 3,733 м³ на 1 кг вуглецю).

Мета роботи – розробка з урахуванням вже наявних технологій найбільш перспективного і економічно вигідного способу вдування гарячих відновних газів в доменну піч. За допомогою виконаних досліджень довести технічні показники і необхідність зміни технології доменної плавки, що гарантує стабільність якості та хімічного складу.

Завдання роботи – на основі фізико-хімічних досліджень, використання останніх досягнень металургійної науки, розробити технологічні передумови вдування гарячих відновних газів в доменну піч. Це дозволить в значній мірі покращити хід процесу та, в значній мірі, прогнозувати кінцевий хімічний склад чавуну.

Дана задача буде вирішуватися за рахунок сучасних засобів та методів аналізу та експериментальних підходів.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно було вирішити такі **завдання:**

1. Провести розрахунок показників доменної плавки з метою вибору оптимального складу і кількості гарячого відновного газу, який подається у піч;
2. Визначити оптимальну витрату ГВГ у технологічних умовах України
3. Дослідити процес кисневої конверсії природного газу для умов доменної печі комбінату "Запоріжсталь".

Об'єкт дослідження – технологічні показники доменної плавки з аналізом впливу вдування гарячих відновних газів в доменну піч.

Предмет дослідження: закономірності і механізми фізико-хімічних процесів технології вдування гарячих відновних газів на показники доменної плавки.

Методи досліджень: хімічний аналізи, мікроскопічний аналіз, фізичне моделювання процесів.

Наукова новизна:

1. Встановлено, що відновний газ вдувається безпосередньо в область протікання процесів непрямого відновлення; в нижчерозташованій частині печі, в більшості випадків найбільш напруженою в газодинамічному відношенні, кількість газів не зростає (навіть дещо скорочується завдяки зниженню відносної витрати коксу), що дозволяє підвищити продуктивність;

2. Доведено, що фізичне тепло гарячого відновного газу також вноситься безпосередньо в ту область печі, в якій при низькій витраті коксу і високій концентрації кисню в дутті, температури шихти і газу надмірно знижуються.

Практичне значення:

1. Визначено, що для оцінки показників роботи доменної печі при вдуванні гарячого відновного газу для умов доменної печі комбінату "Запоріжсталь" виконані розрахунки за методикою, використовуваної проектними організаціями СНД в якості базової.

2. Аналіз результатів розрахунків свідчить, що найбільшу ефективність від вдування продуктів конверсії природного газу можна отримати при вдуванні гарячого відновного газу в горн печі при оптимальному підборі параметрів комбінованого дуття (витрата природного газу - $200 \text{ м}^3/\text{т}$, температура дуття - $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ і вміст кисню в дутті 25%).

Апробація результатів роботи. Результати досліджень, включених в кваліфікаційну магістерську роботу, доповіли на: I Всеукраїнській науково-практичній конференції здобувачів вищої освіти, аспірантів та молодих вчених «Актуальні питання сталого науково-технічного та соціально-економічного розвитку регіонів України. (Запоріжжя, 2021); XIV університетській науково-практичній конференції студентів, аспірантів і молодих вчених «Молода наука-2021» (Запоріжжя, 2021); наукових семінарах кафедри металургії Запорізького національного університету.

Публікації

Основні результати роботи викладені в 2-х тезах конференцій.

Структура и об'єм роботи

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 33 найменувань, викладена на 87 сторінках машинописного тексту включаючи 11 рисунків, 15 таблиць.

ВСТУП

Вирішити питання підвищення температури дуття в існуючих умовах досить важко, тому що це пов'язано з потужністю повітрянагрівачів і стійкістю вогнетривів. Збагачення дуття киснем дало можливість довести витрата природного газу до 150-180 м³/т чавуну з отриманням економії коксу 30-40 кг/т чавуну. Однак при вмісті в комбінованому дуття кисню понад 30% технологічні умови плавки не дозволяють коригувати витрата природного газу в співвідношенні з киснем і нагріванням дуття в межах збереження теоретичної температури горіння на вихідному рівні - знижується стійкість і ускладнюється керованість ходом процесу.

Крім цього, збільшення витрати природного газу, що вдмухується в доменну піч, перешкоджає неповна його газифікація в окислювальних зонах у фурм: отвори для підведення природного газу розташовуються у верхній половині внутрішньої склянки фурми щоб уникнути заливання їх шлаком. Струмінь природного газу рухається вздовж верхнього краю фурми і, потрапляючи в доменну піч, відразу ж витісняється потоком дуття в відновну область, де розкладається на сажистий вуглець і водень. При цьому, чим вище витрата природного газу, тим більше його кількість сягає за межі окислювальної зони розкладення, і тим нижче коефіцієнт заміни коксу природним газом.

Подальше істотне скорочення витрат коксу вимагає нового підходу до підготовки добавок, що вдмухуються, а саме - отримання гарячого відновного газу, що складається в основному з CO і H₂, з обмеженим вмістом N₂ і окислювачів (CO₂ і H₂O) і незначним вмістом метану і сажистого вуглецю.

Зниження витрати коксу при вдування конвертованого природного газу викликається в основному двома причинами: по-перше, продукти конверсії вносять в доменну піч значну кількість фізичного тепла і, по-друге, збільшується загальна кількість газу-відновника і підвищується концентрація водню в горнових газах, в результаті чого ступінь прямого відновлення заліза зменшується. При цьому рекомендуються різні методи конверсії: повітряна, парова, вуглекислотна, піроліз з подальшою газифікацією сажі, електрокрекінг.

При вдуванні гарячого відновного газу в горн замість відповідної кількості нереформованого палива, прихід тепла в горн зменшується на величину теплоти неповного згоряння вуглеводнів і ентальпії витрачається на їх горіння дуття, але це зниження приходу тепла приблизно компенсується при досить низькому вмісті окислювачів в гарячому відновному газі його ентальпії. Перевага гарячого відновного газу полягає в тому, що він менше знижує теоретичну температуру горіння, ніж нереформоване паливо, в результаті чого його гранична витрата в перерахунку на вихідне паливо може бути вищим і внаслідок цього може бути досягнуто більше зниження ступеня прямого відновлення заліза, що, відповідно, знизить витрату коксу і підвищить продуктивність.

Перспективну оцінку всіх вигод від використання ГВГ представляють на прикладі рециклінгу доменного газу чорної металургії. При цьому пріоритетне значення у Паризькій угоді приділяється механізмам збільшення використання відновлюваних джерел енергії замість викопного палива та підвищення енергоефективності використання вторинних енергоресурсів.

Технологія ГВГ існує вже 25 років, але практично ніде не застосовувалася. Проте сьогодні її можна з повною відповідальністю віднести до технологій проривних, істинно інноваційних. Ось у чому її суть.

Доменний газ як вторинний енергоресурс давно отримав широке застосування у чорній металургії як паливо. Будучи низькокалорійним паливом (менше 1000 ккал/м³), він зазвичай використовується в суміші з коксовим або природним газом і застосовується для спалювання в різних металургійних агрегатах (в кауперах доменних печей, коксових батареях, печах прокатних цехів, котлах ТЕЦ-ПВЕС і ін).

Для отримання ГВГ використовується власний доменний газ у його рециркуляції. Після очищення доменного газу від CO₂ він перетворюється на відновлювальний газ із вмістом 50% (CO + H₂) та 50% N₂. Азот (N₂) при цьому виступає як теплоносії, що дозволяє істотно знизити витрату повітряного дуття (у складі якого близько 70% N₂), аж до повного виключення. Замість повітряного дуття, збагаченого киснем до 30% (близько 90 м³/т чавуну), використовується самостійно чистий кисень у кількості 100 – 110 м³/т чавуну. В результаті вдування газоподібного відновника

(CO + H₂) і чистого кисню різко скорочується витрата коксу, повітряного дуття, виключається з доменної плавки витрата природного газу, і, відповідно, підвищується продуктивність доменної печі.

Ще одна істотна перевага технології ГВГ – можливість її поєднання з технологією ПВП (пиловугільне паливо). Застосування ПВП без ГВГ не істотно впливає на зниження викидів CO₂, а енергоефективність ПВП виходить нижче за технологію ГВГ у п'ять разів. Впровадження технології відмивання CO₂ у ПВП забезпечує додаткове зниження викидів CO₂ на 30%. Крім того, замість доменного газу як паливо використовуватиметься відновлювальний газ, теплотворний вміст якого вищий у 2 рази порівняно з доменним газом. Тому доцільно використання обох технологій: ГВГ (самостійно) та ПВП у комплексі з відмиванням CO₂ із доменного газу.

Теоретично ще 1970-1980г.г. вченими-доменниками (Н.А. Рамм, В.Г. Воскобойников, Ю.І. Гохман, Б.Л. Жураковський, Ю.С. Юсфін) було визначено основні напрямки відмивання CO₂ з доменного газу та вдування гарячих відновлювальних газів (CO і H₂) у горн і шахту доменної печі. Це було у 1989-1990 роках. Тоді ж Міністерство чорної металургії провело промислове випробування цієї технології на НВО «Тулачермет» за участю ЦНДІчермет, Гіпромет, Гіпрогазоочищення та ін. інститутів та організацій.

Виконані тоді техніко-економічні розрахунки на конкретній доменній печі №2 ВАТ «Тулачермет» показали, що при реалізації технології ГВГ на новій технічній основі питома витрата коксу на виплавку чавуну знижується на 36-40%, витрата природного газу в доменній плавці повністю виключається повітряного дуття знижується на 65%, продуктивність доменної печі збільшується на 35-50%.

Незважаючи на недоліки тогочасного обладнання, дані результати були дуже хорошими: витрата коксу скоротилася на 58%, продуктивність доменної печі зросла на 46%, викиди шкідливих речовин в атмосферу знизилися вдвічі.

У період проведення дослідно-промислових робіт з ДВГ на ВАТ «Тулачермет» було виплавлено 200 тис. т. чавуну, при цьому витрата сухого кокса скіпового вдалося знизити з 606 кг/т до 360 кг/т чавуну. Але далі без держфінансування цей напрямок було занедбано, а обладнання демонтовано. Західні металургійні концер-

ни, такі як ARCELOR, CORUS, TISSEN, ведуть до цього дня розробки в цьому напрямку.

В даний час опрацьовано та усунуто всі технічні та технологічні недоліки, виявлені раніше при проведенні промислових випробувань. Змінено схему відмивання CO₂ з доменного газу, покращено схему завантаження шихтових матеріалів, створено колектив фахівців з реалізації технології ГВГ, здатний впровадити технологію ГВГ на будь-якій доменній печі в Україні та за кордоном.

Основні плюси застосування технології ГВГ: забезпечується зниження собівартості чавуну на 15 - 20%, скорочення викидів CO₂ на 40 - 50%. Питома енергоємність чавуну знижується на 40%, а конвертерної сталі – 35%, тобто, даний показник досягає рівня розвинених країн.

В силу низки політичних, технічних і фінансових факторів технологія ГВГ у світовій чорній металургії за останні 25 років практично ніде не застосовувалася. Таку енергозберігаючу технологію, безперечно, треба розвивати на російських металургійних заводах. І оскільки при її впровадженні вирішуються важливі народногосподарські завдання, то російські металурги мають право розраховувати на державну підтримку при реалізації таких програм.

Аналіз енергоефективності виробництва чорної металургії України показав, що найбільший енергетичний потенціал зниження викидів парникових газів є саме у доменному виробництві. Застосування енергетичних добавок при виробництві чавуну (природний газ, пиловугільне паливо, кисень та ін.), хоч і забезпечують підвищення енергоефективності, але все ж таки вони недостатні для забезпечення конкурентних умов виробництва чавуну.

Сьогодні картина у вітчизняній чорній металургії така: витрата коксу в середньому становить 410-420 кг/т чавуну, тоді як за кордоном: 340-360 кг/т чавуну. І тому сьогодні особливо потрібні нові, проривні енергозберігаючі технології, особливо для виробництва чавуну та конвертерної сталі.

Найкращі результати щодо економії енергоресурсів та зниження викидів CO₂ досягаються саме при реалізації енергозберігаючої технології ГВГ.

Капітальні вкладення у реалізацію технології ГВГ орієнтовно становлять близько 1 млрд. грн. Термін окупності капітальних вкладень орієнтовно оцінюється у 2-3 роки. При цьому вся сума капітальних вкладень йде на фінансування виготовлення вітчизняного обладнання для відмивання CO₂ із доменного газу та для модернізації доменної печі. На виготовлення цього обладнання (на машинобудівних заводах) витрачається майже 1,5 роки, а з урахуванням доставки, монтажу, пуско-налагодження 2 роки.

Важливо встановлювати металургійним комбінатом цільові показники зниження викидів CO₂ лише на рівні найкращих досягнутих технологій. Це створить умови для стимулювання реалізації енергозберігаючих технологій, а за використання енерговитратних технологій – застосовувати штрафні санкції за перевитрату енергоресурсів та підвищені викиди парникових газів.

1. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ПИТАННЯ ВДУВАННЯ ГАРЯЧИХ ВІДНОВНИХ ГАЗІВ

1.1 Історичний аналіз різних способів одержання гарячих відновлювальних газів та оцінки їх ефективності

Найважливішою перевагою гарячих відновлювальних газів є можливість використовувати їх у значно більшій кількості на 1 т чавуну, ніж будь-яких інших вуглеводневмісних компонентів комбінованого дуття. Виняток атмосферного повітря значно скорочує вміст азоту і підвищує вміст водню і окису вуглецю в газах, що формуються. Це дозволяє суттєво збільшити кількість кисню оксидів заліза, що віднімається газовим потоком, та знизити питому витрату вуглецю та тепла.

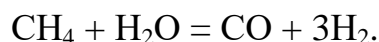
Продукти горіння, що утворюються у фурменому вогнищі на одиницю чавуну, у звичайних умовах обмежують форсування печі, при використанні гарячих відновлювальних газів і кисню помітно зменшуються; У цьому випадку при збереженні газодинамічних умов на колишньому рівні в доменну піч можна більше кисню в одиницю часу, досягти при цьому високої інтенсифікації процесу плавлення.

Загальна кількість фізичного тепла, що вноситься дуттям на 1 т чавуну, в порівнянні зі звичайними умовами може знизитися внаслідок холодного кисню замість гарячого дуття. Однак тепла від окисних реакцій при оптимальному відношенні витрати гарячого відновлювального газу та кисню фурму, що отримується від нагрівання газу, виявляється достатньо, щоб суттєво не охолодити вогнище горіння та підтримати температуру продуктів плавки на необхідному рівні.

Попередня реформація, що виключає витрати тепла на розкладання газу в зоні горіння, нагрівання поза доменною печі та можливість значного зниження вмісту азоту роблять гарячі відновлювальні гази найбільш підготовленим компонентом комбінованого дуття до участі у процесах відновлення, тиску та шлакоутворення у доменній печі. Зазначені причини забезпечують значну економію флюсу та збільшення продуктивності печі.

В даний час проведена певна робота з дослідження різних способів одержання гарячих відновлювальних газів та оцінки їх ефективності.

Один з них, парова конверсія природного газу, розроблений ВНДГазом. Конверсію природного газу проводять при температурі вище 900°C, коли CH₄ перетворюється на CO і H₂. Як окислювач вуглецю природного газу використовується пара, чому конверсія і отримала назву парової. Основною реакцією цього процесу є реакція окиснення метану



Крім цього, залежно від виду окислювача (повітря, вуглекислоти, суміші пари та вуглекислоти) конверсія може бути повітряною, вуглекислотною та паровуглекислотною. За відсутності чи нестачі окислювачів відбувається піроліз природного газу з утворенням сажі та водню CH₄=C+2H₂.

Для розгляду питання про зміну інтенсивності роботи печі та витрати коксу у зв'язку з вдуванням газів, отриманих зазначеними способами, виконані розрахунки щодо визначення щільності та в'язкості газів у печі. Якщо вміст (CO+H₂) у фурменому газі при вдуванні сирого природного газу та атмосферного дуття становить 32,0 %, то при використанні продуктів повітряної конверсії воно дорівнює 32,2%, при паровуглекислотній 33,3, при паровій 35,9 і при піролізі 37,7%. Щільності газових потоків у доменних печах, що працюють з вдуванням газу, отриманого методами повітряної та паровуглекислотної конверсії, та в доменних печах, що працюють на сирому природному газі, різняться всього на 0,6-1,11%. У той самий час щільності газових потоків, що утворюються під час використання продуктів парової конверсії і піролізу газу, проти щільністю газового потоку, що утворюється під час використання сирого газу, зменшуються на 6,7—9,1 і 6,8—22% відповідно. Величини в'язкості газів вищеперелічених типів і звичайних газів різняться між собою несуттєво.

На думку А. Н. Рамма, зміни щільності та в'язкості відновлювальних газів взаємнорівноважуються погіршенням газопроникності шихти через зниження витрати коксу. У першому наближенні пропонується прийняти, що інтенсивність плавки газу може бути збережена на початковому рівні.

Згідно з розрахунками [1], вдування конвертованих газів та продуктів піролізу при збереженні постійного перепаду тисків у печі сприяє збільшенню інтенсивності плавки. Зменшення витрати коксу, що відбувається при цьому, зменшує можливість підвищення інтенсивності плавки. Якщо прийняти питому витрату коксу при режимі роботи на сирому газі за 100%, то приповітряної конверсії він становить 96,2, при паровуглекислотній 95,2, при паровій 87,2 і при піролізі 49,6%. В результаті інтенсивність газу знижується при вдуванні конвертованих газів на 0,5-2%, і вищевикладені міркування А. Н. Рамма, очевидно, правильні. При вдуванні продуктів піролізу інтенсивність погіршується більш ніж 5% і за підрахунку її величини, очевидно, слід враховувати щільність і в'язкість газів.

У ДонНДІчерметі виконано порівняльні розрахунки про кількість тепла, що вноситься гарячим відновлювальним газом та сирим природним газом. При конвертуванні газу ззовні печі за методом повітряної конверсії з підігрівом до 1100-1300 °С в піч вноситиметься додатково тепла 633-796 ккал/м³ газу. При температурі дуття 1100°С температурі конвертованого газу 1200 °С орієнтовна економія коксу при заміні 1 м³ природного газу конвертованим складе 0,24 кг/м³.

В. Н. Андронов та ін. [2], враховуючи скорочення питомої витрати коксу, дійшли висновку, що продуктивність печі при вдуванні конвертованого газу може бути збільшена на 8,2%, а кількість продуктів піролізу на 10,5%.

При отриманні конвертованих газів у промисловому масштабі встановлено, що крім основного процесу окислення вуглецю метану, значний розвиток отримують побічні процеси, продуктами яких є сажа, вуглекислота і водяна пара. Оскільки на реакцію сажеутворення впливає гальмуючий вплив збагачення продуктів реакції воднем, то для збільшення його виходу застосований в якості каталізатора азотнокислий нікель.

Процеси парової, паровуглекислотної та вуглекислотної конверсії проводили в конвертерах-газонагрівачах, що працюють за регенеративним циклом. Як показав досвід роботи конверсійних установок, ці способи мають низку істотних недоліків [3]. Головний з них полягає у випаданні сажі на насадці газонагрівачів та в тракті руху газу. На насадці сажа з азотнокислим нікелем давала легкоплавкі евтектики, що

призводять до оплавлення насадки та збільшення опору руху газів у період нагрівання конвертерів на 0,4-11,6 ат. Осідаючи на більш холодних порівняно з трактом гарячого дуття поверхнях шиберів та їх кільцях, сажа порушувала своєчасне переведення конвертерів з режиму нагрівання на режим отримання газу. Крім того, в період нагрівання нікель частково окислювався, а в період отримання газу віддавав цей кисень, різко погіршуючи склад газу,

Ці та інші недоліки не дали можливості рекомендувати зазначені способи одержання газу для подальшого розповсюдження.

У період дослідної плавки на доменній печі № 3 «Азовсталь» у квітні 1965 р. (що проводиться за участю ДонНДІчермету) відновлювальний газ подавали в піч через індивідуальні керамічні фурми, розташовані в одній вертикальній площині з повітряними фурмами, але вище за них на 660 мм під кутом 30° до горизонту. При такому способі підведення відновлювальний газ недостатньо змішувався з основним потоком і йшов у піч вузьким периферійним кільцем. Якщо при звичайному режимі плавки з вдуванням холодного газу вміст водню в колошниковому газі по радіусу коливався в межах 5,5-7,5%, то при підведенні його через окремі фурми вміст водню біля стін печі досягло 13, а в центральній частині не перевищувало 4%. Незадовільне використання газового потоку призвело до перевитрати коксу.

У дослідних плавках 1966 на цій же печі [4] гарячий відновлювальний газ, сирий природний газ і повітря вводили через суміщений фурмовий прилад, в якому звичайні фурма і амбразура були замінені фурмою збільшених розмірів. Гарячий газ подавали трубкою, що проходить через водяну сорочку фурми. Зіставлення дослідних (А, Б) та базових (В, Г) періодів показує, що при вдуванні гарячих відновлювальних газів продуктивність печі підвищилася відповідно на 9,2 та 6,4%, а витрата коксу знизилася на 2,6 та 3,5% . Кількість гарячих відновлювальних газів у дослідні періоди А та Б становила 17—20 тис. м³/год, у період Б додавався ще сирий природний газ у кількості 5000 м³/год.

Характер зміни вмісту вуглекислоти та водню в колошниковому газі в базові та дослідні періоди був однаковим (рис. 1.1). Однак у дослідний період дещо вищим був максимальний вміст вуглекислоти. Абсолютний вміст водню переважно

визначалося витратами газу. Горн доменної печі в період досліджень працював нормально, про що свідчить звичайний вміст окису вуглецю в центральній частині горна (рис. 1.1). Температура з відривом 1,2—2,0 м від гирла фурми перебувала не більше 1400—1500 °С. Температура чавуну становила 1415-1465 °С, а шлаку 1460-1505 °С.

