

металургії

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проект

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

на тему Вплив підвищеного тиску газу на
кошишнику на показники доменної плавки

Виконав: студент II курсу, групи

спеціальності 136 Металургія

(код і назва спеціальності)

освітньої програми Металургія чорних металів

(код і назва освітньої програми)

спеціалізації

(код і назва спеціалізації)

Б.ІІ Рачун

(ініціали та прізвище)

Керівник зр.в. кафедри, к.т.н, доц Кириченко О.І

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент доц. к.т.н Местеренко Т.М

(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра металеургії
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 136 Металеургія
(код та назва)
Освітня програма Металеургія чорних металів
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри [підпис]
« _____ » _____ 2021 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЕКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Рачуну Борису Петровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проекту) Вплив підвищеного тиску газу на коаліційну напругу при доменній плавці

керівник роботи Кириченко О.І. к.т.н, доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від «30» гербня 2021 року № 975-С

2 Строк подання студентом роботи 01.12.21

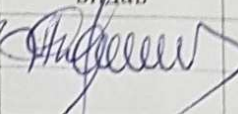
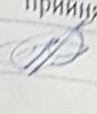
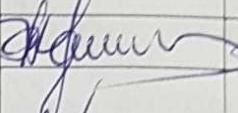

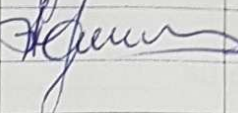

3 Вихідні дані до роботи дослідження впливу підвищеного тиску газу на коаліційну напругу при доменній плавці
Науково-технічна література, Авторські свідоцтва ДСТУ, ТУ

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

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

Розділ 1, Розділ 2, Розділ 3 14 креслень

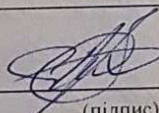
6 Консультанти розділів роботи

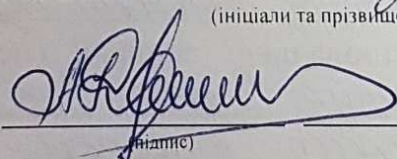
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1. Розуміння досвідченого впливу тиску компримованого газу на покриття деревної масиви	Кириченко О.Г.		
Розділ 2. Методи проведення експериментів	Кириченко О.Г.		
Розділ 3. Вплив підвищення тиску на основні параметри роботи деревних керей	Кириченко О.Г.		

7 Дата видачі завдання 30.06.21

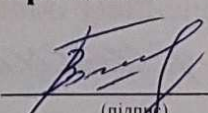
КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ. Резюме	30.06.21 - 29.08.21	
2	Розділ 1	30.08.21 - 29.09.21	
3	Розділ 2	30.09.21 - 29.10.21	
4	Розділ 3	30.10.21 - 30.11.21	
5	Висновки. Список використаних джерел	30.11.21 - 1.12.21	

Студент  (підпис) Б.П. Рязун (ініціали та прізвище)

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

Нормоконтроль пройдено

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

Реферат

Розрахунково-пояснювальна записка: 84 с., 16 табл., 23 рис., 52 джерела

ЧАВУН, ПІДВИЩЕНИЙ ТИСК, ДРОСЕЛЬНА ГРУПА, ДОМЕННИЙ ПРОЦЕС, КОЛОШНИКОВИЙ ГАЗ, ГУБТ

Тема кваліфікаційної роботи: Вплив підвищеного тиску газу на колошнику на показники доменної плавки

Мета роботи – дослідити і обґрунтувати вплив підвищення тиску колошникового газу на показники плавки доменної печі.

У **розділі 1** проведено аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури, розглянуті теоретичні основи існуючих методів використання підвищеного тиску і його вплив на такі параметри доменного процесу, як інтенсивність і продуктивність плавки, розподіл статичного тиску периферійних газів і їх температури між окремими горизонтами по висоті печі, розподіл матеріалів на колошнику, кількість винесеного пилу, витрати коксу, склад чавуну.

У **розділі 2** представлена методика проведення експериментів.

У **розділі 3** наведено результати лабораторних досліджень, а також практичних даних по печам різних комбінатів. За результатами аналізу побудовано графічні залежності і зроблено відповідні висновки. Описана конструкція газової турбіни, яка за рахунок підвищеного тиску виробляє дешеву електроенергію. Надана технологічна схема установки ГУБТ з розташуванням основних та допоміжних елементів установки та їх призначення.

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

АНОТАЦІЯ

Рачун Б.П. Вплив підвищеного тиску газу на колошнику на показники доменної плавки.

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

У роботі ставиться завдання дослідити і обґрунтувати вплив підвищення тиску колошникового газу на показники плавки доменної печі.

Проведено аналіз вітчизняної та зарубіжної літератури, розглянуті теоретичні основи існуючих методів використання підвищеного тиску і його вплив на такі параметри доменного процесу, як інтенсивність і продуктивність плавки, розподіл статичного тиску периферійних газів і їх температури між окремими горизонтами по висоті печі, розподіл матеріалів на колошнику, кількість винесеного пилу, витрати коксу, склад чавуну.

Наведено результати лабораторних досліджень, а також практичних даних по печам різних комбінатів. За результатами аналізу побудовано графічні залежності і зроблено відповідні висновки. Описана конструкція газової турбіни, яка за рахунок підвищеного тиску виробляє дешеву електроенергію. Надана технологічна схема установки ГУБТ з розташуванням основних та допоміжних елементів установки та їх призначення.

Ключові слова: ЧАВУН, ПІДВИЩЕНИЙ ТИСК, ДРОСЕЛЬНА ГРУПА, ДОМЕННИЙ ПРОЦЕС, КОЛОШНИКОВИЙ ГАЗ, ГУБТ

АННОТАЦИЯ

Рачун Б.П. Влияние повышенного давления газа на колошнике на показатели доменной плавки.