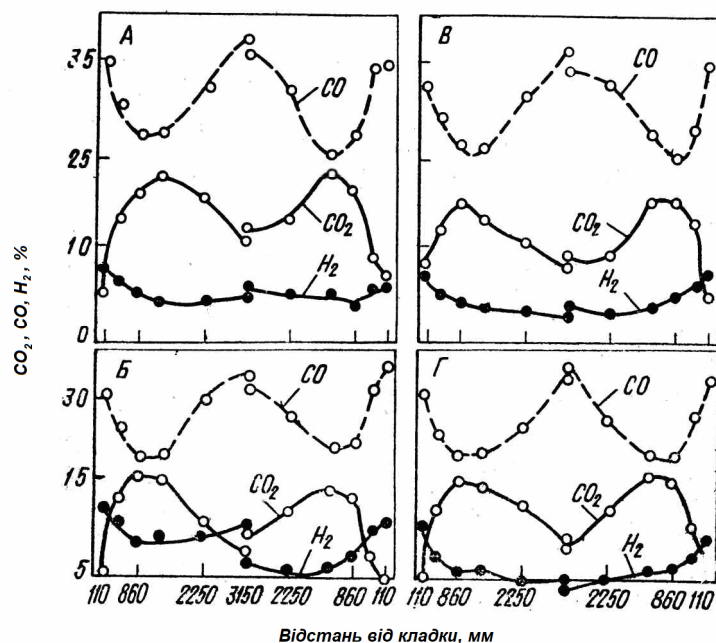


Рисунок 1.1 - Склад колошникового газу по діаметру доменної печі № 3 «Азовсталь» об'ємом 1300 м³ у дослідні періоди при вдуванні гарячих відновлювальних газів (А, Б) і в базові періоди (В, Г)

Як впливає з рис. 1.1, у дослідних періодах А та Б у порівнянні з базовими В і Г максимальний вміст вуглекислоти в зоні горіння зменшилося на 3-4%. У період А в порівнянні з періодом Б максимальне значення вмісту вуглекислоти наблизилося до гирла фурми, приблизно на 300 мм. Відповідно до зміни її розподілу раніше почало зростати і вміст окису вуглецю. Така зміна у складі горнового газу могла бути викликана або більш периферійним потоком газів, або інтенсивнішим змішуванням газу і дуття в фурмі. Судячи із складу колошникового газу, посилення периферійного потоку газів не відбулося.

Цілком ймовірно, що при вдуванні гарячих відновлювальних газів відбувається повніше змішування до окислювальної зони, що є однією з істотних причин кращого використання газового потоку печі. Ступінь прямого відновлення з

перших періодів зменшилася з 43,5 до 31,8%, а по-друге з 35,2 до 30,6%. У період А досягнуто (дуже високий рівень використання водню — 50,9%, що слід пояснити виключно рівною роботою печі та хорошим розподілом газу. У дослідному періоді Б рівень використання водню значно погіршився (29,4%), що, очевидно, викликано недостатньо. Так, зміна системи завантаження в наступний за досвідченим періодом Г у бік збільшення прямих подач призвела до підвищення ступеня використання водню до 39,8%.

Прихід тепла з вдуванням у дослідному періоді А на 11,5% менше, ніж у порівнюваному періоді В. Згідно з розрахунками, при цьому потрібна додаткова витрата вуглецю, що дорівнює приблизно 13,1 кг/т чавуну. Фактично витрата газифікованого вуглецю не підвищилася, а знизилася на 5,3 кг/т чавуну. Зменшення приходу тепла з вдуванням було компенсовано покращенням відновлювальної роботи газів та теплом гарячого відновлювального газу.

Газодинамічний режим у порівнювані та дослідні періоди значно відрізнявся. Якщо в першому випадку прийняти інтенсивність плавки колошниковим газом за одиницю, то в другому вона складе 1,05 і 1,04 відповідно для періодів А і Б. У дослідному періоді Б в піч вдалося подати 265 м³ гарячого відновного і 68,4 м³ сирого природного газу на 1 т чавуну, що в перерахунку на сирій природний газ становить 141 проти 115 м³/т чавуну в базовому періоді Г при одній і тій же теоретичній температурі 1932°C.

На Ново-Тульському металургійному заводі гарячі відновлювальні гази отримували методом паровуглекислотної конверсії природного газу за способом Гіпромезу та МІХМ. Окислення вуглеводнів природного газу поряд з парою тут досягалося впливом на них вуглекислоти колошникового газу. Основні недоліки, властиві встановленню з одержання гарячих відновлювальних газів на «Азовсталь», були притаманні й установці на Ново-Тульському металургійному заводі. Вона також не забезпечувала доменну піч гарячим відновлювальним газом ні за складом, ні за його стабільністю, ні за кількістю. Не виконувалося задана вимога не допускати кількість окислювачів (CO₂+H₂O) вище 3%. На завершальному етапі експериментів воно становило в середньому 6,4%, досягаючи окремих випадках

16% і більше.

Дослідження роботи доменної печі № 2 корисним об'ємом 930 м³ виконано співробітниками НТМЗ, ЦНДІчермету та його Тульської філії. Проведені роботи охоплюють три періоди дослідних плавок та один базовий, протягом якого вміст кисню у дутті становив до 30% [5]. У дослідних періодах застосування гарячих відновлювальних газів супроводжувалося подачею технологічного кисню.

Вдування відновлювального газу та кисню здійснювалося через спеціально сконструйовані для цих плавок газо-кисневі фурмові прилади. Із загальної кількості 16 повітряних приладів у періоді I на газокисневі замінено спочатку 4, а потім 8 комплектів. У періоді II проведена заміна 11 приладів, а через решту 5 фурм надходило атмосферне повітря. У періоді III піч працювала без атмосферного дуття, лише на відновлювальному газі та кисні, які подавалися через 11 газокисневих приладів. 5 повітряних приладів, що залишилися, не були замінені, оскільки газокисневі прилади не розміщувалися в їх габаритах. Фурми на цих приладах було закрито. Результати дослідних плавок наведено у табл. 1.1.

Продуктивність печі у періоди II та III була зниженою. У періоді II це пояснюється невідпрацьованістю процесу горіння у фурм, що призводило до масових їх прогарів, попаданням води в піч, значним простоям, що склало ~ 20% календарного часу. У період III це можна пояснити недостатньою кількістю газу-відновника через низьку продуктивність установки гарячих відновлювальних газів.

Незважаючи на зазначені недоліки, дослідні плавки з вдуванням гарячих відновлювальних газів та холодного технологічного кисню особливо у періоді III без вдування атмосферного повітря показали можливість досить гнучкого керування технологічним режимом, досягнення високих техніко-економічних показників роботи печі та надійної її експлуатації.

Газовий потік у печі, як і за звичайної технології, можна регулювати загальноприйнятими методами впливу «зверху»: зміною частки «прямих» подач у циклі системи завантаження, рівнем засипу, величиною коксової калоші. Так, наприклад, у різний час періоду III зміна співвідношення систем завантажень у циклі КРРК↓ і ККРР↓ склали 1:0; 3:4; 2:3; 0:1.

Таблиця 1.1 - Основні показники доменної плавки при вдуванні гарячих відновлювальних газів у доменну піч № 2 Ново-Тульського металургійного заводу в базовий (0) та дослідні (I—III) періоди

Показник	Період			
	0	I	II	III
Продуктивність печі (по рідкому чавуну), %	100,0	115,5	83,0	82,8
Витрата сухого коксу, кг/т чавуну	552,2	485,2	511,7	444,0
Частка агломерату в шихті, %	99,7	100,0	100,0	98,4
Вихід шлаку, кг/т чавуну	484,0	606,0	503,2	399,8
Витрата дугтя, м ³ /хв	1525	855	698	-
Надлишковий тиск дугтя, ат	1,06	1,14	1,11	-
Температура дугтя, °С	963	914	843	-
Витрата кисню, м ³ /т чавуну	214,7	221,5	220,0	271,0
Витрата відновлювального газу, м ³ /т чавуну	-	484,2	783,3	941,1
Температура відновлювального газу, °С	-	1126	1147	1203
Вміст у відновлювальному газі, %:				
CO ₂		1,14	1,19	2,02
H ₂ O		2,0	2,92	4,4
Витрата природного газу, м ³ /т чавуну	111,2	39,8	-	-
Склад колошникового газу, %:				
CO ₂	16,9	19,5	18,3	25,9
CO	31,2	35,5	38,7	46,4
H ₂	8,4	9,3	17,0	21,4
N ₂	43,8	35,7	26,0	6,4
Температура колошникового газу, °С	389	340	365	370
Надлишковий тиск газів під колошником, ат	0,11	0,12	0,12	0,11
Вміст у чавуні, %:				
Si	1,07	1,03	1,12	1,00
Mn	0,77	0,65	0,64	0,76
S	0,085	0,045	0,072	0,030
Температура чавуну, °С	1450	1426	1424	1473
Вміст у шлаку, %:				
CaO	44,65	44,0	43,73	45,89
SiO ₂	36,06	37,05	36,72	34,82
FeO	0,29	0,32	0,33	0,17
Температура шлаку, °С	Ні св.	1419	1370	1464
Теоретична температура горіння, °С	2300	2150	1912	1969
Ступінь використання, %:				
CO	35,0	35,4	32,1	35,9
H ₂	39,4	Ні св.	22,0	29,1
Ступінь відновлення, %:				
прямого, (r _d)	31,8	-	28,4	10,6
непрямого за рахунок CO (r _{ico})	42,8	-	47,5	56,2
непрямого за рахунок H ₂ (r _{h2})	25,4	-	30,1	33,2
Загальна витрата тепла, ккал/кг чавуну	2671,4	-	2733,1	2695,1

Розмір коксової калоші змінювався від 5,0 до 3,2 т. Використання цих методів

забезпечило нормальний розподіл матеріалів на колошнику. Піч працювала з дещо підвантаженими центрами нормально завантаженою периферією, при максимальному вмісті вуглекислоти на відстані 0,75 м від стін печі. Вміст вуглекислоти в колошниковому газі зростало за періодами (за винятком періоду II) за рахунок не тільки збільшення частки відновлювального газу та кисню, а й поліпшення ступеня використання окису вуглецю. До кінця плавки, коли основні параметри ведення печі в умовах, що створилися, наближалися до оптимальних, вміст вуглекислоти досягало $>28\%$, в окремих випадках 30% , а ступінь використання окису вуглецю склала 38% при середньому її значенні за період III $35,9\%$.

Гарячі відновлювальні гази та кисень вводилися в доменну піч через фурмові прилади конструкції ВНДІметмашу. Гарячий газ подавався через фурму так, як зазвичай надходить дуття, а кисень - за схемами, зазвичай прийнятими для вдування природного газу. Конструкція приладу забезпечила задовільну густину тазового тракту. Однак прилад виявився надмірно громіздким та незручним при заміні повітряних фурм. Без суттєвого вдосконалення він навряд чи може бути використаний надалі.

Низька стійкість газо-кисневих фурм у II періоді дослідних плавок значною мірою була викликана недосконалістю її конструкції. Дослідження, виконані ЦНДІчерметом на моделях, показали можливі шляхи вирішення цього питання. У III періоді використовувалися фурми зміненої конструкції. Прогар фурм зменшився, але залишався високим. В останні дні дослідчених плавок випробуваний ще один варіант. На таких фурмах прогарів не спостерігалось.

Проведені експерименти підтвердили переваги гарячих відновлювальних газів, що раніше передбачалися. Порівняємо глибину проникнення сирого природного газу в струмінь дуття і кисню в струмінь гарячих відновлювальних газів за умови збереження конструкції фурми та подачі гарячих відновлювальних газів трактом гарячого дуття, а кисню трактом природного газу.

Працюючи без атмосферного дуття кількість гарячих відновлювальних газів, що вводяться в одиницю часу, буде всього в 3—5 разів більше, ніж кисню, а кількість дуття, збагаченого киснем, найчастіше в 10—20 разів перевищує кількість

вдуваного сирого природного газу. Це означає, що за інших рівних умов швидкість струменя кисню може бути приблизно в 3-5 разів вище за швидкість природного газу, що входить, в струмінь дуття.

Відношення щільностей природного газу та дуття, збагаченого киснем, зазвичай близько до 0,6, а кисню та й гарячих відновлювальних газів 1,7-2,0, тобто. ставлення зростає у кілька разів. Таким чином, при вдуванні гарячих відновлювальних газів та кисню підвищенню далекобійності струменя сприятиме і швидкість, і щільність. В результаті глибина проникнення кисню в потік гарячих відновлювальних газів у порівнянні з глибиною проникнення сирого природного газу в струмінь дуття, збагаченого киснем, буде більшою в 5-8 разів.

Більш інтенсивному змішуванню гарячих відновлювальних газів та кисню сприяє і спосіб їхнього введення. При застосуванні сирого природного газу та дуття, збагаченого киснем, струмінь, що має відновлювальний характер, вводиться в струмінь, що має окислювальний характер. В результаті недостатнього змішування в порожнині фурми природний газ і продукти його розпаду утворюють своєрідну «бульбашку». Така «бульбашка», проскочивши через край окислювальної зони, потрапляє в газовий потік, де вже не може достатньо ефективно брати участь у відновлювальній роботі.

При застосуванні гарячих відновлювальних газів та технологічного кисню підведення окислювального та відновлювального струменів змінюються місцями. Значно менший за обсягом «міхур» кисню (якщо він тільки взагалі може виникнути в умовах) за межами зони горіння припиняє своє існування, оскільки потрапляє в відновлювальну атмосферу. Цілком можливо, що в області зустрічі струменя гарячого газу та кисню розвиватимуться вищі температури, ніж це відбувається у холодного газу та нагрітого дуття. Таке припущення припустимо, якщо врахувати, що в цьому випадку не витрачатиметься тепло на реформацію вуглеводнів, як це має місце під час вдування сирого природного газу.

Таким чином, «від застосування гарячих газів та кисню очікується істотного поліпшення змішування струменя до вогнища горіння порівняно з роботою доменної печі на дутті та природному тазі. Зазначена обставина має стати однією з

головних переваг цієї технології.

Експерименти, що розглядаються, дозволили також визначити умови, за яких доменна плавка при вдуванні гарячих відновлювальних газів і технологічного кисню буде економічно доцільною. З цією метою витрата коксу в базовому періоді приведена до умов дослідного періоду III за вмістом у чавуні кремнію, виходу шлаку та кількості фізичного тепла, що вноситься комбінованим вдуванням. Природний та доменний газів оцінені як «замикаюче» паливо, що витрачається в мінімально можливій кількості для покриття дефіциту.

Нині існує кілька теоретичних розробок, пов'язаних із вдуванням гарячих відновлювальних газів. Велика увага приділяється використанню колошникового газу у циркуляційному циклі з очищенням від CO_2 .

Згідно з розрахунками В. Г. Воскобойнікова та ін. при плавці без атмосферного дуття економія коксу досягає 26-28%, а збільшення продуктивності складає 23-29% в порівнянні з показниками, отриманими при плавці на дутті з 30% кисню та відповідному витраті природного газу. Ступінь прямого відновлення знижується до 6,8-9,5%. Розрахункові величини питомої витрати коксу не виходять за межі мінімальних, теоретично можливих в умовах плавки. Зменшення витрати тепла на 1 т чавуну знаходиться в межах 70-93%. Згідно з тепловим балансом, кокс економиться за рахунок скорочення витрати тепла на одиницю чавуну та часткової заміни вуглецю коксу, що згоряє біля фурм, окисом вуглецю, що вдмухується в піч.

Оцінено вплив кількості окислювачів у відновлювальному газі на витрату коксу. Кожен відсоток окислювачів у гарячому відновлювальному газі, що вдмухується, призводить до перевитрати коксу на 3,0%. Для розглянутої плавки на доменній печі № 2 Ново-Тулського металургійного заводу застосування безокислювального газу дало б додаткову економію порівняно з отриманою ще на 83 кг/т чавуну, тоді порівняно з періодом роботи на дутті з 30% O_2 загальна економія зростає б із 17 до 35%. Згідно з аналогічними розрахунковими даними, наведеними японськими дослідниками, вдування відновлювального газу, що містить 2,0% CO_2 та 3,7 H_2O , при 850°C еквівалентно вдування холодного природного газу.

У розрахунках В. Р. Воскобойнікова та інших [6] ступінь використання водню

прийнято обернено пропорційної змісту водню в фурменому газі. Прийнято, що зі збільшенням вмісту водню у фурменому газі в 2,4 рази зменшується в 1,35 раза.

Питанням ефективності доменної плавки без атмосферного дуття при вдуванні в горн колошникового газу, очищеного від вуглекислоти та технологічного кисню, присвячені розрахунки А. Н. Рамма та Я. Б. Карпиловського. Автори дійшли висновку, що під час роботи печі «на такому режимі економія коксу виходить у межах 20—30% при одночасному збільшенні продуктивності печі на 7—11%. При цьому допускається, що частка колошникових газів, що повертаються в піч після очищення від вуглекислоти або, коефіцієнт рециркуляції, може змінюватися в межах 80-95% при роботі на дуже багатій шихті і 70-85% при більш бідній шихті. Вказується, що економічні передумови для застосування такої технології є найбільш сприятливими при проплавленні дуже багатій шихти та високої вартості коксу. Звертається увага на особливість процесу, що полягає у різкій зміні багатьох параметрів плавки при порівняно невеликих коливаннях ступеня непрямого відновлення. Робота [7] є одним із фундаментальних досліджень у галузі аналізу застосування гарячих відновлювальних газів у доменній плавці.

Однак не все в розрахунках, що розглядаються, безперечно. Автори, наприклад, виходять з того, що ступеня використання CO та H₂ зі збільшенням їх витрати зменшуються:

	природний	Газ гарячий відновлювальний	
		Завод А	Завод Б
витрата газу, що вдувається, м ³ /т чавуну	89	765	919
Вміст CO+H ₂ у фурменому газі, %	51,8	90,6	84,3
Ступінь використання:			
окису вуглецю	0,445	0,385	0,380
водню	0,445	0,385	0,380

Припущення про погіршення η_{H_2} і η_{CO} додаванням кількості відновлювальних газів не збігається з даними багатьох інших досліджень.

Так, наприклад, експерименти на доменній печі № 2 Ново-Тулського металургійного заводу показали, що при збільшенні вмісту CO+H₂ у горнових газах до 94% η_{CO} порівняно з роботою на сирому природному газі не знизилася, а підвищилася з 0,350 до 0,359 [8]. При вдуванні 232 м³ гарячих відновлювальних

газів на 1 т чавуну на заводі «Азовсталь» η_{H_2} зросла з 35,5 до 60,9 [9].

У схемі роботи печі за новою технологією передбачено поступове накопичення азоту зі збільшенням витрати відновлювальних газів. Це не дає можливості використовувати одну з основних переваг гарячих відновлювальних газів - підвищення їх відновлювальної здатності зі зростанням частки колошникового газу, що повертається в піч після очищення від вуглекислоти [10].

Зазначені припущення у розрахунку [11] призводять до погіршення ефективності плавки на режимі, що розглядається.

За даними ДонНДІчермету заслуговує на увагу конвертування коксового газу, при якому виходить гарячий відновлювальний газ, параметри якого приблизно однакові з характеристиками реформованого природного газу. Однак орієнтовна витрата тепла в цьому випадку на 30% менша.

За останні роки у низці країн посилилася увага до питань отримання та використання гарячих відновлювальних газів у комбінованому дутті доменних печей [11].

На доменній печі № 3 обсягом 1700 м³ заводу в Хирохата Японії розпочато випробування вдування гарячого відновлювального газу, отриманого методом Фудзі—Тексако Гес. Спосіб заснований на частковому окисленні мазуту пором та киснем в окремому реакторі. З метою зменшення вмісту в газі окислювачів і сажі процес вели при температурі 1600°C подальшим охолодженням до 1000-1200°C. Отриманий газ вдувався до нижньої частини шахти печі. Продуктивність установки становила 16 тис. м³/год. Отримуваний газ мав склад: 50% H₂; 40,4%; 6% H₂O та 3% CO₂ при вмісті сажистого вуглецю 47 г/м³. На 1 т чавуну використовувалося 90 м³ газу, досягнутий коефіцієнт заміни дорівнює 0,9-1,0 кг коксу на 1 кг мазуту. Вказується, що при поліпшенні складу газу Коефіцієнт заміни може бути підвищений до 1,3-1,4 кг/кг. Працюючи із застосуванням такого газу за наявності в шихті 64,6% агломерату та котунів і виході шлаку 296 кг/т чавуну, піч досягла продуктивності 3755 т/добу при витраті коксу 473 кг/т чавуну.

Відновлювальний газ, отриманий вищезазначеним способом, на дослідній печі Центрального науково-дослідного інституту фірми «Ніппон кокан» в Японії продуктивністю 10 т/добу дав можливість знизити витрату коксу на 35%.

У Японії вдування гарячих відновлювальних газів намічається ряді доменних печей.

На дослідній печі в Бельгії конвертований газ вдували у заплічники. При підвищенні вмісту кисню в дутті до 26% витрати коксу вдалося знизити на 57%. Отримані дані дають підстави для проведення промислових дослідів.

Британською науково-дослідною асоціацією розроблено схеми отримання відновлювальних газів із природного газу, легких фракцій нафти та колошникового газу. Лабораторні дослідження підтвердили можливість суттєвої економії коксу.

В Англії запропоновано схему установки з отримання відновного газу, що містить не менше 90% H_2+CO , методом парової конверсії з використанням нікелевого каталізатора, активованого лугами. Процес отримання газу рекомендується вести при температурі $990^{\circ}C$ відношенні кількості пари до кількості вуглецю, що дорівнює 1,2. Згідно з розрахунками, продуктивність установки дорівнює 1,7 млн. m^3 /добу, а вартість 1000 m^3 газу, що містить 93% (H_2+CO), 8 дол. Очікується збільшення продуктивності доменної печі на 20—25%.

У відновлювальний газ планують одержувати шляхом вуглекислотної конверсії. Насадку газонагрівальних апаратів пропонується просочувати водним розчином нікелю сульфату. Для зниження температури конвертованого газу додається холодна суміш доменного газу і вуглеводневмісного палива. Це призводить до збільшення вмісту CO та H_2 у газі понад 60%. Очікують зниження витрати коксу на 33-37% [10].

У ФРН розроблено методи вдування в шихту коксового газу та газу, що утворюється при крекінгу рідкого палива [12]. Для отримання та нагрівання відновлювальних газів у Японії, ФРН та інших країнах ведуться дослідження з використання енергії атомних реакторів [13].