Квалификационная выпускная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 136 - Metallургия, научный

руководитель А.Г.Кириченко. Запорожский национальный университет. Инженерный учебно-научный институт им.Ю.М.Потебни, кафедра металлургии, 2021.

В работе ставится задача исследовать и обосновать влияние повышения давления колошникового газа на показатели плавки доменной печи.

Проведен анализ отечественной и зарубежной литературы, рассмотрены теоретические основы существующих методов использования повышенного давления и его влияние на такие параметры доменного процесса, как интенсивность и производительность плавки, распределение статического давления периферийных газов и их температуры между отдельными горизонтами по высоте печи, распределение материалов на колошнике, количество вынесенной пыли, расход кокса, состав чугуна.

Приведены результаты лабораторных исследований, а также практических данных по печам различных комбинатов. По результатам анализа построены графические зависимости и сделаны соответствующие выводы. Описана конструкция газовой турбины, которая за счет повышенного давления производит дешевую электроэнергию. Предоставленная технологическая схема установки ГУБТ с расположением основных и вспомогательных элементов установки и их назначения.

Ключевые слова: ЧУГУН, ПОВЫШЕННОЕ ДАВЛЕНИЕ, ДРОССЕЛЬНАЯ ГРУППА, ДОМЕННЫЙ ПРОЦЕСС, КОЛОШНИКОВЫЙ ГАЗ, ГУБТ

ANNOTATION

Rachun B.P. Influence of the increased pressure of gas on a furnace on indicators of blast furnace melting.

Qualifying final work for obtaining a master's degree in specialty 136 - Metallurgy, supervisor O.G. Kirichenko. Zaporozhye National University. Engineering Educational and Scientific Institute, Department of Metallurgy, 2021.

The paper aims to investigate and substantiate the effect of increasing the pressure of the flue gas on the melting rates of the blast furnace.

The analysis of domestic and foreign literature is carried out, the theoretical bases of existing methods of use of the increased pressure and its influence on such parameters of blast furnace process, as intensity and productivity of melting, distribution of static pressure of peripheral gases and their temperature between separate horizons on furnace height, distribution of materials on a furnace, the amount of dust removed, coke consumption, the composition of cast iron.

The results of laboratory researches, and also practical data on furnaces of various plants are resulted. Based on the results of the analysis, graphical dependences are constructed and the corresponding conclusions are made. The design of a gas turbine is described, which produces cheap electricity due to the increased pressure. The provided technological scheme of GUUT installation with an arrangement of the main and auxiliary elements of installation and their purpose.

Keywords: CAST IRON, INCREASED PRESSURE, THROTTLE GROUP, DOMAIN PROCESS, FLASH GAS, GUUT

Зміст

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ	10
1. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ТИСКУ КОЛОШНИКОВОГО ГАЗУ НА ПОКАЗНИКИ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ	13
1.1 Історична довідка	
1.2 Режим роботи устаткування доменної печі, що працює на підвищеному тиску	14
1.3 Вплив тиску на перепад тиску, інтенсивність плавки і продуктивність	21
1.4 Статичний тиск периферійних газів, а також температури газів між окремими горизонтами по висоті печі	27
1.5 Вплив підвищеного тиску на розподіл матеріалів на колошнику	29
1.6 Вплив тиску на кількість винесеного пилу	33
1.7 Вплив тиску на витрати коксу	35
1.8 Вплив тиску на склад чавуну	40
1.9 Ефективність впровадження підвищення тиску газів на колошнику доменних печей	44
2. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ	48
3. ВПЛИВ ПІДВИЩЕННЯ ТИСКУ НА ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ	51
3.1 Результати лабораторних досліджень підвищення тиску на техніко-економічні показники доменної плавки за допомогою ЕОМ	51
3.2 Аналіз впливу підвищення тиску колошникового газу на печах	54
3.2.1 Вплив корисного об'єму доменної печі на тиск колошникового газу	54
3.2.2 Вплив тиску на продуктивність доменної печі	57
3.2.3 Вплив тиску на витрату коксу	61
3.2.4 Вплив тиску на міру використання СО	62

3.2.5 Вплив тиску на кількість винесеного пилу	64
3.2.6 Вплив тривалої роботи доменної печі на тиск колошникового газу	67
3.3 Використання газової утилізаційної турбіни, як основного джерела отримання дешевої електроенергії на печах, що працюють на підвищеному тиску колошникового газу	69
ВИСНОВКИ	79
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	80

Загальна характеристика роботи

Актуальність проблеми. Більшість металургійних агрегатів і, перш за все, доменна піч, були створені експериментально, задовго до будь-якого пояснення процесів, які відбуваються в ній. Доменна піч, наприклад, існує з XV сторіччя, в той час, як елементарне пояснення доменного процесу було запропоновано всього близько 150 років тому. Впродовж тривалого часу теоретичні узагальнення лише пояснювали практику, і лише пів сторіччя тому теорія стала визначати напрямки розвитку доменного виробництва; практичне здійснення цих напрямів підтвердило їх правильність. Так велике значення на розвиток доменного виробництва надали покращення підготовки матеріалів до плавки, вживання природного газу та кисню, вибір необхідного складу шлаків, вдування у піч пиловугільного палива, підвищення тиску газів в печі та ін.

Металургія чавуну в даний час досягла високого рівня розвитку, котрий дозволяє, використовуючи специфічні закономірності і методики, якісно і кількісно описувати технологічні процеси в доменній печі, визначати показники плавки, розраховувати агрегати, визначати напрями вдосконалення доменного процесу і вести розробку принципово нових методів виробництва чавуну.

На сьогодні техніко-економічні показники роботи доменних цехів України не викликають оптимізму не тільки тому, що фактичні потужності не відповідають виробництву, не виконуються сучасні реконструкції і технічне переозброєння доменних цехів, природоохоронні заходи, але і тому, що дорожчає і паливо, і шихтові матеріали, які використовують у виробництві чавуну.

Одним з методів удосконалення технології доменної плавки являється робота доменної печі на підвищеному тиску колошникового газу [1].

Мета роботи – дослідити і обґрунтувати вплив підвищення тиску колошникового газу на показники плавки доменної печі. 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

підвищення тиску на колошнику доменної печі. 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. Дослідити вплив корисного об'єму доменної печі на тиск колошникового газу;

2. Дослідити вплив тиску на продуктивність доменної печі, на витрату коксу, на міру використання CO, на кількість винесеного пилу.

Об'єкт дослідження – технологічні показники доменної плавки з аналізом впливу підвищення тиску колошникового газу.

Предмет дослідження: закономірності і механізми фізико-хімічних процесів технології підвищення тиску колошникового газу на показники доменної плавки.

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

Наукова новизна:

1. При переході на підвищений тиск колошникового газу виявлено зниження загального перепаду тиску по об'єму печі, що веде до кращого ходу процесу виплавки чавуну.

2. При збільшенні тиску колошникового газу зменшується його швидкість, збільшується час перебування газу у контакті з залізорудними матеріалами, що призводить до кращого використання хімічної і теплової енергії газу.

3. У зв'язку зі зменшенням швидкістю газу, який перебуває в печі, міра використання його збільшується, відповідно збільшується ступінь непрямого відновлення і зменшується ступінь прямого. Збільшення ступені непрямого відновлення сприяє економії коксу.

Практичне значення:

1. Розроблена технологія та досліджений вплив підвищення тиску колошникового газу на показники плавки доменної печі.

2. Впроваджена в технологічну схему ГУБТ, що працює на надлишковому тиску, дозволить отримувати дешеву електроенергію. Пропонується впровадження ГУБТ на доменній печі №5 комбінату «Запоріжсталь».

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, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел з 52 найменувань, викладена на 84 сторінках машинописного тексту включаючи 23 рисунки, 16 таблиць.

1. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ВПЛИВУ ТИСКУ КОЛОШНИКОВОГО ГАЗУ НА ПОКАЗНИКИ ДОМЕННОЇ ПЛАВКИ ПОПЕРЕДНІХ ДОСЛІДНИКІВ

1.1 Історична довідка

Перші правильні міркування з питання доцільності штучного підвищення тиску газів в доменній печі були опубліковані в 1915 р. П. М. Єсманським, який вважав, що підвищення тиску прискорить відновлення оксидів заліза в ділянці помірних температур і призведе до більш рівномірного розподілу газів по перерізу печі. Способом підвищення тиску в робочому просторі печі він вважав пристрій «перезжимів» в газовідводячих трубах. Робота П. М. Єсманського не привернула до себе уваги.

У 1938 р. патент на застосування підвищеного тиску газів в доменних печах був отриманий Дж. Евері (США), що виступив з різностороннім обґрунтуванням запропонованого ним проекту. Після обговорення, що тривало декілька років, за підтримки Т. Л. Джозефа, Евері вдалося добитися його реалізації. У 1944 р. на роботу з надлишковим тиском на колошнику 70 КПа була переведена доменна піч № 5 комбінату Корриган Мак-Кінні фірми «Ріпаблік Стіл Корп». у Клівленді. Через чотири місяці досліди були припинені через неполадки з механічним устаткуванням, але незабаром після їх відновлення в 1946 р. були отримані цілком сприятливі результати (підвищення продуктивності на 12,3 %, зниження витрат коксу на 2,7 %, різке зменшення винесення колошникового пилу). У тому ж 1946 р., на роботу з підвищеним тиском було переведено ще шість доменних печей тієї ж фірми (три печі в Янгстауні і по одній в Уоррен, Буффало і Саутс Чикаго). Протягом наступного десятиліття число доменних печей, що працювали з підвищеним тиском, зросло в США до 28 одиниць [1].

В СРСР уперше дослідні роботи з підвищеним тиском були проведені з ініціативи І. І. Коробова на комбінаті ім. Петровського, раніше, ніж в США (1940 р.), але виявилися безуспішними, так як дросельні клапани встановлювались в газовідводах на колошнику, де вони швидко руйнувались під стираючою дією

колошникового пилу. У 1951 році цей спосіб був освоєний на Магнітогорському металургійному комбінаті. Щоб уникнути сильного зносу дросельних пристроїв, перетин газу здійснюється не одразу біля колошника, а на газопроводі очищеного газу.

За період 1955-1957 рр. в Англії кількість доменних печей, що працювали на підвищеному тиску збільшилася з 1 тільки до 4. У Чехословаччині працювали 2 доменних печі, в Польщі 4 великих печі і декілька печей в Китаї. Свого часу повідомлялося про підготовку двох печей Німеччини для роботи за новою технологією. Проте, до 1958 р. жодна з 120 доменних печей цієї країни не працювала на підвищеному тиску, німецькі металурги протиставляли цьому методу відповідну підготовку сировини, вважаючи останню економічно вигіднішою [2].