1.2 Аналітичний огляд способів вдування гарячих відновних газів різного складу у доменну піч

Всі доменні печі України, що виплавляють чавун, працюють з вдуванням сирого природного газу в кількості 80-140 m^3 /т чавуну, що дозволяє економити 50-80

кг коксу/т чавуну і в деяких випадках отримати помітне підвищення продуктивності. Подальше збільшення витрати природного газу лімітується цілим рядом факторів, основними з яких є значне зниження температурного рівня горна і зниження частки згорає вуглецю. Вирішити питання підвищення температури дуття в існуючих умовах досить важко, так як це пов'язано з потужністю повітрянагрівачів і стійкістю вогнетривів. Газ дає менший тепловий ефект горіння одиниці вуглецю вуглеводнів, ніж одиниця вуглецю коксу.

Для підвищення ефективності використання вуглеводнів запропоновано вдувати в доменну піч не сирі природний газ або мазут, а продукти їх конверсії (CO і H_2), попередньо нагріті до температур ~ 1200 °С з використанням тепла палива, більш дешевого, ніж кокс. Це повинно збільшити прихід тепла і поліпшити тепловий баланс горна, а при збагаченні дуття киснем збільшити витрату відновлювачів, що вдмухуються. Виходячи з цього, подальше істотне скорочення витрат коксу вимагає нового підходу до технології отримання і вдування гарячих відновних газів, що складаються в основному з CO і H_2 з обмеженим вмістом N_2 і окислювачів (CO_2 і H_2O), а також незначним вмістом CH_4 і сажистого вуглецю, в доменну піч.

Засновниками подачі відновного газу в доменну піч були Ж. Рейк і Дж. Брасерт, які запропонували в 1952 р. вдування гарячих (1400 °С) продуктів кисневої конверсії природного газу в заплечики. Передбачалося, що при збагаченні дуття киснем до 26% продуктивність печі подвоїться і вдвічі скоротиться витрата коксу.

Гарячі відновлювальні гази, отримані методом каталітичної конверсії природного газу паром в конверторах-газонагрівачах, були застосовані в доменній печі "Азовсталь" в 1965 р. Нагріті відновлювальні гази спочатку вводились через додаткові газові фурми, розташовані на 660 мм вище осі повітряних фурм, а потім через повітряні фурми. При цьому ступінь використання водню коливалася в межах 29,04-50,9%; при практично незмінній ступеня використання CO , частка заліза, відновленого прямим способом, зменшувалася. У зв'язку з недоліками установки для конверсії природного газу досліді були припинені [14].

У жовтні 1968 року на Ново-Тульському металургійному заводі В. Г. Воскобойников і ін. Здійснили дослідну плавку з вдуванням в горн печі гарячого віднов-

ного газу (1203 °С) і холодного технологічного кисню (85% O₂) замість атмосферного дуття [15]. Принципова можливість роботи доменної печі на технологічному кисні (замість дуття) з вдуванням холодного природного або коксового газу була показана А. Н. Раммом в 1958 р. Конверсія природного газу здійснювалася вуглекислою і водяною парою. Газ містив 88,4% відновлювачів (СО + Н₂), 5,46% азоту і 6,14% окислювачів (СО₂ + Н₂О). Витрата відновного газу прийнятий відповідно до розрахунку теоретичної температури горіння перед фурмами при відповідному витраті кисню. Під час дослідної плавки помітних відхилень в ході печі не виникало. Вдування гарячих відновних газів і технологічного кисню дозволило при меншому виході колошникового газу в дослідному періоді (1506 м³/т чавуну) в порівнянні з базовим (1806 м³/т чавуну) збільшити подачу природного газу в піч з 111,2 м³/т чавуну до 365 м³/т чавуну (у вигляді нагрітого відновного газу в кількості 941,1 м³/т чавуну, отриманого конверсією 365 м³ природного газу). Була досягнута теоретична температура горіння коксу у фурм 1970 °С. Внаслідок різкого підвищення вмісту відновлювальних компонентів в горнових газі посилилося непряме відновлення оксидів заліза, а ступінь прямого відновлення знизилася з 31,8 до 10,6%. В результаті цього головним чином і досягнуто зниження витрати коксу на 111,2 кг/т чавуну або майже на 20% в порівнянні з витратою при роботі печі на сиром природному газі і збагаченому киснем дуття - до 30%. При відпрацюванні технології отримання гарячих відновлювальних газів з мінімальним вмістом окислювачів економія у витраті коксу буде вище. При утриманні в технологічному кисні 96% O₂ і більш досконалої конверсії вміст відновлювачів в горнових газах може бути підвищено до 97%. Однак, незважаючи на високу ефективність подачі в горн гарячих відновлювальних газів і холодного технологічного кисню, вона, як і вдування відновлювальних газів в шахту, поки не застосовується. Це обумовлено тим, що ще не розроблені достатньо ефективні способи отримання гарячих відновлювальних газів. При відпрацюванні технології отримання гарячих відновлювальних газів з мінімальним вмістом окислювачів економія у витраті коксу буде вище.

Слід зазначити, що вдування відновлювальних газів і технологічного кисню в фурмені зону повинно бути ефективніше вдування відновлювальних газів в шахту

печі. У першому випадку відновлювальні гази будуть розподілятися порівняно рівномірно по всьому перетину печі. При подачі газів в шахту печі створюються передумови для переважного руху їх по периферії. З цієї точки зору вдування гарячих відновних газів в шахту печі повинно поєднуватися з вдуванням рідкого, твердого або газоподібного палива і кисню в горн через повітряні фурми.

А.Н. Рамм в роботі [16] розглядалися можливі варіанти вдування гарячого відновного газу в горн або в нижню частину шахти, трохи вище горизонту початку шлакоутворення. Як зазначалося раніше, газ, що вдихується в горн, повинен містити якомога менше (3-4%) окислювачів щоб уникнути великої витрати тепла на їх взаємодію з вуглицем коксу і зниження теоретичної температури горіння, а також мінімальна кількість сажі. Температура його повинна бути якомога вищою, але не перевищувати рівня небезпечного для стійкості газопровідної тракту (1200-1400 °С).

Вдування гарячого відновного газу в шахту має наступні переваги перед вдуванням його в горн:

- газ, що вдмухається, може містити значно більше окислювачів (до 12-15%), які в цьому випадку тільки знижують відновну здатність газу, але при температурах горизонту вдування (1000-1100 °С) не можуть в помітну міру реагувати з вуглицем коксу; тому для гарячого відновного газу, що вдувається в шахту, стає не обов'язковою дорога операція очищення його від окислювачів; несуттєвим для нього є також кілька підвищений вміст CH_4 і сажистого вуглецю;

- відновний газ вдувається безпосередньо в область протікання процесів непрямого відновлення; в нижчерозташованій частині печі, в більшості випадків найбільш напруженою в газодинамічному відношенні, кількість газів не зростає (навіть дещо скорочується завдяки зниженню відносної витрати коксу), що дозволяє підвищити продуктивність;

- фізичне тепло гарячого відновного газу також вноситься безпосередньо в ту область печі, в якій при низькій витраті коксу і високої концентрації кисню в дуття, температури шихти і газу надмірно знижуються.

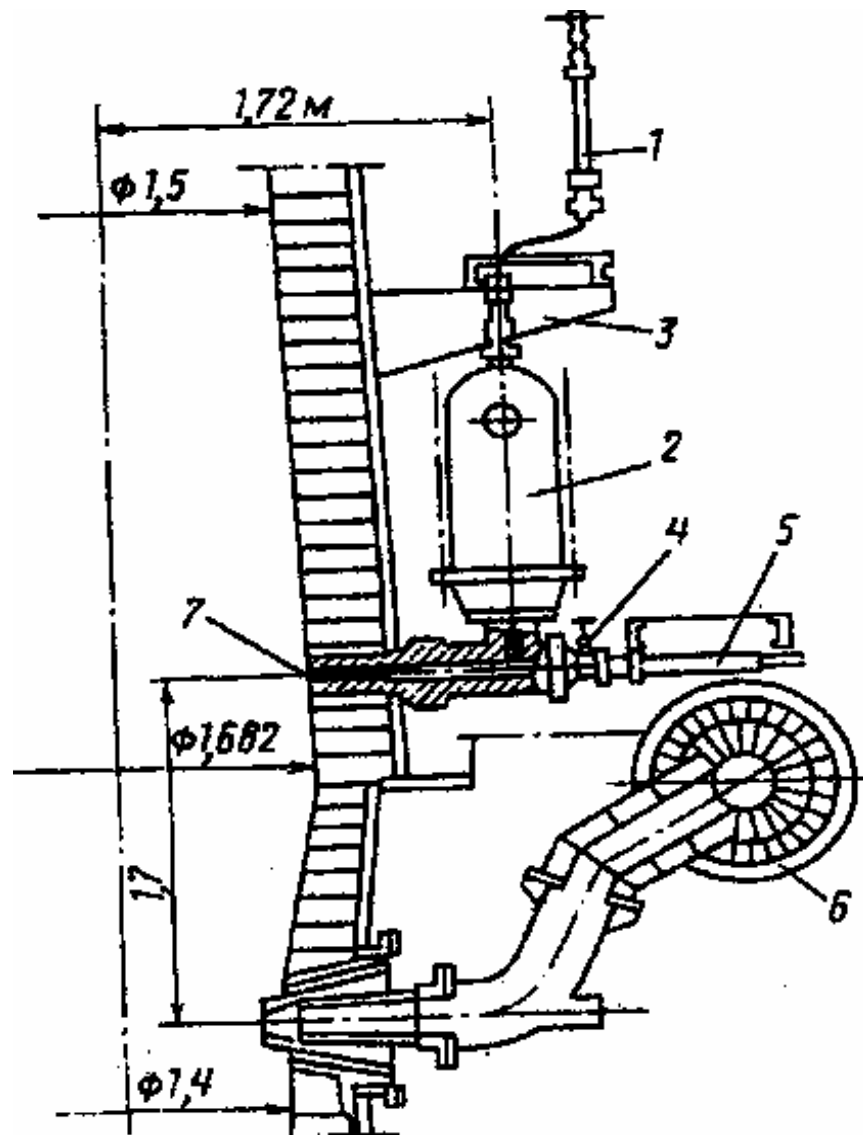
У НМетАУ була організована науково-дослідна робота, спрямована на впровадження на одній з печей комбінату "Запоріжсталь" технології вдування гарячих

відновних газів, отриманих повітряної конверсією природного газу. Розрахунки, виконані на підставі дослідів отримання гарячих відновлювальних газів на експериментальній установці, показали можливість економії коксу до 25% і збільшення продуктивності печі до 20% [17].

На дослідно-промисловій установці з металізації окатишів комбінату "Запоріжсталь" в газопальниковому пристрою інституту газу України отримані високотемпературні продукти безкаталітичної кисневої конверсії природного газу з вмістом 14% CO_2 і H_2O і незначним вмістом сажистого вуглецю. "Тулачермет" встановив один газопальниковий пристрій на шахті печі. Здійснено пробне вдування конвертованого природного газу через одну фурму в нижню частину шахти печі. Однак в силу несиметричної подачі відновного газу доменна піч заробила з каналним ходом на стороні подачі відновного газу і було прийнято рішення експеримент припинити.

За кордоном аналогічні розробки здійснені в 1979 р в Бельгії на дослідній доменній печі об'ємом 600 м^3 заводу в Угре, де проведено детальне вивчення процесу кисневої конверсії природного газу. Піч була оснащена п'ятьма звичайними і п'ятьма газовими фурмами, розташованими в нижній частині шахти на висоті 1,7 м вище горизонту повітряних фурм (рис. 1.2).

До кожної фурми гарячий відновний газ підводився від індивідуального реактора. Природний газ, що подавався в пальник підігрівався в металевому теплообміннику до $500\text{-}600 \text{ }^\circ\text{C}$. Відновлювальний газ, отриманий під час дослідів, містив достатньо велика кількість окислювачів (до 15%), однак кількість його було якихось $0\text{-}10 \text{ г}$ на 1 м^3 , а температура газу підтримувалася на рівні $1300\text{-}1600 \text{ }^\circ\text{C}$. Збільшення співвідношення кисень - природний газ призвело до підвищення температури газу і зниження його відновного потенціалу. На першому етапі роботи в доменну піч подавали атмосферне дуття з вдуванням в шахту відновного газу. По-другому - в горн печі додатково вводили мазут в кількості $57\text{-}155 \text{ кг/т}$ чавуну і збагачували дуття киснем, збільшуючи витрати природного газу на конверсію.



1 - трубопровід природного газу; 2 - реактор фірми Шелл; 3 - тороїдальний пальник; 4 - клапан; 5 - труба для відбору проб газу; 6 - кільцевий повітропровід; 7 - фурма для вдування гарячих відновних газів.

Рисунок 1.2 - Схема установки для вдування гарячих відновних газів в шахту експериментальної доменної печі в Угре

Конвертованим газом на першому етапі роботи печі вдалося замінити 145 кг/т чавуну коксу, що склало 22% початкового витрати. На другому етапі в результаті подвійного вдування питома витрата коксу скоротилася до 375 кг/т, тобто на 43%. Через короткочасність дослідних плавок гранична продуктивність так і не була досягнута. Встановлено, що великих витрат вуглеводнів, що подаються в горн з збага-

ченням дуття киснем, можна досягти лише з одночасним вдуванням гарячого відновного газу в шахту для покриття теплопотребності цієї зони печі.

Вдування конвертованого газу (70-73% H_2 , 16-18% CO , 2-4% CH_4 , 2% H_2O , 0,8% CO_2 і 6-7% N_2) в заплечики з одночасною подачею мазуту через фурми було здійснено на печі об'ємом 430 м^3 заводу в Серені. У деяких дослідах дуття збагачували киснем. При вдуванні 409 м^3 конвертованого газу на тонну чавуну приведена витрата коксу зменшена з 618 до 519 кг/т. Газ, що вдмухується, задовільно проникав в стовп шихти, що не утруднює її сходу. При спільному вдуванні гарячих відновлювальних газів і мазуту досягнуте додаткове зниження витрати коксу в порівнянні з роздільною подачею заміників: при витраті 428 м^3 відновлювальних газів і 78 кг мазуту на 1 т чавуну витрата коксу склав 463 кг/т чавуну в порівнянні з 519 кг/т чавуну при вдування одних відновлювальних газів і 543 кг/т чавуну при подачі тільки мазуту.

В Японії інститутом фірми "Ніппон Кока" виконані дослідження на дослідній печі комбінату "Кейхин". Досліди, проведені протягом тривалого часу показали, що при вдування відновного газу поліпшується хід печі, продуктивність печі зростає на 7-8%, а питома витрата коксу знижується з 550 до 360 кг/т чавуну або на 35%. При здійсненні промислових дослідів на печі об'ємом 1700 м^3 заводу в Хірохата, коефіцієнт заміни коксу мазутом, що витрачається на конверсію, дорівнює 0,9-1,0 кг/кг мазуту (вміст CO і H_2 в газі становило 89%).

Детальними дослідженнями роботи однієї з японських експериментальних доменних печей встановлено, що зменшення вмісту CO_2 і H_2O у газі з 9 до 5% викликає підвищення коефіцієнта заміни коксу газом приблизно на 20%. Вдування в шахту 600 м^3 відновного газу на тонну чавуну дозволяє знизити питоми витрати коксу з 430 до 300 кг/т чавуну. В Японії випробувана газифікація мазуту киснем і паром і вдування нагрітих до $\sim 1200\text{ }^\circ\text{C}$ відновлювальних газів в відновну зону печі з температурами трохи вище $1000\text{ }^\circ\text{C}$ (шахту печі). На основі цього позитивного досвіду пропонується в шахту печі вдувати гарячі відновлювальні гази, а в фурми - мазут, що має значно знизити витрату коксу.

Продукти кисневої конверсії природного газу доцільно подавати в шахту доменної печі. В цьому випадку відновлювальний газ вдувається безпосередньо в область протікання процесів непрямого відновлення: в нижчерозташованій частині печі, в більшості випадків найбільш напруженою щодо газодинаміки, кількість газів не зростає (навіть скорочується завдяки зниженню відносної витрати коксу), що дозволяє значно підвищити продуктивність печі. Наявні в газі окислювачі тільки знижують відновну здатність газу, але не можуть в помітну мірою реагувати з вуглецем коксу. Тому допустима концентрація окислювачів в газі може бути значно вище, ніж при подачі в горн і складати 10-12%. Крім того, введення фізичного тепла з конвертованим газом здійснюється безпосередньо в область печі, де при низькій витраті коксу температури шихти і газу надмірно знижуються. Разом з тим, найбільш складною і недостатньо вивченою є завдання досягнення максимальної глибини проникнення газу, що вдмухується, в робочий простір доменної печі і підвищення рівномірності розподілу його по перетину печі.

При роботі на закордонній дослідній доменній печі об'ємом 8 м³ із збагаченням дугтя киснем були підвищені витрати конвертованого газу до 751 м³/т чавуну, а мазуту до 155 кг/т чавуну, що дозволило скоротити витрату коксу на 285 кг/т чавуну (з 660 до 375 кг) і підвищити продуктивність печі на 48%. Автори дослідження вважають, що на промислової печі при використанні гарячих відновлювальних газів 600 м³/т чавуну і мазуту 150 кг/т чавуну виявиться можливим зменшити витрату коксу до 250 кг/т чавуну.

Відзначимо не здійснену, але теоретично обґрунтовану А. Н. Рам і Я. Б. Карпіловським пропозицію про доменній плавці при вдування в горн колошникового газу, очищеного від CO₂, і технологічного кисню без атмосферного дугтя. При такій технології колошниковий газ повинен містити в залежності від умов 22-32% CO₂, 50-67% CO, 3,5-5,5% H₂, 4,5-14,5% N₂, 1,6-2,4 % H₂O.

У хімічній промисловості працюють промислові установки по відмиванню газів від двоокису вуглецю, які можуть бути використані стосовно доменному виробництву. Залежно від умов плавки 70-95% очищеного від двоокису вуглецю колошникового газу (більша витрата неприпустима через зниження теоретичної температури го-

ріння і накопичення азоту у вдувати газі) підігрівається до 1200 °С в апаратах регенеративного типу і вдувається в горн печі. Відповідно до складу колошникового газу, що вдмухується, буде містити 71-85% CO; 5,5-7% H₂ і 5,6-20,7% N₂. Робота доменної печі по запропонованому методу з розрахунку повинна супроводжуватися зниженням витрати коксу на 20-30% і підвищенням продуктивності на 7-11%.

У НМетАУ на експериментальній установці проведені досліді, в ході яких встановлено оптимальне співвідношення кисень - природний газ, при якому в продуктах конверсії відзначено максимальний вміст відновлювальних компонентів і мінімальне - окислювачів і сажі.

Виконано розрахунки показників роботи печі при вдування гарячих відновних газів в шахту. Запропоновано на першому етапі довести витрата відновного газу до 200 м³/т. Це призведе до економії коксу до 65 кг/т і зростання продуктивності печі на 10%. Надалі витрата відновного газу можна збільшити до 500 м³/т чавуну, що призведе до економії коксу 20-25% і зростання продуктивності печі до 20% [18].

Розрахунок зміни собівартості 1 тонни чавуну при вдування конвертованого природного газу, вироблений авторами роботи [19], показав, що, незважаючи на значне зниження питомої витрати коксу, собівартість чавуну зменшується ненабагато. Це пояснюється високою вартістю конвертованого природного газу.

Собівартість гарячого відновного газу можна знизити, застосувавши коксовий газ, який споживає менше енерговитрат в процесі конверсії. За хімічним складом конвертовані природний і коксовий газу практично не розрізняються (таблиця 1.2), тому зміна ступеня прямого відновлення r_d , теоретичної температури горіння і витрата коксу при однаковому їх витраті будуть практично однакові.

Таблиця 1.2 - Хімічний склад газів, %

Газ	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₄ H ₁₀	C ₅ H ₁₂	H ₂ O+CO ₂	O ₂	CO	H ₂	N ₂
Сирий природний	96,2	1,94	0,58	0,47	0,25	-	-	-		0,55
Сирий коксовий	23,0	2,0	-	-	-	2,0	0,6	0,8	58,0	6,40
Конвертований природний	1,1	-	-	-	-	1,1	-	23,8	73,8	0,15
Конвертований коксовий	1,1	-	-	-	-	1,1	-	19,6	74,4	3,78

Однак, витрата тепла на отримання 1 м^3 конвертованого коксового газу значно менше, ніж на отримання 1 м^3 конвертованого природного газу (1258 проти 1719 ккал / м^3) [20].

Виходячи з вартості газів і витрати тепла на отримання 1 м^3 конвертованого газу, автори роботи [20] розрахували вартість 1000 м^3 конвертованих природного і коксового газів; з економічної точки зору виявилось доцільним заміна конвертованого природного газу конвертованим коксівним газом, що дозволяє знизити собівартість чавуну. Однак, в конвертованому коксовому газі дещо менший вміст відновлювальних компонентів ($\sim 94\%$) на відміну від конвертованого природного газу, в якому вміст відновників досягає 97% . Проте, відомі процеси, за якими коксовий газ піддають крекінгу і отримують газ з високим (до 97%) вмістом відновлювальних компонентів. Конверсія вуглеводнів коксового газу здійснюється в газових реформерах різними методами (при підвищеному і нормальному тиску, високій температурі, як з використанням різних каталізаторів, окислювачів, так і без їх залучення) [21]. Ступінь відновлення конвертованого коксового газу обернено пропорційна підвищенню тиску і температури в реформерах і досягає максимального значення при тиску в 1 бар і температурі близько $950\text{-}1000 \text{ }^\circ \text{C}$. Як правило, способи конверсії коксового газу розроблені для адаптації їх в коксових цехах металургійних заводів.