У вісімдесятих роках в СРСР працювало з підвищеним тиском 117 доменних печей (із загальної кількості 136), на яких виплавлено 97,3 % усього чавуну, причому середній надлишковий тиск газу на колошнику склав 137 КПа. На нових великих доменних печах передбачається можливість підвищення надлишкового тиску до 250 КПа [1].

1.2 Режим роботи устаткування доменної печі, що працює на підвищеному тиску

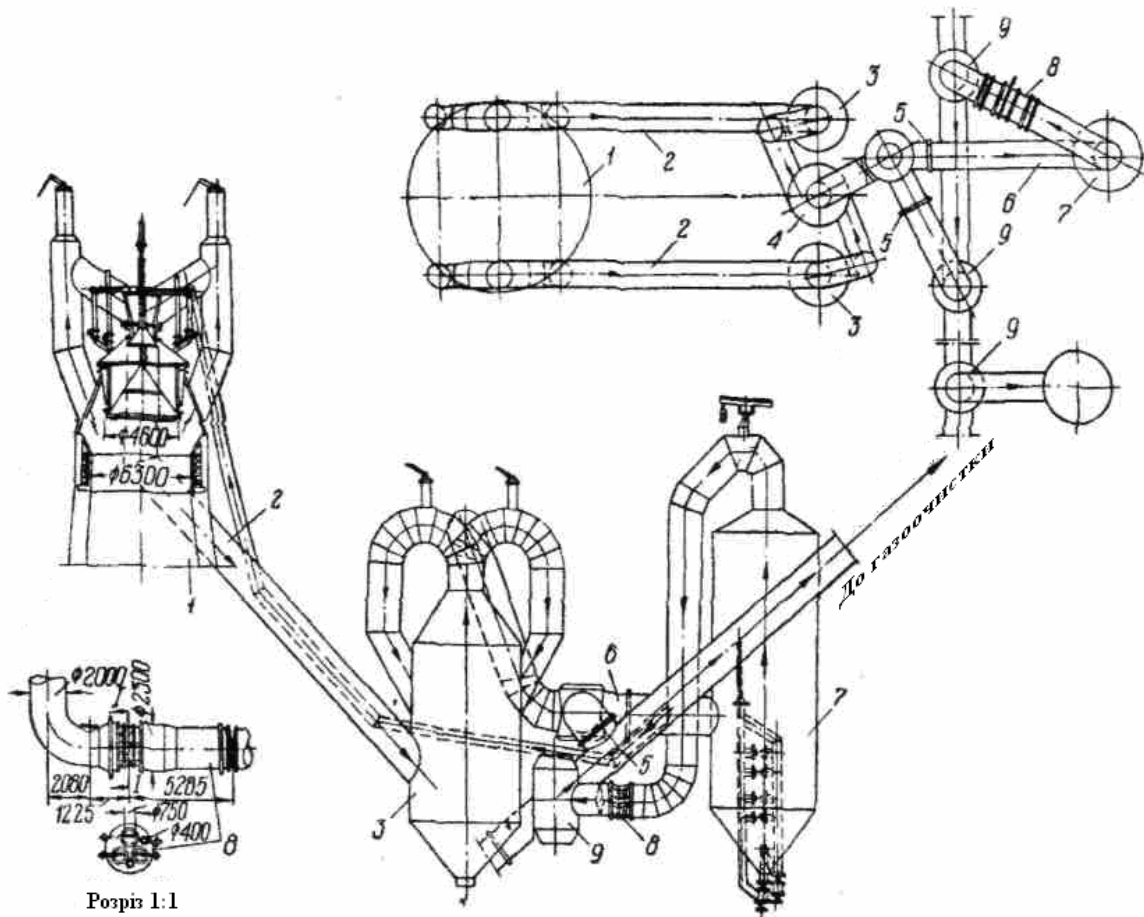
Підвищений тиск створюється шляхом дроселювання газу, що виходить з печі. Спочатку робилися спроби дроселювати газ в газопроводах безпосередньо після виходу з підконусного простору. На кожному з чотирьох газовідводів встановили по одному дросельному клапану з приводами. Ці клапани працюючи одночасно, створювали опір на виході газу з печі.

Така схема виявилася неприйнятною з двох причин:

- Висока швидкість неочищеного газу в клапанах призводила до надзвичайно інтенсивного абразивного зносу і швидкого виходу з ладу дросельної групи.

- Наявність в роботі чотирьох клапанів робила важким регулювання тиску, оскільки пережим здійснювався одночасно чотирма заслінками [3].

Нині загальноприйнята схема повітря-газового потоку доменної печі з підвищеним тиском має вид, як показано на рис. 1.1 [4].



1 - доменна піч, 2 - низхідні газопроводи, 3 - перші пиловловлювачі, 4 - другий пиловловлювач, 5 - засувка, 6 - газопровід, 7 - скрубєр підвищеного тиску, 8 - дросельна група, 9 - колектор газопроводу.

Рисунок 1.1 - Схема устаткування доменної печі №4 комбінату «Азовсталь» для роботи на підвищеному тиску

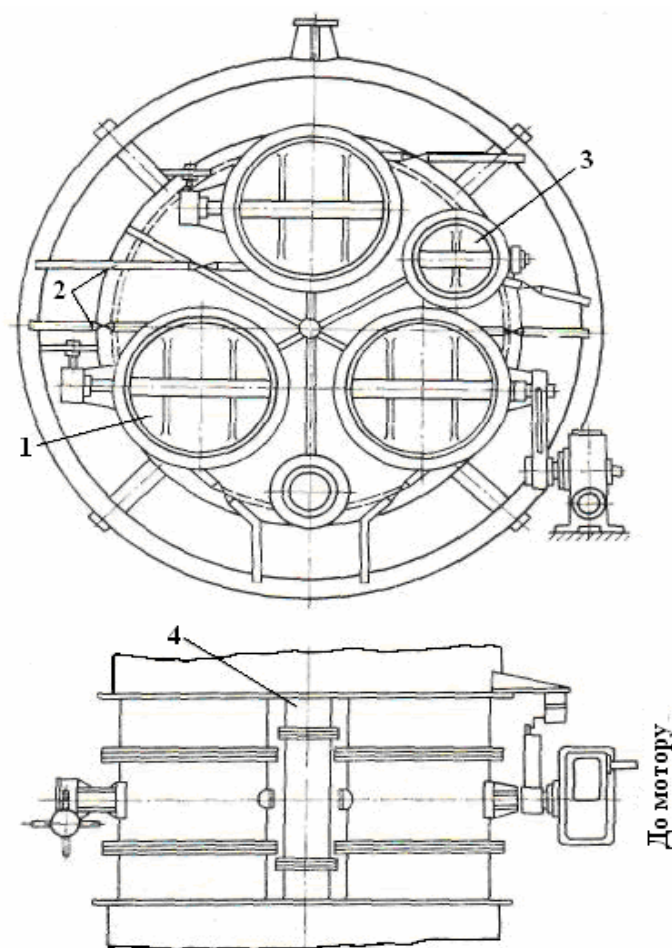
Схема передбачає розташування редуційного пристрою на газопроводі напівчистого газу після скрубєру, реконструйованого для роботи на підвищеному тиску.

Такі схеми застосовані на Кузнецькому металургійному комбінаті і ряді інших комбінатів, зокрема на двох печах комбінату «Запоріжсталь». На іншій печі цього комбінату була застосована схема, запропонована К. П. Гуляницьким, за якою усі чотири скрубєри працюють під високим тиском, причому два з них можуть забезпечувати газом перепускний пристрій. Перевагою цієї схеми є

можливість відключення у разі потреби окремих блоків скрубера - дезінтегратор без переведення печі на звичайний тиск. Проте, як відмічав В. П. Щербаков, відсутність цієї можливості на інших печах не впливала на їх роботу.

Недоліки цієї схеми обумовлені малою швидкістю газу перед скруберами, що призводить до забивання пилом колектора брудного газу і до занесення шламу у верхню частину скрубера, де знаходиться велика кількість механізмів (ушкодження кожного з яких призводить до перемикання печі на низький тиск) і підвищеною вчетверо, проти звичайної, витратою води високого тиску на зрошування насадок скрубера [2].

Дросельна група (рис. 1.2), включена в газопровід після скрубера підвищеного тиску. Складається вона з трьох паралельно розташованих патрубків діаметром 750 мм, одного - діаметром 450 мм і ще одного діаметром 200-300 мм. Патрубки діаметром 750 і 450 мм обладнано дросельними клапанами 1, 3 [5].



1 - клапан діаметром 750 мм; 2 - форсунки; 3 - клапан діаметром 450 мм; 4 - перепускний патрубок діаметром 200-300 мм.

Рисунок 1.2 - Схема дросельного пристрою

Дросельний клапан призначений для регулювання кількості газу, що подається у газовий пальник повітрянагрівача, і повного відділення пальника від газопроводу як при нормальній роботі так і в разі аварійного припинення подачі електроенергії. Зазвичай для обертання дроселя використовують ручний привід, але Діпромезом запроєктований автоматичний дросельний клапан, забезпечений електроприводом [6].

Перші три клапани постійно закриті, при цьому збільшується опір в газопроводі і відповідно зростає тиск газу; відкривають їх лише при переведенні печі на нормальний тиск. Газ проходить через відкритий клапан 3, міра відкриття якого автоматично змінюється залежно від тиску газу в печі, підтримуючи тиск у верхній частині печі на рівні 200-300 КПа. Перед клапанами газ змочується водою, що подається в газопровід через форсунки 2. Патрубок діаметром 200-300 мм служить для випуску шламу [5].

Робота доменних печей з підвищеним тиском вимагає введення ряду додаткових пристроїв і вдосконалення окремих вузлів устаткування.

До таких пристроїв відносяться: дросельна група, скруббер високого тиску, газопровід, що сполучає міжконусний простір із скруббером високого тиску, система зрівняльних клапанів та ін.

Дросельна група. На стінках труб і на клапанах дросельного пристрою утворюються щільні відкладання пилу, це веде до заїдань дроселів, а потім і до їх зупинки. Швидше за інших заростають дроселі 400 і 750 мм, що частіше знаходяться у відкритому положенні.

Видалення цих відкладень супроводжується великими труднощами, оскільки навіть при безперервній подачі води високого тиску через тангенціальні форсунки, для періодичного промивання дроселів, позитивного результату не дають [7, 8].

На Криворізькому комбінаті для безперервного промивання дросельних клапанів встановлені евольвентні форсунки з діаметром вихідного отвору 25 мм (по одній на кожен дросель). Таке промивання виявилось досить ефективним., але для повного припинення засмічень пропонується застосовувати періодичне промивання розчином сірчаної кислоти [4, 8].

Зрівняльні клапани. Типові наповнювальні і випускні клапани діаметром 400 мм з наплавленням твердим сплавом працюють задовільно. Проте на комбінаті ім. Кірова до їх конструкції внесено удосконалення - в корпусі сідла в місці зіткнення з клапаном проточена кільцева канавка, в яку через 8 отворів підводиться пара для створення протivotиску [4].