Ще одним альтернативним заходом зниження витрат на отримання гарячого відновного газу є заміна дорогого природного газу доменним. Для отримання гарячого відновного газу застосовують власний колошниковий газ в процесі його реалізації. Головна перевага цієї технології полягає в тому, що вона дозволяє практично повністю використовувати хімічну енергію вуглецю дефіцитного коксу і максимально збагатити горнові гази відновлювачами. Технологічна схема процесу передбачає компримування очищеного від пилу колошникового газу, видалення з нього діоксиду вуглецю, нагрів і подачу газу в горн доменної печі через фурменні прилади. Через ці самі прилади подають холодний компримований кисень. Очищення колошникового газу від пилу здійснюють звичайними пристроями, подачу - газовими компресорами. Видалення CO_2 з колошникового газу виробляють за допомогою одного з методів, освоєних і широко застосовуваних у хімічній промисловості. Для на-

гріву газу використовують регенеративні апарати типу повітрянагрівачів. Така технологія не вимагає ніяких принципових змін в конструкції доменної печі і її основного обладнання [22].

Теоретичні розрахунки [23] і проектні опрацювання показують, що така технологія при добре підготовленій шихті забезпечить зниження витрат коксу до 280-300 кг/т чавуну, збільшення продуктивності печі на 25-30%. Впровадження технології дозволить значно знизити обсяг виробництва коксу і істотно поліпшити екологічну обстановку в результаті скорочення шкідливих викидів в коксохімічному виробництві та утилізації CO₂ колошникового газу.

Ця технологія доменної плавки пройшла тривалі випробування на доменній печі № 2 об'ємом 1033 м³ (НВО "Тулачермет") в період 1985-1990 років. Для цієї мети за проектом Гипромеца в 1985 році був споруджений дослідно-промисловий комплекс, до складу якого входить:

- два повітряних нагрівача для компримування колошникового газу, обладнаних холодильниками-теплообмінниками для зниження температури газу після компресії до 40 ° С;

- установка для видалення CO₂ з колошникового газу. Спосіб очищення заснований на застосуванні в якості реагенту водного розчину моноетаноламіна. Очищений газ проходить через сепаратор для відділення конденсату і подається в газонагрівач.

- блок газонагрівачів, що складається з трьох регенеративних апаратів, забезпечує нагрів газу до температури 1100-1150 ° С. Нагріте відновний газ через прямий і кільцевої газопроводи надходить в фурмені прилади доменної печі.

- 3 компресора (1 резервний) для подачі технологічного кисню, що надходить безпосередньо в фурмені зону печі. Крім того, в комплекс входить система енергозабезпечення об'єктів, що включає електроживлення, подачу пари, води, азоту і т.д [24].

Дослідні плавки повністю підтвердили доцільність введення нової технології: підтверджена працездатність комплексу з підготовки і подання в доменну піч гарячих відновлювальних газів і безпеку роботи на всіх його об'єктах, доведена можливість досягнення проектних показників по витраті коксу і продуктивності доменної печі, розроблений і реалізований спосіб ведення доменної плавки з регульованою

концентрацією технічного кисню, визначено ряд деяких технологічних досягнень. На звичайну технологію піч була переведена з-за напруженості енергетичного балансу заводу в зимовий період (недолік пара для роботи установки з очищення колошникового газу від CO_2) [25].

Для поліпшення умов роботи фурмених вогнищ з метою забезпечення високих витрат пиловугільного палива і підвищення допустимої їх зольності (застосування низькосортного вугілля) доцільно винести процес газифікації вугілля з робочого простору доменної печі і організувати його спалювання в спеціальних агрегатах-газогенераторах з подальшим вдуванням отриманих гарячих відновлювальних газів в фурмені вогнища. Основною перевагою вдування гарячих відновних газів в фурми доменної печі, в порівнянні з використанням сирих паливних добавок, є можливість подачі в доменну піч більшої кількості відновлювачів, внаслідок чого скорочується питома витрата коксу за рахунок зниження ступеня прямого відновлення і тепла, внесеного газом. Подача в горн доменної печі гарячих відновлювальних газів, які є, по суті, готовим горновим газом, дозволяє замінити газ, що утворюється з коксу. Отримання гарячих відновлювальних газів з низькосортного вугілля дозволяє одночасно вирішити проблему розширення паливної бази металургії. Одним з важливих питань нової технології є спосіб поєднання в фурмені приладі порівнянних за обсягами потоків гарячих відновлювальних газів і гарячого дуття, що подається до фурмам за двома автономним трактами. Розрахунки показали, що в міру збільшення витрати, температури гарячих відновлювальних газів, вмісту в них відновлювачів і скорочення частки окислювачів, кількість гарячого дуття знижується і роль його підігріву в тепловому балансі доменної печі зменшується. Тому можлива заміна гарячого дуття холодним киснем, обсяг якого на порядок менше обсягу гарячих відновлювальних газів, а введення його в доменну піч може бути проведений за схемою існуючого введення природного газу. Така схема випробувана в АК "Тулачермет" і може бути прийнята як основна. При цьому істотним є спосіб введення кисню через фурму. Подача його в торець призводить до швидкого гасіння швидкості струменя в коксової насадці, в результаті чого поблизу тіла фурм розвиваються температури 3500-4000 °С, що призводить до швидкого руйнування фурм. Основним принципом

введення кисню є подача його струменя в потік гарячих відновлювальних газів, а не в коксову насадку. Це досягається нахилом торцевого патрубку в сторону потоку гарячих відновлювальних газів або подачею його в порожнину фурми в оболонці природного газу або іншої холодної відновного газу. Додатково струмінь кисню можна пасивувати добавкою природного газу. Одна з можливих схем подачі кисню показана на рис. 1.3. подача в фурмені вогнища доменної печі, по суті, готового горнового газу тягне за собою зміну і їх режиму роботи. Оскільки при подачі на фурму гарячих відновлювальних газів без окислювачів кокс не витрачається, відсутній градієнт швидкості руху коксової насадки по перетину, її порозність різко зменшується. Це погіршує дренаж продуктів плавки і газопроникність стовпа шихти [26].

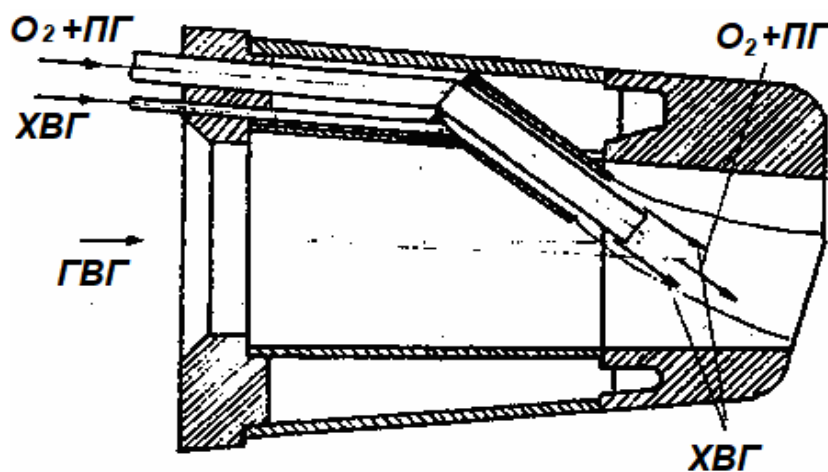


Рисунок 1.3 - Схема введення кисню в потік гарячих відновлювальних газів в фурмі доменної печі

Подача разом з гарячими відновними газами гарячого дуття або холодної кисню сприяє наближенню режиму роботи фурмених вогнищ до класичного. Однак слід врахувати, що кількісне співвідношення між подається гарячим відновлювальним газом і киснем визначається тепловим балансом і необхідним температурним рівнем у фурмі, а тому не відповідає вимогам рухливості коксової насадки, від якої залежить характер протитока в нижній частині печі. Це протиріччя вирішується спільним розглядом зазначених умов. Аналіз показує, що для кожного режиму може бути знайдений комплекс дуттєвих параметрів, що забезпечує нормальний протитечія в нижній частині печі.

При зниженні витрати коксу до 250-300 кг/т, і збереженні на колишньому рівні кількості рідких продуктів плавки вдвічі зростає рідинна навантаження на коксову насадку. У зв'язку зі зниженням ступеня прямого відновлення до мінімальних величин і відповідним зменшенням частки монооксиду заліза в первинних шлаках ускладнюється розчинення твердих частинок вуглецю - продуктів руйнування коксу в жужільному розплаві. В умовах нової технології зменшується рухливість коксу в області фурмених вогнищ, оскільки інтенсивність його спалювання знижується в зв'язку з заміною частини газу, що утворюється з коксу, гарячим відновлювальним газом, що вводиться ззовні [26].

В результаті зміни зазначених факторів у процесах доменної плавки очікуються наступні зрушення:

- зона пластичного і рідкого станів зміщується вниз, в область більш високих температур, а висота коксової насадки зменшується;
- зменшується плинність і стійкість властивостей первинного шлаку;
- збільшується руйнування шматків коксу, а розчинення в шлаку продуктів його руйнування сповільнюється;
- зменшується порозність коксової насадки в зв'язку з меншою її рухливістю і утворенням дрібних фракцій;
- можливе зменшення розмірів вогнищ розпушення у фурм і проникнення газів до центру горна.

Зазначені зрушення можуть ускладнювати організацію противотока в зоні фільтрації рідких продуктів плавки і формування чавуну заданого складу. Тому необхідний їх аналіз та пошук шляхів подолання негативних наслідків. Для отримання шлаку зі стійкими властивостями потрібно оптимізувати їх компонентний склад. Підвищення рухливості коксової насадки і її порозности може бути здійснено за рахунок оптимізації режиму випуску продуктів плавки.

При малій масі накопичуються в горні чавуну і шлаку обмін коксу нижче горизонту фурм відбувається повільно, що призводить до уповільнення його опускання в осьовій зоні, поганому проникненню в осьову зону газу з вогнищ горіння і високому вмісту CO_2 в центрі в радіальному газі. Все це призведе до зниження дрена-

жної здатності горна. Поступове збільшення маси чавуну і шлаку у горні призведе до більш швидкого обміну коксу, збільшення швидкості опускання його в осьовій зоні та підвищення газопроникності цієї зони. Досліди, проведені зі збільшенням ступеня заповнення горна, показали активізацію його роботи з підвищенням кількості газів, що проходять через центральну зону.

Для запобігання несприятливих явищ, пов'язаних зі зменшенням вмісту монооксида заліза в первинних шлаках, необхідно прагнути до досягнення заданої величини економії коксу переважно за рахунок збільшення температури гарячих відновлювальних газів і, в меншій мірі, за рахунок збільшення частки відновлювальних компонентів, що сприяють зниженню ступеня прямого відновлення. Це означає перевагу газифікації вугілля атмосферним або слабозбагаченим киснем дуттям підвищеного нагріву, але не киснем.

В умовах малококсової плавки при зростанні кількості розплавів, що проходять через коксову насадку, зростають вимоги до термічної стійкості коксу. Що стосується особливості фільтрації розплавів через коксову насадку, то необхідно експериментальне їх вивчення. Не менш важливо експериментальне вивчення стану коксової насадки і її рух в області фурмених вогнищ, що дозволяє виявити режими з максимальною порозністю стовпа в цій зоні. Проблема заміни природного газу в Україні загострилася в останні роки в зв'язку з високою його вартістю, близькою до вартості замінного кількості коксу, нерегулярністю подачі в доменні печі, що різко знижує ефективність, і припиненням вдування в осінньо-зимовий період з підвищенням витрат коксу на 20-30%. Зазначені фактори визначають умови функціонування всього енерготехнологічного комплексу чорної металургії. Це призводить до необхідності вирішення даної проблеми шляхом газифікації вугілля в звільненому від насадки повітрянагрівача з вдуванням отриманого газу через фурмені прилади в доменну піч.

Можливі дві схеми технології:

- на основі газифікації кускового вугілля;
- на основі газифікації дрібнозернистого вугілля.

Для оцінки цих схем нижче розглянуті їх особливості, результати розрахунків газифікації вугілля, нагрівання окислювача технології доменної печі і економіки, а також комплекс необхідних технічних рішень для реалізації даної енерготехнології.

На основі газифікації кускового вугілля (рис. 1.4) в камеру насадки повітрянагрівача через перевантажувальний пристрій, встановлений на куполі, завантажується кускове вугілля. У нижню її частину подається технологічний кисень (O_2) або нагріте атмосферне дуття в суміші з нагрітим колошниковим газом. У протivotоке стовпа вугілля і окислювача відбувається газифікація. Продукти газифікації направляються в камеру горіння повітрянагрівача, де вони віддають частину тепла колошниковому газу, який пропускають через рекуператор і направляється потім у суміші з окислювачем (киснем або повітрям) в камеру газифікації. Частково охолоджені продукти газифікації - відновлювальні гази направляються по тракту до фурмені приладів доменної печі (основна частина) і окремим потоком на вхід в камеру рекуператора для зниження температури продуктів газифікації, виходять з стовпа вугілля від $1300-1350\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $900-1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ [26].

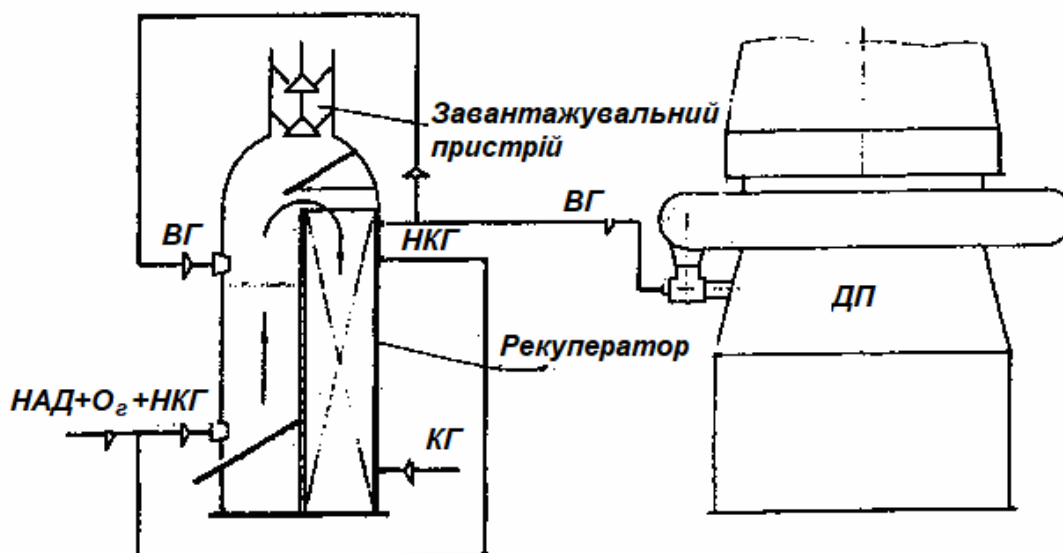


Рисунок 1.4 - Схема газифікації кускового вугілля

На основі газифікації дрібнозернистого вугілля (рис. 1.5).

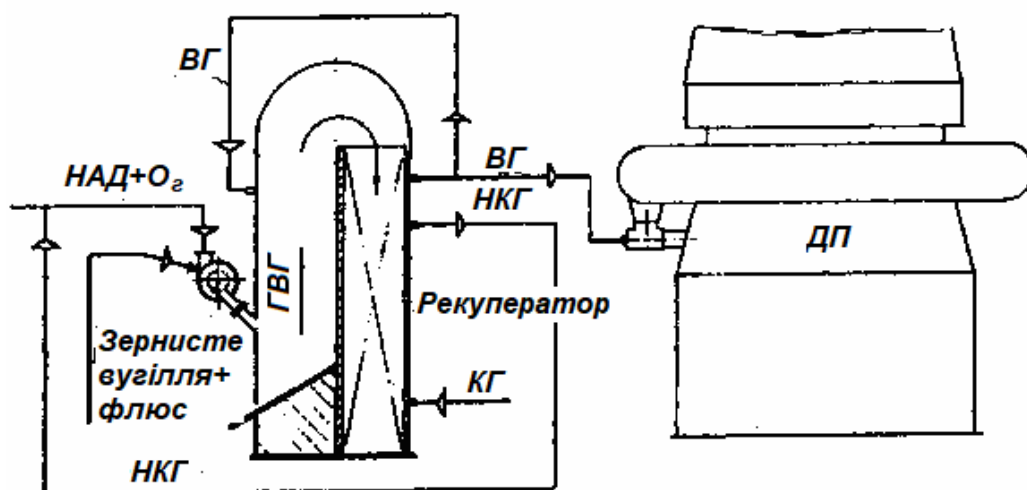


Рисунок 1.5 - Схема газифікації дрібнозернистого вугілля

У нижній частині камери насадки повітрянагрівача встановлюються реактори-газифікатори зернистого вугілля вихрового типу. До них подається технічний кисень (O_2) або нагріте атмосферне дуття в суміші з нагрітим колошниковим газом (окислювачі). У потік окислювачів подається зернисте вугілля і флюс (0-3 мм). В обсязі реакторів-газифікаторів відбувається газифікація вугілля і зрідження золи. Газоподібні продукти газифікації і зріджена зола надходять в обсяг камери. Рідкі продукти збираються на поді, а потім видаляються через льотку. Газоподібні продукти піднімаються в верхню зону камери і змішуються з охолодженим відновником, що подається з рекуператора для зниження їх температури до необхідної на вході в рекуператор, тобто від 1600-1800 °С до 900-1000 °С. У рекуператорі від зазначеної температури 900-1000 °С охолоджується до 500 °С, віддаючи тепло колошниковому газу, що нагрівається до 700 °С. Нагрітий колошниковий газ подається в газифікатор в суміші з окислювачем, а охолоджений відновний газ поділяється на два потоки - один надходить в камеру газифікації, інший - в фурмені прилади доменної печі.

При газифікації в стовпі доцільно взяти худий вугілля фракції 5-50 мм. Це виключає смолоутворення в стовпі і пов'язані з цим труднощі. Для офлюсовання золи необхідний вапновмісний компонент. Однак вапняк завантажувати недоцільно, тому що в складі газу з'являється діоксид вуглецю, що різко знижує відновний потенціал. Тому необхідно завантажувати конвертерний або мартенівський шлак. Можлива подача залізовмісного матеріалу. При газифікації дрібнозернистого вугілля (0-3 мм)

можливе використання вугілля будь-якого сортаменту, однак для порівнянності результатів прийняли єдиний хімічний склад: золи - 25%, вуглецю в робочій масі - 66%, з цією ж метою прийнято однакові параметри окислювачів.

Розрахунки провели для двох варіантів: з подачею холодного кисню і з подачею нагрітого (1000 °С) атмосферного дуття.

Таблиця 1.3 - Результати розрахунку показників отримання гарячого відновного газу

показник	куськове вугілля		дрібнозернисте вугілля	
	ХК	НАД	ХК	НАД
Витрата КГ, м ³ / м ³ дуття	8,0	1,0	3,0	0,3
Теоретична температура газифікації, °С	1873	1903	1660	1650
Кількість ГВГ, м ³ / кг С	6,6	7,4	4,7	6,5
Склад ГВГ, % СО	55,75	41,9	61,6	37,6
Н ₂	11,75	8,1	12,7	7,7
Н ₂	32,5	50,0	25,7	54,7
Витрати на отримання ГВГ:				
вугілля, кг / м ³	0,233	0,205	0,327	0,236
кисню, м ³ / м ³	-	-	0,16	-
КГ, м ³ / м ³	0,079	0,38	0,48	0,174
НАД, м ³ / м ³	0,633	0,38	-	0,578
Коефіцієнт заміни коксу, кг / м ³	0,18	0,11	0,21	0,10

Кількість колошникового газу визначили з умови підтримки в осередках горіння температури, що забезпечує розплавлення золи та інших твердих добавок. При цьому в разі газифікації кускового вугілля в щільному шарі газифіковане вугілля, нагрітий в стовпі відходять з вогнищ газифікації газами. У стовпі також нагріваються і розплавляються флюсуючі і залізовмісні добавки. При газифікації в циклонно-вихровому апараті зазначені процеси відбуваються в обсязі газифікатора, витрачаючи високотемпературне тепло. В результаті цього при тих же вихідних умовах температура відновного газу на виході з вихрових газифікаторів в камеру буде нижче, ніж в фурмених осередках шарового газифікатора, а для досягнення необхідної температури необхідно подавати менше колошникового газу на одиницю дуття, ніж в разі шарового процесу.

З результатів розрахунку слід, що при обох схемах багатший відновний газ виходить у варіанті холодного кисню. Він дає більш високі коефіцієнти заміни коксу, але вимагає великих витрат вугілля і кисню на його отримання.

Завданням рекуперації є віддача частини тепла відновного газу для його охолодження до 500 °С, що дозволяє технічно просто ввести його в фурмені прилади. Тепло передається колошниковому газу з нагріванням його до 700 °С і подальшою передачею в камеру газифікації. Для нагріву колошникового газу до 700 °С при температурі відходить з рекуператора відновного газу ~ 500 °С потрібна температура входить до рекуператор відновного газу 900-1100 °С. Ця температура фактично становить 1300-1350 °С в шаровому процесі газифікації кускового вугілля і 1650 °С - у разі газифікації в вихрових реакторах. Для її зниження до необхідного рівня необхідно до гарячого газу перед входом в рекуператор додати частину відходить з рекуператора відновного газу з температурою 500 °С. По балансу тепла добавка складає 0,6-0,7 м³/м³ в разі шарової газифікації і більше 1 м³ в разі вихрових реакторів. При цьому охолоджувальний газ рециркулює в системі рекуператор - камера газифікації, а в доменну піч надходить кількість відновного газу, відповідне генерації його в осередках горіння шарового процесу або в вихрових газифікаторі дрібнозернистого вугілля. Кількість колошникового газу, що нагрівається до 700 °С в рекуператорі, становить з розрахунку в шаровому процесі 1,0-1,1 м³/м³ відновного газу, а в вихровому - 1,56 м³/м³. Частина нагрітого колошникового газу повертається в камеру газифікації, решта може бути використано на нагрів дугтя в повітронагрівачі. При цьому за рахунок більшої ентальпії колошникового газу при 700 °С витрата його скорочується на 25%.

Виконані оціночні розрахунки авторів роботи [10] показали великі переваги нової технології по всіх основних аспектах - паливно-енергетичного, економічного та екологічного. Ці переваги зберігаються при будь-яких умовах, в тому числі при зміні цін на ресурси, тому що зростання витрат на видобуток коксівного вугілля і отримання коксу завжди буде випереджати зростання витрат на інші енергоносії, особливо низькосортне вугілля.