На Новоліпечькому металургійному комбінаті (НЛМК) електричною схемою передбачено два режими роботи зрівняльних клапанів :

а) основний - із заповненням міжконусного простору газом високого тиску перед опусканням великого конуса;

б) додатковий, при якому наповнювальні клапани закривають тільки перед опусканням малого конуса, а випускні клапани відкриваються тільки на час опускання малого конуса.

В результаті міжконусний простір виявляється заповненим напівчистим газом високого тиску при першому режимі лише протягом не більше 10 % усього часу, а при другому протягом приблизно 70 % часу, що різко зменшує тривалість можливих продувань через нещільність навколо великого конуса. Подовження дії напівчистого газу на малий конус і його воронку не представляє значної небезпеки, тому що такий газ менш абразивний, ніж брудний [7, 8].

На комбінаті «Азовсталь», в цілях полегшення умов експлуатації великого конуса і чаші, зрівняльні клапани працюють на «додатковому» режимі, при якому міжконусний простір залишається під тиском максимально можливий час. При цьому режимі скорочується час дії різниці тисків на великий конус, але погіршуються умови експлуатації малого конуса і ущільнення розподільника, що обертається [4].

Засипний апарат і розподільник шихти. З переведенням доменних печей на підвищений тиск умови експлуатації засипних апаратів погіршилися і знос їх посилюється.

Причини цього: незадовільна обробка дотичних поверхонь в місцях прилягання конуса до чаші і неретельне центрування великого конуса, а також часті перегрівання колошника і нерівний хід печі.

Знос малого конуса спостерігається як на робочих поверхнях, так і в місцях прилягання його до воронки, що обертається, причому більшою мірою - на печах, що працюють з «додатковим» режимом зрівняльних клапанів.

При роботі з підвищеним тиском створюються ускладнення в досягненні необхідної щільності між нерухомими частинами засипного апарату і воронкою, що обертається.

Сухе ущільнення розподільника Уральського комбінату важкого машинобудування (УКВМ), що обертається, типу СЗ-6-6,5 з висотою сальникового набивання 100 мм виявилось непридатними. У моделі розподільника УКВМ, що обертається, типу СЗ-8-6,5 ущільнення було посилене - зроблено двохсальниковим з паровим підпором. Проте і таке ущільнення вимагає частих ремонтів. Для підвищення щільності в цьому місці більшість комбінатів йдуть шляхом збільшення висоти сальникового ущільнення, введення проміжних кілець з отворами, що підводять мастило до корпусу воронки, і поліпшення якості мастила.

Найкраща служба ущільнення розподільника УКВМ, що обертається, досягнута на комбінаті «Азовсталь» в результаті удосконалення підведення мастила. Конструктивні зміни, внесені до типового ущільнення, незначні. Дренажні трубки, що проходять через азбестове ущільнення, в конструкції УКВМ зміщені відносно осі патрубків. На доменних печах комбінату «Азовсталь» ці трубки поставлені по осі патрубка і мастило по них поступає безпосередньо до корпусу воронки, що обертається. Подача мастила автоматизована.

Штанги конусів. На деяких комбінатах з введенням нового режиму посилюється місцевий знос штанг конусів, що призводить в окремих випадках до поломки штанги і обриву конуса.

Знос посилюється внаслідок абразивної дії газу в місцях входу і виходу штанги великого конуса з порожнистої штанги малого конуса.

Ущільнення штанг, вживане на «АрселорМіттал-Кривий Ріг» і Макіївському металургійному комбінаті, працює незадовільно. Для поліпшення ущільнення на «АрселорМіттал-Кривий Ріг» була збільшена висота основної

штулки і встановлено лабіринтове ущільнення в нижній частині порожнистої штанги під малим конусом. Але ці заходи позитивних результатів не дали.

На Макіївському меткомбінаті періодично змінюють висоту лабіринтового ущільнення. Проте, це, не усуває зносу штанги, а тільки дещо подовжує термін служби штанги великого конуса.

Останнім часом на Макіївському меткомбінаті застосована досконаліша конструкція, що складається з лабіринтового ущільнення, і м'якого сальника з подачею в нього мастила від автоматичної станції.

Зонди для виміру рівня засипу. Для виміру рівня засипу в доменних печах в більшості випадків застосовуються гнучкі зонди. Сальникові ущільнення цих зондів недосконалі і вимагають частої перекупорки місць ущільнення.

Перевлаштування одного із зондів доменної печі № 3 «АрселорМіттал-Кривий Ріг» на лабіринтове ущільнення, вживане на Магнітогорському комбінаті, не виявили переваг останнього в порівнянні з сальниковим. Хороші експлуатаційні якості показало лабіринтове ущільнення з паровим підпором, вживане на доменних печах комбінату «Азовсталь» [4].

Транспортери для випуску пилу. Встановлені по центрах пиловловлювачів гвинтові транспортери дають можливість випускати з них пил без зниження тиску газу. Розташовані над транспортерами тарілчасті затвори мають притискувані контрвантажами клапани, наплавлені твердим сплавом і керовані за допомогою лебідок.

Доцільно буде збільшити продуктивність гвинтових транспортерів на 40 - 50 %.

Під час ремонту транспортера пил випускають через байпас із звичайним тарілчастим клапаном, що також працює досить надійно і керованим за допомогою електролебідки (обслуговує два пиловловлювачі) [8].

Повітродувні машини. Низька потужність повітродувних машин не дає доменним печам працювати на високому тиску на колошнику (в середньому тиск не перевищує 130 КПа) [8 - 10]

1.3 Вплив тиску на перепад тиску, інтенсивність плавки і продуктивність

Основним завданням прогресу доменного виробництва є збільшення продуктивності доменних печей. Продуктивність доменної печі, як і будь-якого іншого агрегату, визначається інтенсивністю її роботи за інших рівних умов [11].