У порівнянні з вдуванням в доменну піч сирого пиловугільного палива розробляється технологія має наступні переваги:

- залучення в паливний баланс доменного виробництва низькосортного вугілля, в тому числі з вмістом золи до 25%, що збільшує доступність нової технології.
 - збільшення в 2-3 рази кількості вугілля, що вдмухується і відповідно заміненого коксу без ускладнень в роботі фурмених вогнищ.
 - спрощення схеми підготовки і подачі вугілля в доменну піч за рахунок можливості вдування зернистого вугілля (0-3 мм) замість порошкового (50-60 мкм).
 - повне виведення з процесу природного газу при одночасній можливості збільшення температури дуття до максимального за умовами служби обладнання рівня.
 - інтенсифікація плавки шляхом подачі кисню, що сприяє збільшенню продуктивності одиничних агрегатів з відповідним зниженням експлуатаційних витрат.
- При цьому необхідний обсяг виробництва чавуну в цеху буде забезпечуватися меншою кількістю агрегатів, що зменшить забруднення навколишнього середовища і знизить трудовитрати на одиницю продукції.

Перехід до нової технології може бути здійснений в рамках існуючої в міру освоєння нової і оснащення доменних цехів обладнанням для підготовки та подачі вугілля. Нова технологія дозволяє також успішно вирішувати завдання енергобалансу підприємств в цілому шляхом поставки іншим енергоспоживачам необхідної кількості доменного газу із заданою теплотворною.

Технологічно заміна 100 м^3 природного газу на тонну чавуну відповідною кількістю гарячого відновного газу не тільки не викликає труднощів, але є кращою, тому що знімає питання про неповноту конверсії вуглеводнів у фурм і відповідному зменшенні ефективності заміни коксу. Виникає можливість збільшення витрати гарячого відновного газу понад кількість, еквівалентного 100 м^3 природного газу на тонну чавуну.

Згідно з розрахунками, за величиною теоретичної температури горіння в печі 1 м^3 природного газу еквівалентний $4,4 \text{ м}^3$ гарячого відновного газу з температурою $500 \text{ }^\circ\text{C}$. За кількістю внесеного відновника ($\text{CO} + \text{H}_2$) 1 м^3 природного газу еквівалентний в різних варіантах від 4 до $6,6 \text{ м}^3$ гарячого відновного газу. За величиною ек-

вівалента заміни коксу значення коливаються в різних варіантах від 3,3 до 8,0 м³ гарячого відновного газу. Таким чином, мінімальна кількість відновного газу для заміни 100 м³ природного газу на тонну чавуну складає 330 м³/т (За умовами збереження теоретичної температури горіння в печі), а максимальне - 800 м³/т чавуну. За рахунок цього в ряді варіантів можуть бути отримані економія або перевитрата коксу. Однак основна економія коксу при заміні природного газу гарячим відновлювальним газом буде отримана за рахунок підтримки температури дуття на максимально можливому рівні. Це обумовлено тим, що в даний час в опалювальний сезон року природний газ відключається на доменній печі повністю, що змушує знижувати температуру дуття з метою збереження температурного режиму фурмених вогнищ. Можливий резерв температури дуття в цей період можна оцінити в 200-300 °С, а в середньому за рік - 100-200 °С, що відповідає витраті коксу 20-30 кг/т чавуну. З урахуванням підвищення стабільної роботи печі при постійній подачі відновного газу середньорічну економію коксу можна оцінити в 30-35 кг/т.

Вирішальний вплив на коефіцієнт заміни коксу надає частка окислювачів і температура газу. В роботі [27] встановлено кількісний вплив вмісту окислювачів на витрату коксу в умовах даної дослідної плавки: вдування безокисного газу в доменній печі дозволило б зменшити питому витрату коксу до 35% в порівнянні з його витратою при плавці на дуття з 30% O₂ і сирим природним газом. Частка відновлювачів в гарячому відновному газі (CO + H₂) лінійно впливає на коефіцієнт заміни коксу при збільшенні її аж до 80%, після чого підвищення концентрації відновлювальних компонентів не тільки не збільшує, але і трохи знижує економію коксу [28]. Це обумовлено тим, що при високому відновному потенціалі газів в печі швидко досягається повне відновлення оксидів заліза непрямим шляхом, і подальше збільшення витрат гарячого відновного газу не знижує ступінь прямого відновлення і, відповідно, не сприяє економії тепла. Гази виконують лише функцію теплоносія. Найбільш ефективним шляхом використання гарячих відновлювальних газів є підвищення їх температури, величина якої обмежена в даний час службовими характеристиками. Підвищення температури гарячого відновного газу збільшує коефіцієнт заміни коксу на 0,019 кг/м³ на кожні 100 °С температури [29] величина якої обмежена в даний

час службовими характеристиками. Підвищення температури гарячого відновного газу збільшує коефіцієнт заміни коксу на $0,019 \text{ кг/м}^3$ на кожні $100 \text{ }^\circ\text{C}$ температури [30], величина якої обмежена в даний час службовими характеристиками.

Таблиця 1.4 - Витрати основних компонентів на 1 тону чавуну з отриманням економії (-) або перевитрати (+) коксу

компоненти	витрата ГВГ при газифікації кускового вугілля				витрата ГВГ при газифікації дрібнозернистого вугілля			
	440 м ³ /т		720 м ³ /т		440 м ³ /т		800 м ³ /т	
	ХК	НАД	ХК	НАД	ХК	НАД	ХК	НАД
Вугілля, кг/т	103	90	168	148	144	104	262	189
Кисень, м ³ /т	35	-	57	-	70	-	128	-
Колошниковий газ, м ³ /т	278	167	456	274	211	77	384	139
НАД, м ³ /т	-	167	-	274	-	254	-	462
Кокс, кг/т	-	+32	-50	-	-12,5	+36	-88	-
Те ж з підвищенням температури дуття	-30	0	-80	-30	-40	0	-120	-30

Підвищити температуру гарячого відновного газу, що вдувається в доменну піч, до потрібних меж можна горінням вуглецю коксу в холодному технологічному кисні, яке відбувається по реакції:



Зниження ж частки окислювачів ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) на 1% еквівалентно збільшенню температури гарячого відновного газу на $100 \text{ }^\circ\text{C}$ [31].

При подачі на фурми гарячого відновного газу без окислювачів режим роботи фурмених вогнищ істотно змінюється. Оскільки кокс не витрачається в фурмених осередках, відсутній градієнт швидкості руху коксової насадки по перетину, і її порозність різко зменшується. Це погіршує дренаж продуктів плавки і газопроникність стовпа шихти. Подача разом з гарячим відновлювальним газом гарячого дуття або холодного кисню сприяє наближенню режиму роботи фурмених вогнищ до класичного. Однак слід врахувати, що кількісне співвідношення між подається гарячим відновлювальним газом і киснем визначається тепловим балансом і температурним рівнем фурменої зони, а тому не відповідає вимогам рухливості коксової насадки,

від якої залежить характер противотока в нижній частині печі. Це протиріччя вирішується спільним розглядом зазначених умов для кожного режиму [32].

Таблиця 1.5 - Зміна собівартості чавуну, питома грошова одиниця / тонну

Статті витрат	витрата ГВГ при газифікації кускового вугілля				витрата ГВГ при газифікації дрібнозернистого вугілля			
	440 м ³ /т		720 м ³ /т		440 м ³ /т		800 м ³ /т	
	ХК	НАД	ХК	НАД	ХК	НАД	ХК	НАД
Вартість гарячого відновного газу	+7,89	+5,36	+12,9	+8,77	+10,6	+5,4	+19,3	+9,82
Вартість природного газу	-8,5	-8,5	-8,5	-8,5	-8,5	-8,5	-8,5	-8,5
Вартість зекономленого коксу	-	+3,2	-5,0	-	-1,25	+3,6	-8,8	-
Вартість зекономленого колошникового газу	-0,32	-0,64	-0,53	-1,04	-0,95	-1,22	-1,73	-2,22
зміна вартості чавуну	-0,93	-0,58	-1,13	-0,77	-0,10	-0,72	+0,27	-0,90

Згідно тепловому балансу, при вдування гарячого відновного газу на холодному технологічному кисні економія коксу досягається двома факторами: скороченням витрат тепла на одиницю чавуну і частковою заміною вуглецю коксу, згорає у фурм, вдувати ззовні окисом вуглецю.

У першій-ліпшій нагоді технологія заміни природного газу гарячим відновлювальним газом з температурою 500 °С, отриманим газифікацією вугілля, ефективна. При цьому варіанти холодного кисню дають більш високу економію коксу, але менше зниження собівартості чавуну через великі витрат на отримання відновного газу. При розходженні ефективності вдування продуктів газифікації кускового і дрібнозернистого вугілля для вибору кращих варіантів потрібно визначення величин витрат на їх реалізацію. Основні технічні рішення традиційні і вимагають лише докладної проектного опрацювання для з'ясування складності системи і величини необхідних витрат [33].

2 РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ З МЕТОЮ ВИБОРУ ОПТИМАЛЬНОГО СКЛАДУ І КІЛЬКОСТІ ГАРЯЧОГО ВІДНОВНОГО ГАЗУ, ЯКИЙ ПОДАЄТЬСЯ У ПІЧ

Для оцінки показників роботи доменної печі при вдування гарячого відновного газу для умов доменної печі комбінату "Запоріжсталь" виконані розрахунки за методикою, використовуваної проектними організаціями СНД в якості базової.

В розрахунку прийняті: витрата гарячого відновного газу, що подається в горн або в шахту печі $V_{\text{ГВГ}}$, м³/т чавуну; температура гарячого відновного газу $t_{\text{ГВГ}}$, °С; пайовий вміст компонентів гарячого відновного газу, м³/м³. Розрахунки проводилися на ЕОМ для режимів плавки, що відрізняються різним поєднанням витрати, температури і складу гарячого відновного газу.

У першій серії розрахунків витрата гарячого відновного газу, нагрітого до температури 1250 °С і має наступний склад: 0,5% CO₂, 35% CO, 1,5% N₂, 2,5% H₂O, 60% H₂, 0,5% CH₄, змінювався від 0 до 800 м³/т чавуну (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 - Техніко-економічні показники доменної плавки при зміні витрати гарячого відновного газу, що вдувається в горн доменної печі комбінату "Запоріжсталь"

№ П / П	$V_{\text{ПГ}}$, м ³ /т	$V_{\text{ГВГ}}$, м ³ /т	r_d	КВКО, м ³ / (т · добу)	I_x (за сумарним вуглецем), кг / (м ³ · добу)	К', кг/т	П, т / (м ³ · добу)
1	100	0	0,366	0,469	943,836	443	2,13
2	-	400	0,296	0,377	865,343	326	2,65
3	-	600	0,197	0,356	761,403	271	2,80
4	-	800	0,108	0,335	648,412	217	2,98

При заміні 100 м³ природного газу еквівалентними 400 м³ гарячого відновного газу ступінь прямого відновлення знизилася з 0,366 до 0,296, що дозволило скоротити витрату коксу на 117 кг/т чавуну. Деяко зменшилася величина інтенсивності плавки (за сумарним вуглецю), однак було відзначено збільшення продуктивності (приріст склав 19,6%). Подальше збільшення витрати гарячого відновного газу дозволи-

ло ще більше зменшити ступінь прямого відновлення (до 0,108 при витраті гарячого відновного газу, що дорівнює 800 м³/т чавуну). Продуктивність, в порівнянні з базовим періодом, зросла на 28,5%. Витрата коксу знизився більш ніж в два рази (з 443 до 217 кг/т чавуну).

Наступна серія розрахунків виявила вплив температури гарячого відновного газу, що подається в горн доменної печі, на техніко-економі-етичні показники доменної плавки. Гарячий відновний газ наступного складу: 0,5% CO₂, 35% CO, 1,5% N₂, 2,5% H₂O, 60% H₂, 0,5% CH₄, подавався в кількості 400 м³/т чавуну (табл. 2.2).

Таблиця 2.2 - Техніко-економічні показники доменної плавки при зміні температури гарячого відновного газу, що вдувається в горн доменної печі комбінату "Запоріжсталь"

№ п / п	t _{гвг} , °C	Γ _d	КВКО, м ³ / (т · добу)	I _x (за сумарним вуглецем), кг / (м ³ · добу)	К', кг/т	П, т / (м ³ · добу)
1	1100	0,291	0,383	865,537	332	2,61
2	1200	0,295	0,379	865,378	328	2,63
3	1300	0,298	0,375	865,335	324	2,66
4	1400	0,302	0,372	865,227	322	2,68

Значне поліпшення техніко-економічних показників було досягнуто в початковий період заміни природного газу гарячим відновлювальним газом (1100 °C). Подальше збільшення температури гарячого відновного газу (до 1400 °C) істотних впливів не зробило: інтенсивність плавки залишилася на колишньому рівні, витрата коксу зменшений на 10 кг/т чавуну, продуктивність зросла на 2,6%, навіть дещо збільшилася ступінь прямого відновлення (від 0,291 до 0,302). Це дозволяє зробити висновок про те, що зміна температури гарячого відновного газу, що подається в горн доменної печі, не є суттєвим фактором впливу на техніко-економічні показники доменної плавки. Однак, слід взяти до уваги той факт, що при підвищенні температури гарячого відновного газу на кожні 100 °C витрата коксу знижується на 4 кг/т чавуну, що в масштабах річного випуску чавуну дасть істотну цифру по економії коксу. Це теж слід мати на увазі. що в масштабах річного випуску чавуну дасть істотну цифру

по економії коксу. Це теж слід мати на увазі. що в масштабах річного випуску чавуну дасть істотну цифру по економії коксу. Це теж слід мати на увазі.

Таблиця 2.3 - Техніко-економічні показники доменної плавки при зміні складу гарячого відновного газу, що вдувається в горн доменної печі комбінату "Запоріжсталь"

№ П / П	Склад ГВГ, %				r_d	КВКО, $m^3 / (т \cdot добу)$	I_x (за сумарним вуглецем), $кг / (m^3 \cdot добу)$	K' , $кг/т$	Π , $т / (m^3 \cdot добу)$
	$\Sigma (H_2 + CO)$	$\Sigma (H_2O + CO_2)$	CH_4	N_2					
1	95	3	0,5	1,5	0,296	0,377	865,343	326	2,65
2	94	4	0,5	1,5	0,297	0,378	869,445	329	2,64
3	93	5	0,5	1,5	0,298	0,378	873,748	330	2,64
4	92	6	0,5	1,5	0,298	0,378	877,713	332	2,64

Третя серія розрахунків по вивченню впливу кількості окислювачів в гарячому відновному газі ($V_{ГВГ} = 400 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну, $t_{ГВГ} = 1250 \text{ }^\circ\text{C}$) дає наступні результати (табл. 2.3): техніко-економічні показники трохи погіршуються, що пояснюється збільшенням вмісту окислювачів в гарячому відновному газі. Зростання окислювачів на 1% викликає збільшення витрат коксу на 2-3 кг/т чавуну, на 0,3% знижується продуктивність.

Аналіз результатів розрахунків свідчить, що істотним фактором, що впливає на зміну техніко-економічних показників доменної плавки, є збільшення витрати гарячого відновного газу, що вдувається в горн доменної печі. При вдуванні гарячого відновного газу істотно знижується питома витрата коксу (з 443 кг/т до 217 кг/т чавуну), як за рахунок зменшення кількості вуглецю коксу, що спалюється на фурмах S_ϕ , так і за рахунок зниження кількості вуглецю, що витрачається на пряме відновлення S_d . Ступінь прямого відновлення R_d знижується на 0,070-0,258 (в залежності від витрати гарячого відновного газу) і при витраті гарячого відновного газу $800 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну складає 0,108. Продуктивність може зрости на 28,5%. Збільшення тем-

ператури гарячого відновного газу, що подається в горн доменної печі, не є суттєвим фактором впливу на техніко-економічні показники доменної плавки. Однак, слід взяти до уваги той факт, що при підвищенні температури гарячого відновного газу на кожні 100 °С витрата коксу знижується на 4 кг/т чавуну, що в масштабах річного випуску чавуну дасть істотну цифру по економії коксу. Підвищення вмісту окислювачів гарячого відновного газу дещо знижує техніко-економічні показники. Тому, для досягнення високих техніко-економічних показників, в горн доменної печі слід подавати велику кількість гарячого відновного газу, нагрітого до високої температури, з мінімальним вмістом окислювачів. що при підвищенні температури гарячого відновного газу на кожні 100 °С витрата коксу знижується на 4 кг/т чавуну, що в масштабах річного випуску чавуну дасть істотну цифру по економії коксу. Підвищення вмісту окислювачів гарячого відновного газу дещо знижує техніко-економічні показники. Тому, для досягнення високих техніко-економічних показників, в горн доменної печі слід подавати велику кількість гарячого відновного газу, нагрітого до високої температури, з мінімальним вмістом окислювачів. що при підвищенні температури гарячого відновного газу на кожні 100 °С витрата коксу знижується на 4 кг/т чавуну, що в масштабах річного випуску чавуну дасть істотну цифру по економії коксу. Підвищення вмісту окислювачів гарячого відновного газу дещо знижує техніко-економічні показники. Тому, для досягнення високих техніко-економічних показників, в горн доменної печі слід подавати велику кількість гарячого відновного газу, нагрітого до високої температури, з мінімальним вмістом окислювачів. Підвищення вмісту окислювачів гарячого відновного газу дещо знижує техніко-економічні показники. Тому, для досягнення високих техніко-економічних показників, в горн доменної печі слід подавати велику кількість гарячого відновного газу, нагрітого до високої температури, з мінімальним вмістом окислювачів. Підвищення вмісту окислювачів гарячого відновного газу дещо знижує техніко-економічні показники. Тому, для досягнення високих техніко-економічних показників, в горн доменної печі слід подавати велику кількість гарячого відновного газу, нагрітого до високої температури, з мінімальним вмістом окислювачів.

Таблиця 2.4 - Техніко-економічні показники доменної плавки при зміні витрати гарячого відновного газу, подається в шахту доменної печі комбінату "Запоріжсталь"

№ п / п	$V_{\text{пг}}, \text{ м}^3/\text{т}$	$V_{\text{гвг}}, \text{ м}^3/\text{т}$	r_d	КВКО, $\text{ м}^3 / (\text{т} \cdot \text{добу})$	I_x (за сумарним вуглецем), $\text{ кг} / (\text{ м}^3 \cdot \text{добу})$	K' , кг/т	P , $\text{ т} / (\text{ м}^3 \cdot \text{добу})$
1	100	0	0,366	0,469	943,836	443	2,13
2	-	400	0,281	0,390	886,664	346	2,56
3	-	600	0,171	0,369	803,575	297	2,71
4	-	800	0,067	0,353	712,899	252	2,83

У першій серії розрахунків витрата гарячого відновного газу наступного складу: 3% CO_2 , 24% CO , 2% N_2 , 7% H_2O , 60% H_2 , 4% CH_4 , що має температуру 1050 °С, змінювався від 0 до 800 $\text{ м}^3/\text{т}$ чавуну (табл. 2.4). При заміні 100 м^3 природного газу еквівалентними 400 м^3 гарячого відновного газу ступінь прямого відновлення знизилася з 0,366 до 0,281, що скоротило витрату коксу на 97 кг/т чавуну. Величина інтенсивності плавки (за сумарним вуглецю) зменшилася, але в меншій мірі, ніж при вдування того ж кількості гарячого відновного газу в горн. Збільшивши витрата гарячого відновного газу, стало можливим ще більше зменшити ступінь прямого відновлення (до 0,067 при витраті гарячого відновного газу 800 $\text{ м}^3/\text{т}$ чавуну). Продуктивність, в порівнянні з базовим періодом, зросла на 24,7% (при витраті гарячого відновного газу 800 $\text{ м}^3/\text{т}$ чавуну). Витрата коксу знизилася на 43% (з 443 до 252 кг/т чавуну), як за рахунок зменшення кількості вуглецю коксу, що спалюється на фурмах $S_{\text{ф}}$, так і за рахунок зниження кількості вуглецю, що витрачається на пряме відновлення S_d .

Серія розрахунків по визначенню впливу температури гарячого відновного газу (3% CO_2 , 24% CO , 2% N_2 , 7% H_2O , 60% H_2 , 4% CH_4), що подається в кількості 400 $\text{ м}^3/\text{т}$ чавуну в шахту доменної печі (табл. 2.5), на техніко-економічні показники доменної плавки багато в чому схожа за результатами з вдуванням того ж кількості гарячого відновного газу в горн. Істотне поліпшення техніко-економічних показників досягається лише в початковий період заміни природного газу гарячим відновлювальним газом (1000 °С), подальше збільшення температури якого (до 1200 °С) знач-

них результатів не дало: інтенсивність плавки залишилася на колишньому рівні, витрата коксу скоротився лише на 7 кг/т чавуну, продуктивність зросла на 1,5%.

Таблиця 2.5 - Техніко-економічні показники доменної плавки при зміні температури гарячого відновного газу, подається в шахту доменної печі комбінату "Запоріжсталь"

№ п / п	$t_{\text{ГВГ}},$ °C	r_d	КВКО, м ³ / (т · до- бу)	I_x (за сумарним вугле- цем), кг / (м ³ · добу)	$K',$ кг/т	П, т / (м ³ · до- бу)
1	1000	0,279	0,392	886,750	348	2,55
2	1050	0,281	0,390	886,664	346	2,56
3	1100	0,283	0,389	886,592	345	2,57
4	1150	0,285	0,387	886,546	343	2,58
5	1200	0,286	0,385	886,529	341	2,59

Таким чином, на техніко-економічні показники доменної плавки збільшення температури гарячого відновного газу, що вдувається в шахту доменної печі, істотного впливу зробити не може. Однак, не слід з вищесказаного робити висновок, що в шахту доцільно подавати гарячий відновний газ з відносно невисокою температурою. Слід мати на увазі, що при підвищенні температури гарячого відновного газу на кожні 100 ° C витрата коксу знижується на 3 кг/т чавуну, що в масштабах річного випуску чавуну дозволить істотно заощадити кокс.