Вплив підвищення тиску на втрату натиску різний для різних горизонтів печі, оскільки різний початковий тиск газу, найбільший в нижній і найменший у верхній частині печі. Якби тиск на усіх горизонтах зріс в одне і теж число разів, то в стільки ж раз всюди зменшився б і градієнт тиску. При підвищенні тиску на одну і ту ж для усіх горизонтів величину тиск у верхній частині печі зростає в найбільше число разів, оскільки абсолютний тиск там менше. Отже найсильніше градієнт тиску зменшується у верхній частині печі [12].

По формулі М. М. Жаворонкова для турбулентного нестійкого режиму втрата натиску газу виражається рівнянням:

$$\Delta P = \frac{7,6H \cdot w^{1,8} \cdot \gamma^{0,8} \cdot \eta^{0,2}}{g \cdot d_{\text{эк}}^{1,2}} \quad (1.1)$$

Замінивши постійні величини через

$$A = \frac{7,6}{g} \cdot \frac{H \cdot \eta^{0,2}}{d_{\text{эк}}^{1,2}} \quad (1.2)$$

Отримаємо при звичайному тиску

$$\Delta P_1 = A w_1^{1,8} \cdot \gamma_1^{0,8} \quad (1.3)$$

А при підвищеному тиску

$$\Delta P_2 = A w_2^{1,8} \cdot \gamma_2^{0,8} \quad (1.4)$$

Розділивши рівняння (1.4) на (1.3), отримаємо:

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \left(\frac{w_2}{w_1} \right)^{1,8} \cdot \left(\frac{\gamma_2}{\gamma_1} \right)^{0,8} \quad (1.5)$$

При постійній кількості дуття щільність газу прямо пропорційна його тиску, а швидкість руху навпаки, тобто

$$\frac{\gamma_2}{\gamma_1} = \frac{P_2}{P_1} \quad \text{і} \quad \frac{w_2}{w_1} = \frac{P_1}{P_2} \quad (1.6)$$

Тоді з рівняння (1.5) витікає, що

$$\frac{\Delta P_2}{\Delta P_1} = \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{1,8} \cdot \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0,8} = \frac{P_1}{P_2} \quad (1.7)$$

Тобто зміна втрати натиску при русі газу через шар матеріалу зворотно пропорційна до абсолютного тиску газу.

Цей розрахунок наближений до дійсного, оскільки передбачає постійність температури і щільність газу по висоті печі. Справедливість його, проте, підтверджена експериментами і визнана в літературі [4,5].

Підвищення тиску газу біля фурм без зміни масової кількості дуття з $P_{1\Phi}$ до $P_{2\Phi}$ зменшує його об'єм пропорційно відношенню $P_{2\Phi} : P_{1\Phi}$, відповідно до чого знижуються швидкість газу і перепад тиску газів між горном і колошником $\Delta P_{г-к}$. Причому при постійній масовій витраті дуття втрата натиску при русі газу через стовп шихтових матеріалів приблизно зворотно пропорційна абсолютному тиску газу.

Визначимо зменшення перепаду тисків газу в печі, що працювала при тиску газу на колошнику $P_{1к} = 110$ КПа і у фурм $P_{1\Phi} = 230$ КПа, при переведенні її на

роботу з тиском газу на колошнику до $P_{2\phi} = 250$ КПа без зміни масової кількості дуття.

Якщо первинне значення $\Delta P_{1г-к} = P_{1\phi} - P_{1к} = 230 - 110 = 120$ КПа і тиск $P_{1сп} = (P_{1\phi} + P_{1к}) : 2 = (230 + 110) : 2 = 170$ КПа, то при підвищенні тиску на колошнику до $P_{2к} = 250$ КПа повинна дотримуватися умова:

$$\frac{\Delta P_{2гк}}{\Delta P_{1г-к}} = \left(\frac{P_{1сп}}{P_{2сп}} \right) = \left(\frac{P_{1\phi} + P_{1к}}{P_{2\phi} + P_{2к}} \right) = \left(\frac{P_{2\phi} - 250}{120} \right) = \frac{340}{P_{2\phi} + 250} \quad (1.8)$$

Звідки

$$P_{2\phi} = 320 \text{ КПа}, \Delta P_{2г-к} = P_{2\phi} - P_{2к} = 320 - 250 = 70 \text{ КПа} \quad (1.9)$$

Отже, підвищення тиску газу на колошнику без зміни витрати дуття від 110 до 250 КПа зменшує перепад тиску газу між горном і колошником від 120 до 70 КПа. Якщо прийняти, що при звичайному тиску (110 КПа) перепад тиску $\Delta P_{г-к}$ досягав критичного значення, перевищення якого викликало б порушення сходу і підвісання шихти, то зниження перепаду тиску при переході на роботу з підвищеним тиском газів в робочому просторі печі дозволяє збільшити об'єм і швидкість газу шляхом збільшення масової кількості дуття до досягнення критичного перепаду тисків.

Таким чином, при підвищенні тиску газів в робочому просторі печі можна збільшити кількість дуття, тобто підвищити продуктивність печей.

Відомо, що [12] кількість дуття (отже, кількість спалюваного в одиницю часу пального і газів, що утворюються) може бути збільшена в $\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{0,56} = 1,21$ рази, тобто приблизно на 20 % без порушення рівного ходу печі. А. Н. Рамм і І. І. Коробов вважають, що інтенсивність плавки можна збільшити на навіть більшу величину [12].