Таблиця 2.6 - Техніко-економічні показники доменної плавки при зміні складу гарячого відновного газу, що подається в шахту доменної печі комбінату "Запоріжсталь"

№ п / п	Склад ГВГ, %				r_d	КВКО, м ³ / (т · добу)	I_x (за сумар- ним вугле- цем), кг / (м ³ · добу)	$K',$ кг/т	П, т / (м ³ · добу)
	$\Sigma (H_2 +$ CO)	$\Sigma (H_2O +$ CO ₂)	CH ₄	N ₂					
1	87	7	4	2	0,280	0,389	875,052	340	2,57
2	85	9	4	2	0,279	0,391	882,245	345	2,55
3	83	11	4	2	0,281	0,391	890,496	348	2,55
4	81	13	4	2	0,283	0,392	898,469	352	2,55
5	79	15	4	2	0,287	0,391	907,392	355	2,55

При вивченні впливу кількості окислювачів в гарячому відновному газі ($V_{\text{ГВГ}} = 400 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну, $t_{\text{ГВГ}} = 1050 \text{ }^\circ\text{C}$) отримані наступні результати (табл. 2.6): суттєва зміна техніко-економічних показників досягається при заміні природного газу еквівалентним кількістю гарячого відновного газу. Потім техніко-економічні показники погіршуються, що пояснюється збільшенням вмісту окислювачів в гарячому відновному газі. При збільшенні сумарного вмісту окислювачів ($\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$) від 7 до 15% витрати коксу збільшився на 15 кг/т чавуну, продуктивність при цьому знизилася на 0,7%.

Аналіз результатів розрахунків свідчить, що істотним фактором, що впливає на зміну техніко-економічних показників доменної плавки, є збільшення витрати гарячого відновного газу, що вдувається в шахту доменної печі. При вдуванні гарячого відновного газу істотно знижується питома витрата коксу (з 443 кг/т до 252 кг/т чавуну), як за рахунок зменшення кількості вуглецю коксу, що спалюється на фурмах $S_{\text{ф}}$, так і за рахунок зниження кількості вуглецю, що витрачається на пряме відновлення $S_{\text{д}}$. Ступінь прямого відновлення $r_{\text{д}}$ знижується на 0,085-0,299 (в залежності від витрати гарячого відновного газу) і при витраті гарячого відновного газу $800 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну складає 0,067. Продуктивність при максимальній витраті гарячого відновного газу може зрости на 24,7%. Зміна температури гарячого відновного газу, що подається в шахту доменної печі, не є суттєвим фактором впливу на техніко-економічні показники доменної плавки. Однак, слід взяти до уваги той факт, що при підвищенні температури гарячого відновного газу на кожні $100 \text{ }^\circ\text{C}$ витрата коксу знижується на 3 кг/т чавуну, що в масштабах річного випуску чавуну дасть істотну цифру по економії коксу. Підвищення вмісту окислювачів гарячого відновного газу знижує техніко-економічні показники. Тому в шахту доменної печі слід подавати максимально допустимі витрати гарячого відновного газу з мінімальним вмістом окислювачів.

Аналіз результатів розрахунків свідчить, що найбільшу ефективність від вдування продуктів конверсії природного газу можна отримати при вдуванні гарячого відновного газу в горн печі при оптимальному підборі параметрів комбінованого дуття (витрата природного газу - $200 \text{ м}^3/\text{т}$, температура дуття - $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ і вміст кисню

в дуття 25%). При такому режимі істотно збільшується продуктивність печі (до 28,5%). Питома витрата коксу знижується вдвічі в порівнянні з базовим періодом (з 443 кг/т до 217 кг/т чавуну). Трохи нижче, однак теж вельми сприятливі показники при вдування гарячого відновного газу в нижню частину шахти печі. Продуктивність при подачі в шахту гарячого відновного газу в кількості 800 м³/т чавуну зростає на 24,7%. Є всі підстави припустити, що при зниженні вмісту окислювачів до мінімальних меж стане можливим досягти, а, можливо, і перевищити значення по продуктивності і витраті коксу, властиві плавці при вдування гарячих відновних газів в горн. Однак розрахункові значення продуктивності можуть бути досягнуті лише в тому випадку, коли верхня зона печі ("суха зона") не лімітує щодо газодинаміки. При цьому максимальною витратою гарячих відновлювальних газів, вдихається в нижню частину шахти, можна вважати 800 м³/т чавуну. коли верхня зона печі ("суха зона") не лімітує щодо газодинаміки.

Проектної вибирається технологія вдування гарячого відновного газу в шахту, що володіє наступними перевагами перед вдуванням його в горн:

- Газ, що вдмухується, може містити значно більше окислювачів (до 12-15%), які в цьому випадку тільки знижують відновну здатність газу, але при температурах горизонту вдування (1000-1100 °С) не можуть в помітну мірою реагувати з вуглицем коксу; тому для гарячого відновного газу, що вдувається в шахту, стає необов'язковою дорога операція очищення його від окислювачів; несуттєвим для нього є також кілька підвищених вміст СН₄ і сажистого вуглецю;

- відновний газ вдувається безпосередньо в область протікання процесів непрямого відновлення; в нижерозташованій частині печі, в більшості випадків найбільш напруженою в газодинамічному відношенні, кількість газів не зростає (навіть дещо скорочується завдяки зниженню відносної витрати коксу), що дозволяє підвищити продуктивність;

- фізичне тепло гарячого відновного газу також вноситься безпосередньо в ту область печі, в якій при низькій витраті коксу і високої концентрації кисню в дуття, температури шихти і газу надмірно знижуються.

При вдуванні гарячого відновного газу в нижню частину шахти печі істотно знижується питома витрата коксу (з 443 кг/т до 252 кг/т чавуну), як за рахунок зменшення кількості вуглецю коксу, що спалюється на фурмах C_f , так і за рахунок зниження кількості вуглецю, витрачається на пряме відновлення C_d . Ступінь прямого відновлення r_d знижується на 0,085-0,299 (в залежності від витрати гарячого відновного газу) і при витраті гарячого відновного газу $800 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну складає 0,067. Однак, і при вдування гарячого відновного газу до $800 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну в нижню частину шахти, як показали виконані розрахунки, можна отримати суттєвий ефект лише при відповідній підготовці шихтових матеріалів. В цілому, витрата коксу може бути зменшений на 30-43%, а продуктивність печі може зрости до 24,7%.

3. ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ВИТРАТИ ГАРЯЧОГО ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО ГАЗУ У ТЕХНОЛОГІЧНИХ УМОВАХ УКРАЇНИ

Сучасна технологія виробництва чавуну характеризується високим ступенем ефективності. Насамперед це коефіцієнт корисної дії печі – 85-90 %, низький рівень витрати палива – 450-500 кг умовного палива на 1 т чавуну, що виплавляється, висока одинична потужність металургійного агрегату. Для забезпечення даних технологічних показників застосовується залізорудна сировина із вмістом заліза 60-65 %, і, найголовніше, кокс, вироблений з дефіцитного коксівного вугілля. Для одержання коксу використовуються високоякісні низькозольні коксівні вугілля, запаси яких нині значно виснажені в Україні, на відміну від запасів енергетичного вугілля з високим вмістом золи та сірки. Значна частина коксівного вугілля імпортується, в основному з Росії та Польщі. Перед України припадає 3,5 % світових запасів вугілля [1], яких за існуючого рівня видобутку вистачить на 350-400 років. Таким чином, необхідно задіяти весь потенціал рядового кам'яного вугілля не тільки в енергетиці, а й у металургії, зокрема у доменному виробництві.

Починаючи з 50-х років ХХ століття стали застосовувати замітники коксу – природний газ, мазут, пиловугільне паливо (ПВП). Але в даний час вартість 1 тис. м³ природного газу та 1 т мазуту можна порівняти з собівартістю 1 тонни чавуну. Тому найбільшого поширення набула технологія з вдуванням в горну доменну печі пиловугільного палива. До вугілля, що використовується для приготування ПВП, пред'являють серйозні вимоги - низьку зольність (до 10-12%), низький вміст сірки, а вміст летючих коливається в залежності від витрати ПВП та технології - 5-40%. Існуючий рівень технології дозволяє вдувати до 250-260 ПВП кг/т чавуну, що обмежує можливості заміни коксу менш дорогим енергетичним вугіллям. Головною причиною цього є неповна газифікація вугілля у фурменній зоні печі, низькі показники якості коксу – реакційна здатність (CRI) та гаряча міцність (CRS). Одним з варіантів вирішення цієї проблеми є отримання гарячого відновного газу (ГВГ) (таблиця 3.1) з рядового вугілля поза доменною печі з температурою 800-1300 °С та вмістом відновників CO+H₂ 85-95% .

Таблиця 3.1 – Дослідні та промислові плавки із застосуванням гарячих відновлювальних газів [4,5,6]

Дослідні плавки	Рік	додаткова інформація
Франція, м. Кнютанж	1957 р.	Вдування у верхню частину заплічків, $t_{ГВГ}$ 1200 °С, склад ГВГ, %: 26,5 H_2+CO , 5 CO_2 , 0,5 O_2 , 66,5 N_2
Франція, м. Помпей	1961 р.	Паро-кисневий крекінг мазуту, $t_{ГВГ}$ 1300 °С, склад, %: 46,1 H_2 , 46,9 CO , 4,3 CO_2 , 2,7 N_2 , 8 % вуглецю мазуту не газифікувався, нерівномірний розподіл за перерізом печі, коефіцієнт K_3) коксу 0,7 кг/кг мазуту
Україна, МК «Азовсталь», м. Маріуполь	1964-1966 р.р.	1 етап: парова конверсія природного газу, вдування в горн печі, роздільне підведення ГВГ і дуття, низький ступінь використання H_2 , CO_2+H_2 в ГВГ 3%. 2 етап: вдування ГВГ спільно з холодним природним газом, рівномірний розподіл газу по перерізу печі, помітне зниження g_d
Росія, Новотульський металургійний завод, м. Тула	1965-1968 рр.	Вдування ГВГ у горн, конверсія природного газу водяною парою та CO_2 колошникового газу, роздільна подача дуття та ГВГ через різні фурмові прилади; робота на ГВГ без дуття, зниження g_d до 0,11
Японія, МК "Кейхін"	1958-1960 рр.	Парококснева конверсія мазуту, спосіб FTG, вдування ГВГ у шахту печі, зниження g_d до 0,15, K_3 0,8 кг/кг ГВГ
Японія, м. Хірохата	1970-1971 рр.	Вдування в шахту, K_3 0,25-0,3 кг/м ³ ГВГ, склад ГВГ, %: 50 H_2 , 40,4 CO , 3 CO_2 , 6 H_2O
Бельгія, м. Угри	1970 р.	Вдування ГВГ у шахту, $t_{ГВГ}$ – 1300 °С, склад: 77 H_2+CO , 2 CH_4 , 21 % H_2O+CO_2 , K_3 0,147 кг/м ³ ГВГ
Бельгія, м. Серена	1972 р.	Вдування ГВГ у шахту, склад ГВГ, %: 71 H_2 , 17 CO , 3 - CH_4 , 3 CO_2+H_2O , K_3 - 0,22-0,26 кг/м ³ ГВГ.
Росія, Новотульський металургійний завод, м. Тула	1987-1989рр.	Вдування ГВГ в горн, рециркуляційний режим, повна заміна дуття ГВГ, витрата 665-998 м ³ /т чавуну, $t_{ГВГ}$ - 1082-1120 °С, досягнуто витрата коксу 335 кг/т чавуну.
Швеція, м. Лулео	2008 р.	Проект ULCOS (киснева доменна плавка з рециркуляцією колошникового газу)

З таблиці видно, що основний спосіб отримання ГВГ це конверсія газу або мазуту. Недолік існуючих способів конверсії полягає у використанні дорогих каталізаторів, складності технології, вміст значної кількості сажі та окислювачів.

У статті [7] запропоновано один із варіантів отримання ГВГ шляхом газифікації вугілля в процесі рідкофазного відновлення Ромелт. Особливістю даної технології є одержання поруч із рідким чавуном ГВГ з найдешевших енергетичних вугілля, обсяг ГВГ на тонну чавуну становить 3500-4500 м³. Розрахунковим шляхом показа-

на можливість отримання відновлювального газу із складом $CO+H_2$ до 85-90 %, окислювачів 4-6 % та температурою 1000-1300 °С.

Значний вміст відновників та порівняно низький вміст окислювачів у поєднанні з високою температурою визначають високу перспективність використання ГВГ у доменній плавці.

Метою даної роботи є визначення оптимальної витрати ГВГ у технологічних умовах України як при вдуванні в горн спільно з пилокутним паливом (ПУТ) так і окремо, оцінка коефіцієнта заміни коксу ГВГ.

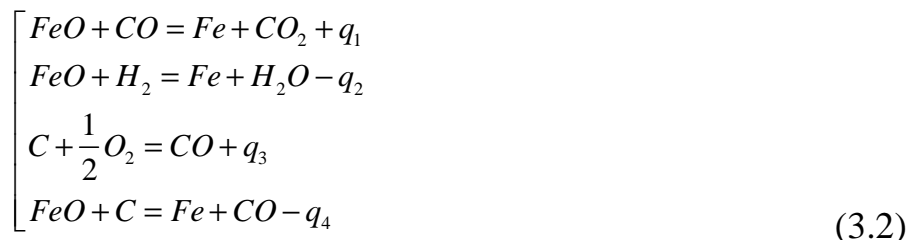
Специфіка роботи доменних цехів України полягає у застосуванні залізорудної сировини з низьким вмістом заліза та низькоякісного коксу з високим вмістом золи, сірки, низьким ступенем гарячої міцності (CRI) та високою реакційною здатністю (CRS). Дані умови призводять до високого виходу шлаку – 300-350 кг/т чавуну та більше, зниження продуктивності та газопроникності зони когезії. Отже, для розрахунку оптимальної витрати ГВГ необхідно врахувати визначальні параметри газодинаміки – швидкість газу розпарі, м/с, вихід шлаку і горнових газів на тонну коксу [8].

Для розрахунку основних показників доменної плавки було обрано комплексний метод Рамма. Початковий режим доменної плавки прийнятий без вдування додаткового палива, залізорудна сировина - котуни з вмістом заліза 61% і основністю 0,8, витрата коксу - 545 кг/т чавуну, вихід шлаку 330 кг/т чавуну. Параметри дуття: температура – 1000 °С, вологість – 12 г/м³ дуття, кисень – 0,21 м³ O₂/м³ дуття.

Так як дослідно-промислові плавки дають занадто великий розкид значень K_3 коксу, був розрахований коефіцієнт заміни тепломістку ГВГ з урахуванням витрат тепла на розкладання H_2O+CO_2 (3.1) і ряду реакцій (3.2).

$$I_{ГВГ} = T_{ГВГ} \cdot c_0 \cdot (CO + H_2 + N_2) + (T_{ГВГ} \cdot c_{CO_2} - 12645) \cdot CO_2 + (T_{ГВГ} \cdot c_{H_2O} - 10800) \cdot H_2O \quad (3.1)$$

де $T_{ГВГ}$ – температура ГВГ, °С; c_0, c_{CO_2}, c_{H_2O} – теплоємність газів за температури $T_{ГВГ}$; 12645 та 10800 – витрати тепла на розкладання 1 м³ CO₂ та H₂O; CO, H₂, N₂, CO₂, H₂O – вміст компонентів %.



де $q_1 = 243$ кДж/кг Fe, $q_2 = -496$ кДж/кг Fe,
 $q_3 = 9800$ кДж/кг, $q_4 = -2762$ кДж/кг Fe – теплові ефекти реакцій.

Втрати тепла в нижній зоні (рівень фурм, заплічки, розпар) приймаємо 7% від приходу тепла у зоні фурмену. Коефіцієнти заміни для ГВГ із складом CO 80 %, H₂ 10 %, CO₂ 2 %, H₂O 3 %, N₂ 5%, температурою від 700 до 1200 °С та ступенем використання відновлювальної здатності монооксиду вуглецю та водню η_{H_2+CO} 0,4, 0,42 та 0,45 представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Коефіцієнти заміни коксу при різних ступенях використання η_{H_2+CO} та температурах ГВГ

Температура, °С	Коефіцієнт заміни		
	$\eta_{H_2+CO} = 0,4$	$\eta_{H_2+CO} = 0,42$	$\eta_{H_2+CO} = 0,45$
700	0,272	0,275	0,293
800	0,286	0,289	0,308
900	0,292	0,305	0,323
1000	0,308	0,320	0,338
1100	0,322	0,335	0,351
1200	0,338	0,351	0,367

Як видно з таблиці 3.2, гарячі відновлювальні газы мають значний потенціал заміни коксу. Велике значення коефіцієнти заміни грає ступінь використання віднов-

лювального газу, тому необхідно правильно організувати розподіл шихти по всій висоті печі для кращої відновлюваності залізородних матеріалів.

Для розрахунку параметрів доменної плавки прийємо температуру ГВГ 900 °С, ступінь використання $\eta_{\text{H}_2+\text{CO}}$ 0,42 та K_3 0,305. Результати розрахунку витрати коксу, виходу шлаку та горнових газів на тонну коксу, швидкості газу в розпарі наведено на рисунках 3.1, 3.2 і 3.3. Пунктирними лініями виділено граничні значення величин, при перевищенні яких спостерігатиметься порушення ходу доменної печі.

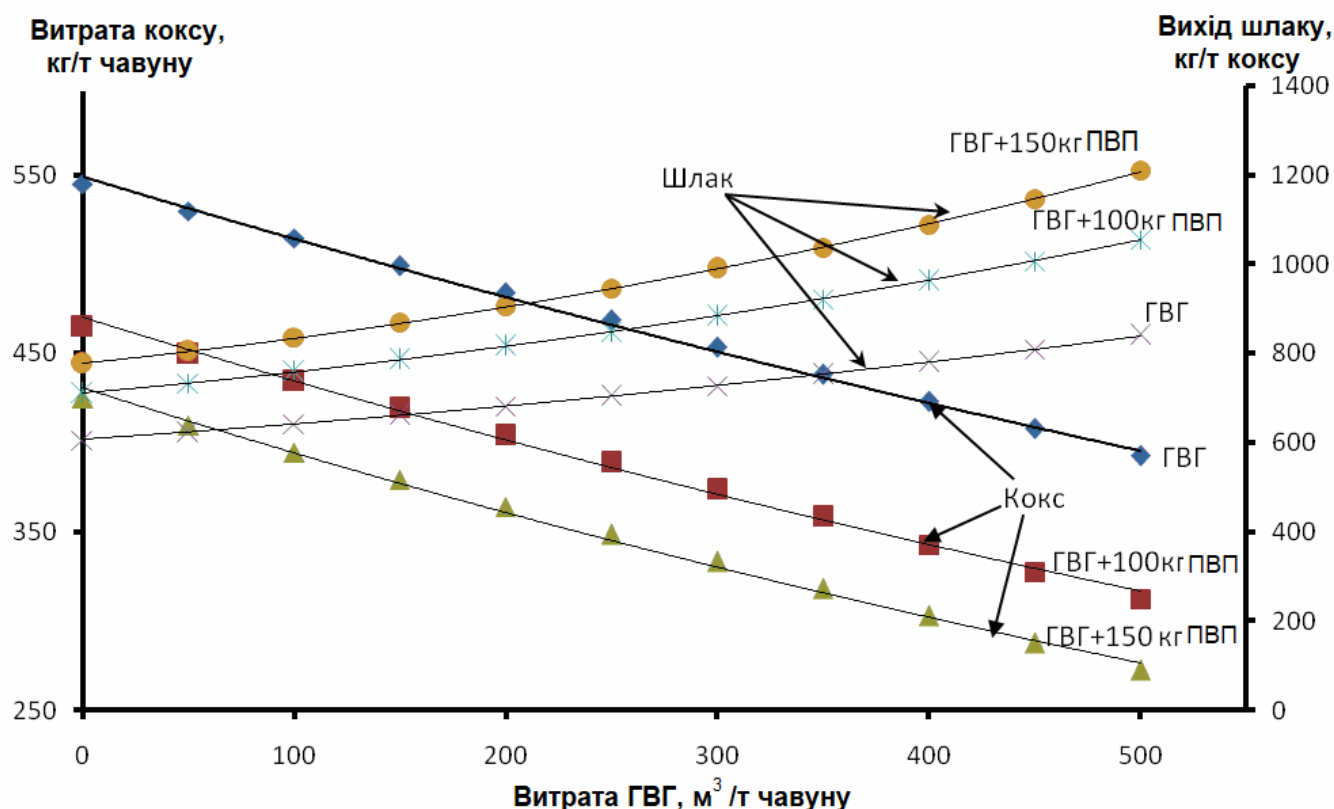


Рисунок 3.1 – Залежність витрати коксу та виходу шлаку на тонну коксу від витрати ГВГ та ПВП

З рисунка 3.1 видно, що витрата коксу знижується прямопропорційно зі збільшенням витрати ГВГ та ПВП. Граничний вихід шлаку (1000 кг/т коксу) спостерігається в режимах 100 кг ПВП+450 м³ ГВГ та 150 кг ПВП+250 м³ ГВГ. При застосуванні лише ГВГ без інших видів додаткового палива стабільність роботи печі досягається у всіх режимах.

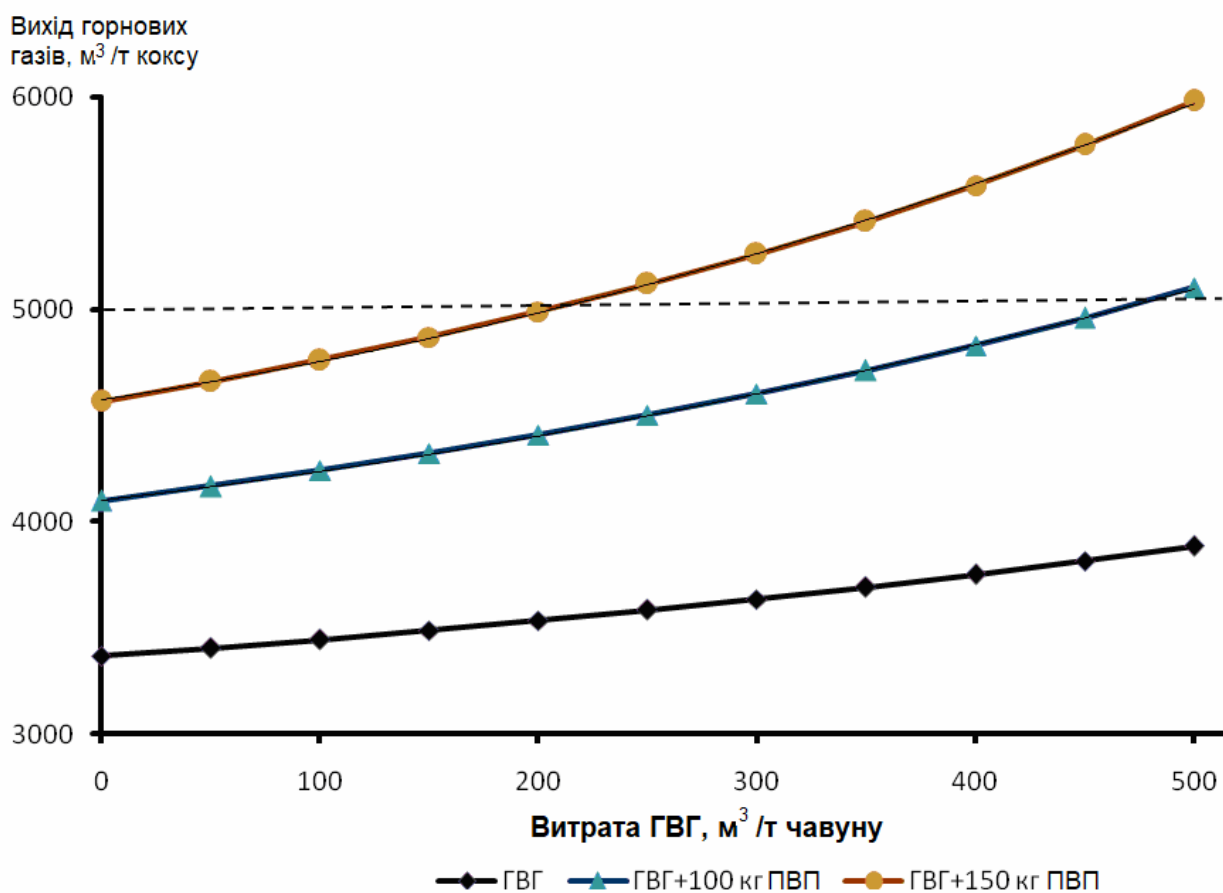


Рисунок 3.2 – Залежність виходу горнових газів від витрати ГВГ та ПВП

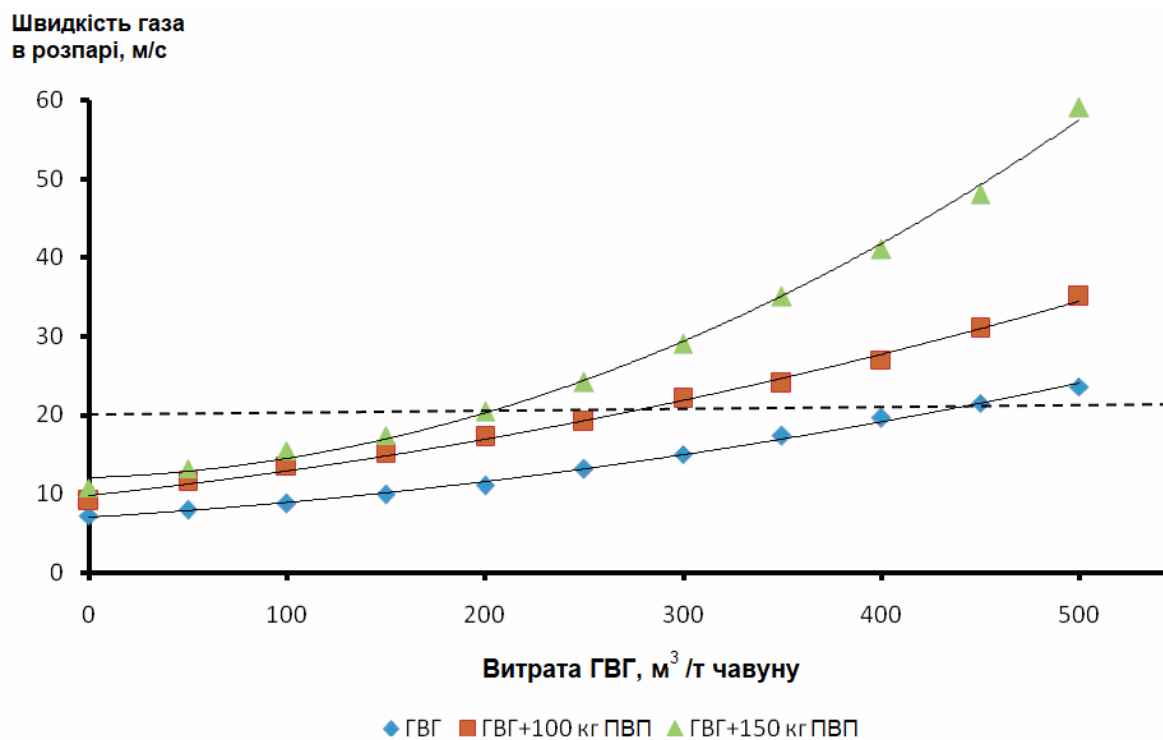


Рисунок 3.3 – Залежність швидкості газу в розпарі від витрати ГВГ та ПВП

При обліку виходу горнового газу як визначального параметра ходу процесу граничними режимами є 150 кг ПВП+200 м³ ГВГ і 100 кг ПВП+470 м³ ГВГ. Застосування лише ГВГ не лімітує процес.

Найбільший вплив на хід процесу має швидкість газу в розпарі, так як при перевищенні швидкості 20 м/с вже спостерігаються підвисання шихти та каналний хід. Граничні режими – 150 кг ПВП+200 м³ ГВГ, 100 кг ПВП+280 м³ ГВГ, 450 м³ ГВГ.

Зроблено аналіз вдування ГВГ у горн доменної печі, на прикладі розрахунків показано залежність коефіцієнта заміни коксу ГВГ від температури та ступеня використання CO+H₂. Визначено оптимальні (граничні) режими: для технології з вдуванням лише ГВГ – 450 м³ ГВГ/т чавуну, з витратою 100 кг ПВП/т чавуну – 280 м³ ГВГ/т чавуну, із витратою 150 кг ПВП/т чавуну – 200 м³ ГВГ/т чавуну.

4 ОРГАНІЗАЦІЙНО-ЕКОНОМІЧНІ РОЗРАХУНКИ

А.Н. Рамм здійснив низку розрахунків для визначення показників реформування природного газу різними методами і технічних показників доменної плавки з вдуванням гарячих продуктів конверсії природного газу (табл. 4.1).

Таблиця 4.1 - Техніко-економічні показники доменної плавки з вдуванням гарячих відновлювальних газів, отриманих різними способами

показники	без вдування газу	З вдуванням			
		Холодного природного газу	Продуктів кисневої конверсії	продуктів парової конверсії	Продуктів конверсії газом
Витрата газу, що вдувається, $\text{нм}^3 / \text{кг } \text{C}_\phi$	-	0,275	1,833	1,760	2,018
Частка кисню непрямого відновлення, віднімати окисом вуглецю	0,957	0,768	0,718	0,614	0,806
Ступінь прямого відновлення заліза	0,550	0,438	0,421	0,357	0,426
Кількість вуглецю коксу, згорає у фурм, кг/т чавуну	313	285	262	257	253
Витрата вуглецю на пряме відновлення, кг/т чавуну	130	107	104	91	105
Витрата коксу (сухого), кг/т чавуну	558	500	470	450	461
Витрата природного газу, $\text{нм}^3/\text{т}$ чавуну	-	78	102	118	56
Витрата дуття для доменної плавки, $\text{нм}^3/\text{т}$	1394	1457	1166	1147	1129
Витрата дуття (95% O_2) для конверсії та газифікації сажі, $\text{нм}^3/\text{т}$ чавуну	-	-	245	-	-
Витрата доменного газу для конверсії, $\text{нм}^3/\text{т}$ чавуну	-	-	-	-	340
Витрата пара для конверсії	-	-	-	96	-
Вихід колошникового газу, $\text{нм}^3/\text{т}$ чавуну: Сухого газу	1919	2038	2003	1885	2017
водяної пари	13	81	100	146	69
вологого газу	1932	2119	2103	2031	2086
Склад конвертованого газу, %:					
CH_4	-	-	5,3	5,6	3,2
CO_2	-	-	3,4	3,8	9,5
H_2O	-	-	8,8	9,2	10,4
CO	-	-	28,2	22,9	39,7
H_2	-	-	52,1	58,5	35,8
N_2	-	-	2,2	-	1,4
Продуктивність доменної печі, %	100,8	100,0	113	118	110
Витрата тепла на виробництво газу, $\text{ккал} / \text{м}^3$	-	-	1870	6430	15300

За результатами розрахунків видно, що вдування газу, отриманого методом термокрекінга і подальшої газифікації сажі, забезпечило б найбільше скорочення витрат коксу і сумарних витрат, але здійснення цього методу пов'язано з істотними технічними труднощами.

З трьох інших методів конвертації природного газу (повітрям, водяною парою і двоокисом вуглецю) подальшої розробки заслуговує, мабуть, тільки метод повітряної конверсії, що вимагає найменших капітальних витрат, і метод парової конверсії, що дозволяє отримати найбільшу економію коксу і найбільший приріст продуктивності.

Конверсія доменним газом дозволяє отримати приблизно таку ж економію коксу, що і повітряна, але вимагає значно більших капітальних витрат і дає меншу продуктивність, ніж перші два методи, а тому конкурувати ні з одним з них не може [3].

Найбільш переважно з економічних міркувань застосування однієї з альтернативних технологій отримання гарячих відновлювальних газів з більш дешевого, ніж природний газ, сировини - коксового, доменного газів, низькосортного некоксівного вугілля. Однак їх використання не завжди можливо і виправдано при розгляді організаційної сторони питання.

Як правило, способи конверсії коксового газу розроблені для адаптації їх в коксових цехах металургійних заводів; так, наприклад, для комбінату "Запоріжсталь" питання про забезпечення доменного цеху коксівним газом практично нерозв'язний.

Значну економію коксу та істотне підвищення продуктивності печі забезпечила б інтенсифікація процесу вдування гарячого відновного газу, отриманого конверсією доменного газу. Однак, технологічна схема процесу передбачає спорудження складного комплексу агрегатів з двох повітряних нагнітачів, обладнаних холодильниками-теплообмінниками, установки для видалення CO_2 з колошникового газу, трьох регенеративних газонагрівачів і трьох компресорів для подачі кисню в фурмені зону печі. Крім того, в комплекс має входити система енергозабезпечення об'єктів, що включає електроживлення, подачу пари, води, азоту і т.д. Таким чином, впрова-

дження цієї технології вимагає значних капітальних витрат, можливість виправдан-
ня яких не доведена.

Раціональними будуть впровадження на доменній печі методу повітряної (ки-
сневої) конверсії природного газу і спосіб газифікації вугілля в переобладнаному
повітронагрівачі або додатково спорудженому подібному агрегаті. Істотною перева-
гою кисневої конверсії є також можливість її здійснення в широкому інтервалі тис-
ків, непотрібність дорогої очищення вихідної сировини від сірки, що необхідно при
каталітичних процесах. Процес конверсії легко керований і установка може працю-
вати в автоматичному режимі. Аналогічні компактні установки досить значний час
працюють в хімічній промисловості в Тольятті на НВО "Куйбишевазот" і в Новомо-
сковську. Недоліком кисневої конверсії є високі витрати на кисень.

В цілому, визнано за доцільне використовувати в доменному цеху комбінату
"Запоріжсталь" метод кисневої конверсії природного газу, який здійснюється в ма-
логабаритних газопальникових пристроях. Відновлювальний газ найефективніше
працює в шахті печі, тому місцем вдування обрана нижня частина шахти печі, що
доцільно також з урахуванням дотримання вимог техніки безпеки. У цьому варіанті
подається відновний газ потрапляє в "суху" зону, тобто в область, де залізорудний
матеріал знаходиться в твердому стані (температура плавлення агломерату місцевої
аглофабрики 1220-1240 °С). Тому при вдування продуктів конверсії слід очікувати
задовільного проникнення струменя газу в шар залізорудної шихти. При подачі га-
рячого відновного газу в шахту печі ступінь прямого відновлення знизиться до
0,067.

4.1 Дослідження процесу кисневої конверсії природного газу для умов до- менної печі комбінату «Запоріжсталь»

Для модернізації процесів конверсії природного газу здійснена серія експери-
ментів на дослідній установці продуктивністю 1500 м³/год. У відповідності зі схе-
мою, запропонованої комбінату для впровадження, експерименти проводилися з ви-
користанням холодного природного газу без попереднього підігріву.

Перед експериментом проведено розрахунок кількості кисню, яке необхідно направити на розкладання природного газу, що надходить в доменну піч комбінату для його неповного розкладання. Обсяг кисню, необхідний для неповного спалювання природного газу, визначається за формулою:

$$V_{O_2} = 0,5CH_4 + C_2H_6 + 1,5C_3H_8 + 2C_4H_{10} + 2,5C_5H_{12}, \text{ м}^3 / \text{ м}^3, \quad (4.1)$$

де CH_4 , C_2H_6 , C_3H_8 і т.д. - процентний вміст вуглеводнів в природному газі, %.

Для умов комбінату "Запоріжсталь":

$$V_{O_2} = 0,5 \cdot 93,0 + 3,0 + 1,5 \cdot 0,8 + 2 \cdot 0,4 + 2,5 \cdot 0,1 = 0,52 \text{ м}^3 / \text{ м}^3 \quad (4.1)$$

Якщо ж витрата кисню буде нижче, ніж $0,52 \text{ м}^3 / \text{ м}^3$, частина вуглеводнів буде розкладатися в результаті гідролізу з виділенням сажистого вуглецю. Однак в реальних умовах не завжди можливо добитися ідеального змішування кисню з природним газом, що може привести до деякого випадання сажі. Крім того, необхідно забезпечити теплову сторону процесу.

Обсяг відновного газу, що виділився в результаті процесу конверсії, можна визначити за такою формулою:

$$V_{\text{в.г.}} = 3CH_4 + 5C_2H_6 + 7C_3H_8 + 9C_4H_{10} + 11C_5H_{12}, \text{ м}^3 / \text{ м}^3; \quad (4.2)$$

$$V_{\text{в.г.}} = 3 \cdot 93 + 5 \cdot 3 + 7 \cdot 0,8 + 9 \cdot 0,4 + 11 \cdot 0,1 = 3,04 \text{ м}^3 / \text{ м}^3 \quad (4.2)$$

У той же час досвід спалювання показує, що кількість теплоти, що виділяється при неповному спалюванні природного газу недостатньо для автотермічного протікання процесу конверсії. Тому процес розкладання природного газу, як правило, протікає з надлишком кисню, в результаті чого в відновному газі з'являються CO_2 і H_2O .

Повнота взаємодії природного газу і кисню також залежить від типу і конструкції пальника-змішувача. На пропонуваній установці по отриманню гарячого відновного газу спалюванням природного газу в струмі кисню для змішування використовується тороїдальний пальник: взаємодія здійснюється в футерованій камері. Змішувач має найкращими характеристиками і досить задовільно зарекомендував себе на підприємствах хімічної промисловості.

Розігрів футерування реакційної камери і вихід в режим конверсії відбувається за наступним графіком (рис. 4.1).

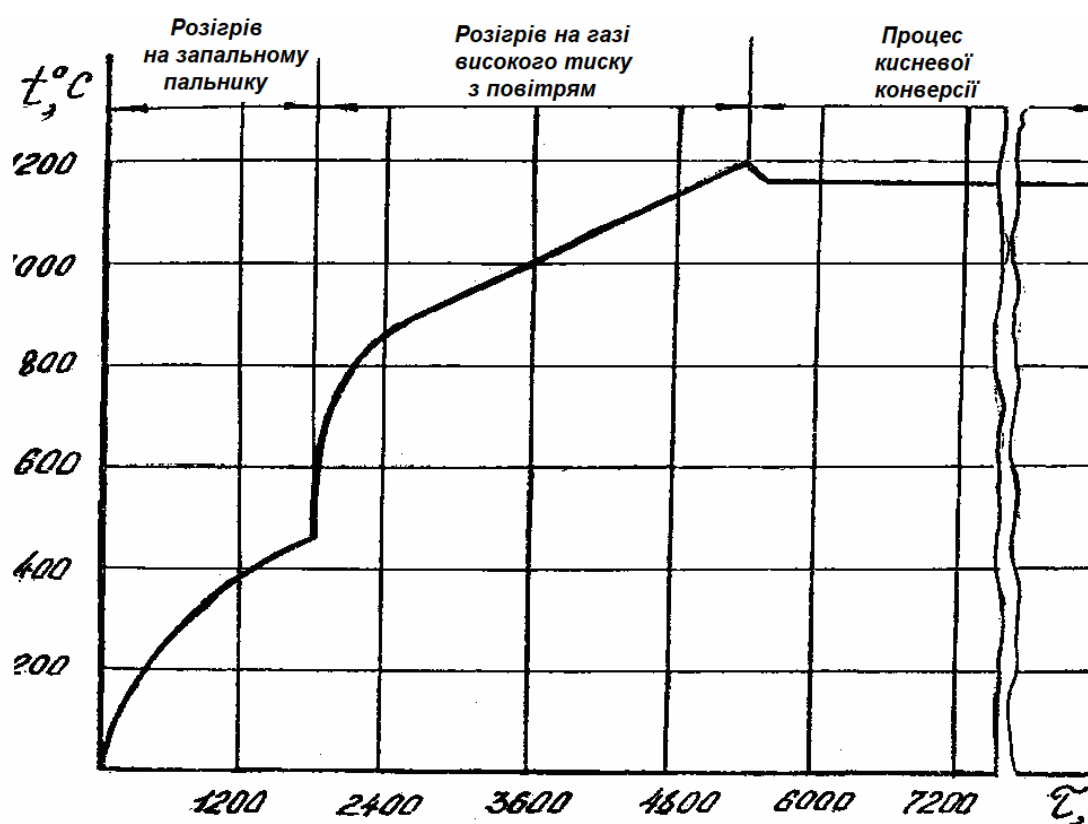


Рисунок 4.1 - Графік розігріву реакційної камери і переведення в режим процесу конверсії

Спочатку до температури 450 ° C протягом 30 хвилин розігрів здійснюється на запальному пальнику щоб уникнути термічного удару, який може привести до виходу з ладу вогнетривку футеровку реакційної камери. Далі установка переводиться на розігрів за допомогою випробовуваної пальника - природний газ високого тиску змішується з подаються в конверсаппарат атмосферним повітрям. При досягненні

температури вище 1100 ° С установка переводиться в режим кисневої конверсії. Загальний час - 1,5 години. При короткочасних же зупинках доменної печі зниження температури футеровки конверсійної установки буде незначним і при задування печі конверсапарат відразу може переходити в робочий режим.

Для виявлення впливу співвідношення кисень - природний газ на температуру і склад газу-відновника був проведений ряд дослідів, в ході яких $V_{O_2} / V_{пг}$ змінювалося від 0,52 до 0,66.

Зміна складу і температури відновного газу в залежності від співвідношення кисень - природний газ приведено в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2 - Склад конвертованого газу, пропонованого для подачі в доменні печі комбінату "Запоріжсталь"

№ П / П	$V_{O_2} / V_{пг}$	CO ₂	CO	N ₂	H ₂ O	H ₂	CH ₄	t _{ГВГ}
1	0,52	3,3	27,8	2,3	7,3	50,3	9,0	1079
2	0,56	3,3	28,0	2,3	8,0	51,6	6,8	1107
3	0,60	3,4	28,2	2,3	8,8	52,1	5,3	1127
4	0,63	3,4	28,4	2,2	10,0	51,7	4,3	1139
5	0,66	3,4	28,7	2,1	11,4	50,4	4,0	1144

На рис. 4.2 наведені дані про зміну обсягу конвертованого газу, що припадає на 1 м³ природного газу витрачається на конверсію.

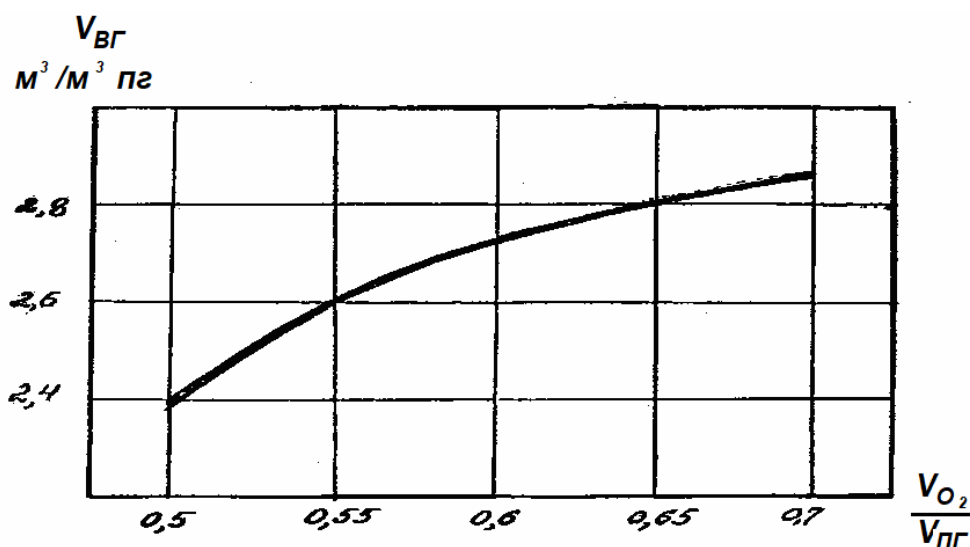


Рисунок 4.2 - Залежність обсягу відновного газу від співвідношення витрати кисню і природного газу

Для умов роботи доменних печей комбінату "Запоріжсталь" оптимальний склад відновного газу зафіксований при величині відношення кисень - природний газ, яка дорівнює 0,63. В цьому випадку сумарна концентрація окислювачів - 13,4%. Відносно невелика вміст залишкового метану - 4,3%, а температура відновного газу - 1139 ° С; при цьому на кожен 1 м³ природного газу утворюється 2,8 м³ відновного [4].

4.2 Технічна характеристика промислової установки по конверсії природного газу

Установка для отримання відновного газу за рахунок кисневої конверсії природного газу розміщується на території доменної печі на мінімально можливому за умовами відстані від точок введення.

Принципова схема конверсустановки складається з трьох основних частин: змішувача, реакційної камери і пневматично-відсічного вузла. Крім них до складу установки входять: пусковий пальник, кільцевої газопровід, фурмені прилади, тракти подачі кисню (1), природного газу (2), водяної пари (3), системи КВП і автоматики (рис. 4.3).

Для проведення інтенсивного змішування природного газу з технічним киснем в процесі конверсії використовується змішувач з газодинамічною зоною змішування у вигляді вихрового тороїда. Тороїдальна форма зони змішування створюється за рахунок наявності полуобтічного конусоподібного тіла (3), що охолоджується водою і змонтованого по осі змішувача, а також горілчаного каменю (14), що встановлюється на вихлопі змішувача. Кисень закінчується з зовнішнього кільцевого кисневого сопла і в цій зоні відбувається початковий етап процесу конверсії. Подальший процес кисневої конверсії протікає в футерованій вогнетривкій реакційній камері (9). Природний газ спливає з внутрішнього кільцевого газового сопла, температура в зоні горілчаного каменю може досягати 1600 °С.

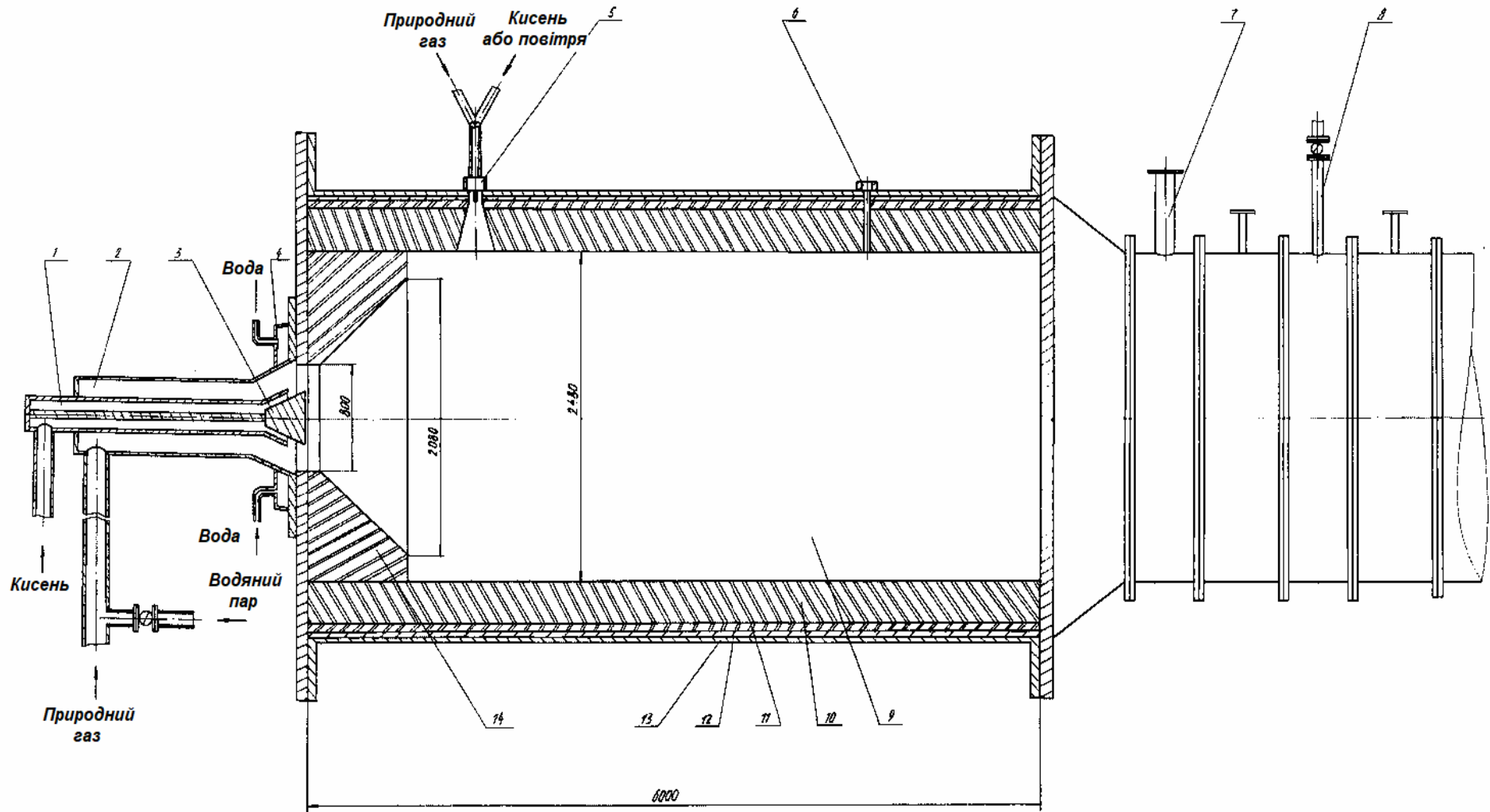


Рисунок 4.3 - Схема конверсустановки

Змішувач має торцевий холодильник (4) з водяним охолодженням. Використання холодильника забезпечує життєздатність сопел і інших вузлів змішувача на вихлопі. З метою зменшення сажоутворення при кисневої конверсії передбачена подача водяної пари і потік природного газу. Матеріал змішувача - нержавіюча сталь.

У реакційній камері протікає і завершується процес кисневої конверсії. Можлива температура процесу становить 1100-1400 °С. Для забезпечення стійкості і допустимої температури зовнішньої поверхні реакційної камери футерування її виконується тришарової. У стінах реакційної камери є отвори для введення і кріплення пусковий пальника (5), термопари (6) і датчика полум'я. Край отвори для введення пусковий пальника знаходиться у торця горілчаного каменю. Ось отвори введення термопари відстоїть на 150-200 мм від правого торця реакційної камери. Корпус реакційної камери повинен витримувати тиск понад 6,0 кг · с / см². Корпус прийнятий без водяного охолодження.

Вимірювання температури здійснюється за допомогою стандартних термопар з межами вимірювання 300-1600 °С. Термоелектричний матеріал поміщений в арматурі з корундових трубок і чохлах.

Відсічні пристрої тракту конверсгаза призначені для відключення конверсаппарата від робочого простору доменної печі і організації продувки трактів конверсаппарата перед пуском або після зупинки. Пристрої працюють в двопозиційному режимі - "відкрито-закрито".

Відсічні пристрої необхідно виконати водоохолоджуваними. При розбіжності розмірів відсічного пристрою і реакційної камери встановлюється конічний перехід, футерований вогнетривом. Між відсічними пристроями встановлюється свічка (8) для виходу конвертованого газу. Пусковий пальник включається при пуску конверсаппарата. Вона має електропусковий пристрій для запалювання суміші, попередньо підготовленої в змішувачі пусковий пальника. Вузол запалювання пальника включає в себе електричний запальник (свічку) з індивідуальним підведенням і відводом горючої суміші.

Пальник оснащена індикатором полум'я. Після цього конвертований газ подається в кільцевий газопровід, за допомогою якого розподіляється по газовим фур-

мам. З однієї конверсійної установки конвертований газ розподіляється через один кільцевої газопровід по 8-ми газовим фурмам. Гарячий відновний газ подається в нижню частину шахти печі через фурмені прилади, що володіють підвищеною герметичністю. За результатами досліджень встановлено, що для умов комбінату "Запоріжсталь" при установці на шахті печі восьми газових фурм найбільша глибина проникнення відновного газу спостерігається при величині діаметра фурми - 130-140 мм і досягає її в точці вдування, що дорівнює ~ 0,05 діаметра шахти.

Установка для конверсії природного газу працює в автоматизованому режимі. Автоматично підтримується співвідношення природний газ - кисень в процесі конверсії [4].

4.3 Розрахунок економічної ефективності застосування гарячих відновлювальних газів з температурою 1050 °С на доменній печі № 3 металургійного комбінату «Запоріжсталь»

Таблиця 4.3 - Вихідні дані для розрахунку економічної ефективності застосування гарячих відновлювальних газів

Найменування	Одиниця виміру	кількість
Продуктивність печі до застосування гарячих відновлювальних газів	т / добу чавуну	3223
витрата коксу	тонна	0,443
Умовно постійні витрати	грн	225
Нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності	грн / грн	0,15
додаткові капіталовкладення	грн	2000000 *

* - орієнтовні витрати на спорудження двох установок для кисневої конверсії природного газу та їх монтаж.

За даними розрахунку (табл. 4.4) при вдуванні в шахту доменної печі 800 м³ гарячого відновного газу на тонну чавуну досягається зниження витрати коксу на 43% і на 24,7% збільшується продуктивність печі.

Зміна собівартості чавуну за рахунок зміни норм витрати коксу складе:

$$\Delta C_1 = (0,443 - 0,252) \cdot 8000 = 1528 \text{ грн.}, \quad (4.3)$$

де $0,252 = 0,443 \cdot 0,57$ - витрата коксу після застосування гарячих відновлювальних газів, т;

8000 - ціна однієї тонни коксу, грн.

Економія втрат коксу при його подрібненні:

$$\Delta C_2 = 0 \text{ грн.}$$

Обсяг виробництва до застосування гарячих відновлювальних газів становив 3223 тонни чавуну на добу або $3223 \cdot 357 = 1150611$ тонн чавуну на рік, після впровадження гарячих відновлювальних газів обсяг виробництва складе $3223 \cdot 1,247 = 4019,081$ тонн чавуну на добу або $4019,081 \cdot 357 = 1434811,917$ тонн чавуну на рік.

Тоді зміна собівартості за рахунок зміни обсягу виробництва складе:

$$\Delta C_3 = ((Q_{\text{пл}} - Q_6) / Q_6) \cdot \text{УПР}, \quad (4.4)$$

де $Q_6, Q_{\text{пл}}$ - річний обсяг виробництва відповідно до і після застосування гарячих відновлювальних газів, т.

$$\Delta C_3 = ((+1434811,917 - 1150611) / 1150611) \cdot 225 = 55,57 \text{ грн.} \quad (4.4)$$

Таким чином, зміна собівартості складе:

$$\Delta C = \Delta C_1 + \Delta C_2 + \Delta C_3 = 1528 + 0 + 55,57 = 1583,57 \text{ грн.} \quad (4.5)$$

Економічний ефект:

$$E = \Delta C \cdot Q_6 - E_n \cdot \Delta K, \quad (4.6)$$

де E_n - нормативний коефіцієнт;

ΔK - додаткові капіталовкладення.

тоді:

$$E = 1583,57 \cdot 1150611 - 0,15 \cdot 2000000 = 1\,821\,700\,000 \text{ грн.} \quad (4.6)$$

Тоді загальна окупність:

$$T_p = \Delta K / E = 2000000 / 1\,821\,700\,000 = 0,017 \text{ року.} \quad (4.7)$$

Отримана величина значно нижче нормативної $T_n = 6,67$. У цьому випадку коефіцієнт економічної ефективності складе:

$$E_p = 1 / T_p = 1 / 0,017 = 58,82, \quad (4.8)$$

що в 392 рази перевищує нормативний коефіцієнт порівняльної економічної ефективності $E_n = 0,15$ грн / грн. Отже, вдування гарячих відновних газів з температурою 1050°C в шахту доменної печі економічно і технологічно виправдане.

ВИСНОВКИ

В кваліфікаційній роботі представлений літературний огляд відомих вітчизняних і зарубіжних способів вдування гарячих відновних газів в доменну піч. На цій основі можливий вибір найкращого з них для виконання робочого проекту. Передбачувана технологія розширює коло вирішуваних завдань, в тому числі: залучення в паливний баланс металургії низькосортного вугілля; економія коксу; поліпшення екологічної обстановки; можливість офлюсування і виведення з процесу золи, а також десульфурації газу по ходу його отримання. Собівартість гарячого відновного газу можна знизити, застосувавши коксовий газ, який споживає менше енерговитрат в процесі конверсії.

Ще одним альтернативним заходом зниження витрат на отримання гарячого відновного газу є заміна дорогого природного газу доменним. Для отримання гарячого відновного газу можна застосовувати власний колошниковий газ в процесі його реалізації. Головна перевага цієї технології полягає в тому, що вона дозволяє практично повністю використовувати хімічну енергію вуглецю дефіцитного коксу і максимально збагатити горнові гази відновлювачами.

Для оцінки показників роботи доменної печі при вдуванні гарячого відновного газу для умов доменної печі комбінату "Запоріжсталь" виконані розрахунки за методикою, використовуваної проектними організаціями СНД в якості базової.

Витрата гарячого відновного газу змінювалася від 0 до 800 м³/т чавуну. Аналіз результатів розрахунків свідчить, що найбільшу ефективність від вдування продуктів конверсії природного газу можна отримати при вдуванні гарячого відновного газу в горн печі при оптимальному підборі параметрів комбінованого дуття (витрата природного газу - 200 м³/т, температура дуття - 1200 °С і вміст кисню в дутті 25%). При такому режимі істотно збільшується продуктивність печі (до 28,5%). Питома витрата коксу знижується вдвічі в порівнянні з базовим періодом (з 463 кг/т до 217 кг/т чавуну). Трохи нижче, однак теж досить сприятливі показники при вдуванні гарячого відновного газу в нижню частину шахти печі. Продуктивність при подачі в шахту гарячого відновного газу в кількості 800 м³/т чавуну зростає на 24,7%. Є всі

підстави припустити, що при зниженні вмісту окислювачів до мінімальних меж стане можливим досягти, а, можливо, і перевищити значення по продуктивності і витраті коксу, властиві плавці при вдування гарячих відновних газів в горн. Однак розрахункові значення продуктивності можуть бути досягнуті лише в тому випадку, коли верхня зона печі ("суха зона") не лімітує щодо газодинаміки. При цьому максимальною витратою гарячих відновлювальних газів, вдувається в нижню частину шахти, можна вважати $800 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну і перевищити значення по продуктивності і витраті коксу, властиві плавці при вдування гарячих відновних газів в горн.

За результатами роботи вибирається технологія вдування гарячого відновного газу в шахту, що володіє наступними перевагами перед вдуванням його в горн:

- газ, що вдувається, може містити значно більше окислювачів (до 12-15%), які в цьому випадку тільки знижують відновну здатність газу, але при температурах горизонту вдування ($1000-1100 \text{ }^\circ\text{C}$) не можуть в помітну мірою реагувати з вуглецем коксу; тому для гарячого відновного газу, що вдувається в шахту, стає необов'язковою дорога операція очищення його від окислювачів; несуттєвим для нього є також дещо підвищений вміст CH_4 і сажистого вуглецю;

- відновний газ вдувається безпосередньо в область протікання процесів непрямого відновлення; в нижчерозташованій частині печі, в більшості випадків найбільш напруженою в газодинамічному відношенні, кількість газів не зростає (навіть дещо скорочується завдяки зниженню відносної витрати коксу), що дозволяє підвищити продуктивність;

- фізичне тепло гарячого відновного газу також вноситься безпосередньо в ту область печі, в якій при низькій витраті коксу і високій концентрації кисню в дутті, температури шихти і газу надмірно знижуються.

При вдуванні гарячого відновного газу в нижню частину шахти печі істотно знижується питома витрата коксу (з 463 кг/т до 252 кг/т чавуну), як за рахунок зменшення кількості вуглецю коксу, що спалюється на фурмах C_f , так і за рахунок зниження кількості вуглецю, витрачається на пряме відновлення C_d . Ступінь прямого відновлення γ_d знижується на $0,085-0,299$ (в залежності від витрати гарячого відновного газу) і при витраті гарячого відновного газу $800 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну складає $0,067$.

Однак, і при вдування гарячого відновного газу до $800 \text{ м}^3/\text{т}$ чавуну в нижню частину шахти, як показали виконані розрахунки, можна отримати суттєвий ефект лише при відповідній підготовці шихтових матеріалів.

В цілому, витрата коксу може бути зменшена на 30-45%, а продуктивність печі може зрости до 24,7%. Тому при значних витратах природного газу слід частину його вдувати в вигляді продуктів кисневої конверсії в нижню частину шахти печі.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- 1 Рамм А. Н. Определение технических показателей доменной плавки. Методическое руководство. Ленинград: ЛПИ, 1971. 111 с.
- 2 Иванов Ю. В. Газоотопительные устройства. Москва : Недра, 1972. 375 с.
- 3 Споркач И.Е. Аналитический обзор ресурсов угля в России и за рубежом // Сталь. №12. 2010. С. 2-4.
- 4 Ярошевский С.Л., Афанасьева З. К., Кузин А. В., Мишин И.В. Перспективы и эффективность технологии выплавки чугуна в доменных печах // Новости науки Приднепровья. №5. 2010. С. 25-31.
- 5 Babich A. Gudenau HW, Mavrommatis K. Choice Technological Regimes of Blast Furnace Operation with Injection of Hot Reducing Gases // Revista de metalurgia.-2002. №4. pp.288-305.
- 6 Рамм О.М. Современный доменный процесс. Москва : Металлургия, 1980. 304 с.
- 7 Пухов О.П., Степин Г.М., Цейтлин М.А. Освоение технологии доменной плавки с вдуванием горячих восстановительных газов // Сталь. 1991. №8. С. 7-13.
- 8 Блоштейн Филипп, Дево Мишель, Грант Майкл. Использование технических газов в доменном производстве // Metallurg. 2011. №8. С. 39-43.
- 9 Мишин И.В. Бескоксовая технология выплавки чугуна для условий Украины / Материалы V научно-практической конференции "Донбасс-2020: перспективы развития глазами молодых ученых": г. Донецк, 25-27 мая 2010 г. Донецк, ДонНТУ, 2010. С. 181-186.
- 10 Ярошевский С.Л., Афанасьева З.К., Попов В.Е., Дрейко А.И., Емченко О.В., Голухин Н.В. Ресурсы и эффективность полной и комплексной компенсации при использовании пылеугольного топлива в доменной плавке // Черная металлургия: Бюл. НТИ. 2010. №7. С. 40-49.
- 11 Товаровский И.Г. Проблемы перестройки доменной плавки на бескоксовую технологию // Сталь. 1999. №7. С. 52-55.
- 12 Воскобойников В.Г. и т.д. Опытная плавка с применением горячих

восстановительных газов и технологического кислорода // Сталь. 1997. №4. С. 28-35.

13 Рамм А.Н. К вопросу о применении реформированного природного газа в доменной плавке / Доменный процесс по новейшим исследованиям. 1963г. № 1. С. 21-26.

14 Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка технологической задачи проектирования основ технологии доменной плавки с подачей в печь ГВГ»; Днепропетровск: ДМетИ, 1990г. 72 с.

15 Скляр М.Г., Слободская С.А. Получение ГВГ из летучих продуктов термообработки угля // Кокс и химия. 1987. № 10. С. 42-48.

16 Пухов А.П. Освоение технологии доменной плавки с вдуванием горячих восстановительных газов // Сталь. 1991. №8. С. 25-29.

17 Воскобойников В.Г., Гохман Ю.И., Жураковский Б.Л. Технические показатели доменной плавки при вдувании ГВГ на холодном технологическом кислороде (без атмосферного дутья) // Сталь. 1971. №4. С. 43-47.

18 Тихомиров Е.Н. Методика расчета и показатели доменной плавки с вдуванием ГВГ и кислорода без атмосферного дутья. – Сталь, №1. – 1987г.;

19 Товаровский И.Г., Сладкий И.К., Толмачев И.Л. и т.д. Получение и применение продуктов газификации угля в доменной плавке. Москва : Черметинформация. 1992. 101с.

20 Товаровский И.Г. Усовершенствование и оптимизация параметров доменного процесса // Сталь. 1987. №2. С. 41-47.

21 Тихомиров Е.Н. Доменная плавка с вдуванием горячих восстановительных газов и холодного кислорода // Сталь. 1973. №3. С. 24-29.

22 Товаровский И.Г. Выбор параметров горячих восстановительных газов для вдувания их в доменную печь // Сталь. 1994. №4. С. 15-19.

23 Товаровский И.Г. Усовершенствование и оптимизация параметров доменного процесса // Сталь. 1992. №12. С. 33-39.

24 Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. Киев : Высшая школа. 1988. 352с.

25 Товаровский И.Г. Перспективы снижения расхода кокса в доменных печах путем усовершенствования дументных параметров // Сталь. 1989. №8. С. 15-19.

26 Арутюнов Н.Б., Готлиб А.Д., Рамм А.Н. и др. Перспективы доменного производства. Москва : Металлургия. 1982. 328с.

27 Андронов В.Н., Видение А.А. Применение горячих восстановительных газов в доменной плавке // Металлургия чугуна. 1980. №2. С. 42-48.

28 Товаровский И.Г., Духов А.Л., Шведов В.С. и т.д. Проблемы перехода к малококсовой плавке путем вдувания продуктов газификации низкосортного угля // Сталь. 1997. №7. С.1-4.

29 Товаровский И.Г. Эволюционная перестройка доменного процесса на бескоксовое получение первичного металла. Черная металлургия России и стран СНГ в XXI веке. Т. 2. Москва : Металлургия. 1994. С.105-108.

30 Меккель И.Ф. Производство газа-восстановителя из горячего неочищенного коксового газа // Черная металлургия. 1979. №4. С. 47-51.

31 Козуб В.Н. Доменная плавка с вдуванием горячих восстановительных газов на заводе «Азовсталь» // Сталь. 1971. №1. С. 15-20.

32 Рамм А.Н. О доменной плавке с вдуванием горячих восстановительных газов, полученных разными способами // Сталь. 1975. №7. С. 24-29.

33 Товаровский И.Г. Замена природного газа в доменной плавке продуктами газификации угля // Сталь. 1998. №4. С. 33-38.