При збереженні попередньої інтенсивності, тобто попередньої масової швидкості газів w_0 , підвищення тиску супроводжується зменшенням перепаду

тисків по висоті печі, що гальмує опускання стовпа матеріалів. В результаті підвищення тиску на колошнику і його постійності (підтримується автоматично) хід печі стає рівнішим. Зберігаючи ж первинний перепад тисків в тій області печі, в якій має місце максимальний градієнт зміни тиску газу по висоті (у «визначальній зоні» по М. А. Стефановичу [13]), можна відповідно підвищити масову швидкість газу. Міра можливого збільшення інтенсивності плавки піддається наближеному теоретичному розрахунку.

Вважаючи, що «визначальна зона» знаходиться в заплечиках, де градієнт зміни тиску складає $31:5 = 6,2$ КПа проти $75:20 = 3,75$ КПа в шахті. Приймаючи, що при будь-якому іншому тиску на колошнику «нижній» перепад тиску залишається рівним 31 КПа, визначаємо швидкість газу на колошнику $w_{0к}$ при звичайному тиску 115, яка дорівнює:

$$w = \sqrt{1,15^2 + (1,045 + 0,503) \cdot \omega_{ок}^2} - \sqrt{1,15^2 + 1,045 \omega_{ок}^2} = 0,31 \text{ м/с (31 КПа)} \quad (1.10)$$

Звідси $w_{0к} = 1,643$ м/с. Таким чином, підвищення p_k з 115 до 289 КПа дозволило збільшити інтенсивність плавки в $2,17/1,643 = 1,32$ рази, або на $32/(28,9-11,5)=1,84\%$ на кожних 10 КПа підвищення тиску на колошнику. Так само знаходяться значення ΔI для інших значень p_k ; результати представлені на рис. 1.3, з якого видно, що підвищення інтенсивності майже пропорційне збільшенню тиску; з урахуванням на 10 КПа збільшення тиску складає 1,9-1,75 %.

Загальний перепад тисків газу в печі при звичайному тиску його на колошнику (115 КПа) складає

$$\Delta p = \sqrt{1,15^2 + (1,045 + 0,503) \cdot 1,643^2} - 1,15 = 1,195 \text{ ат (119,5 КПа)} \quad (1.11)$$

проти 106 КПа при $p_k = 289$ КПа; таким чином, при підвищенні p_k з 115 до 289 КПа максимальний загальний перепад для умов розглянутого прикладу може скласти лише 89 % від первинного.

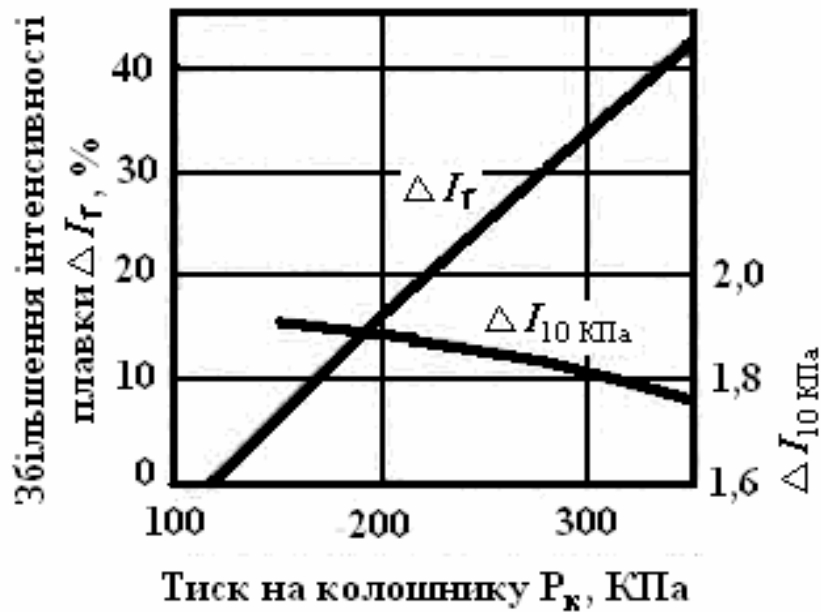


Рисунок 1.3 - Можливість збільшення інтенсивності плавки при підвищенні тиску газу на колошнику (розрахункові дані)

Порівняння результатів розрахунку з даними практики, приведеними в таблиці 1.1, показує, що на доменних печах (Новоліпецького металургійного комбінату, Череповецького комбінату) досягалося збільшення інтенсивності плавки, близьке до розрахункового, а на інших печах воно було значно менше.

Причинами малого збільшення інтенсивності в порівнянні з розрахунковим можуть бути:

а) погіршення газопроникності шихти при роботі з підвищеним тиском в результаті деякого пониження відносної витрати коксу і значного зменшення винесення пилу;

б) зміна міри урівноваження залізорудних компонентів шихти і коксу висхідним потоком газу, що супроводжується зміною кутів їх відкосу і перерозподілом матеріалів по радіусу печі, що також призводить до погіршення газопроникності шихти на периферії, що збільшує перепад тисків в печі і ослабляє вплив на нього підвищення тиску на колошнику

в) зменшення кінетичної енергії дуття (при збереженні колишнього діаметру повітряних фурм) і пов'язане з цим скорочення розмірів фурмених вогнищ, погіршують швидкість опускання матеріалів [1].

Таблиця 1.1 - Зміна (%) інтенсивності горіння коксу (ΔI_k), приведеної продуктивності, (ΔP), приведеної відносної витрати коксу (Δk) і винесення пилю ($\Delta \Pi$) при підвищенні надлишкового тиску газу на колошнику з P_k' до P_k''

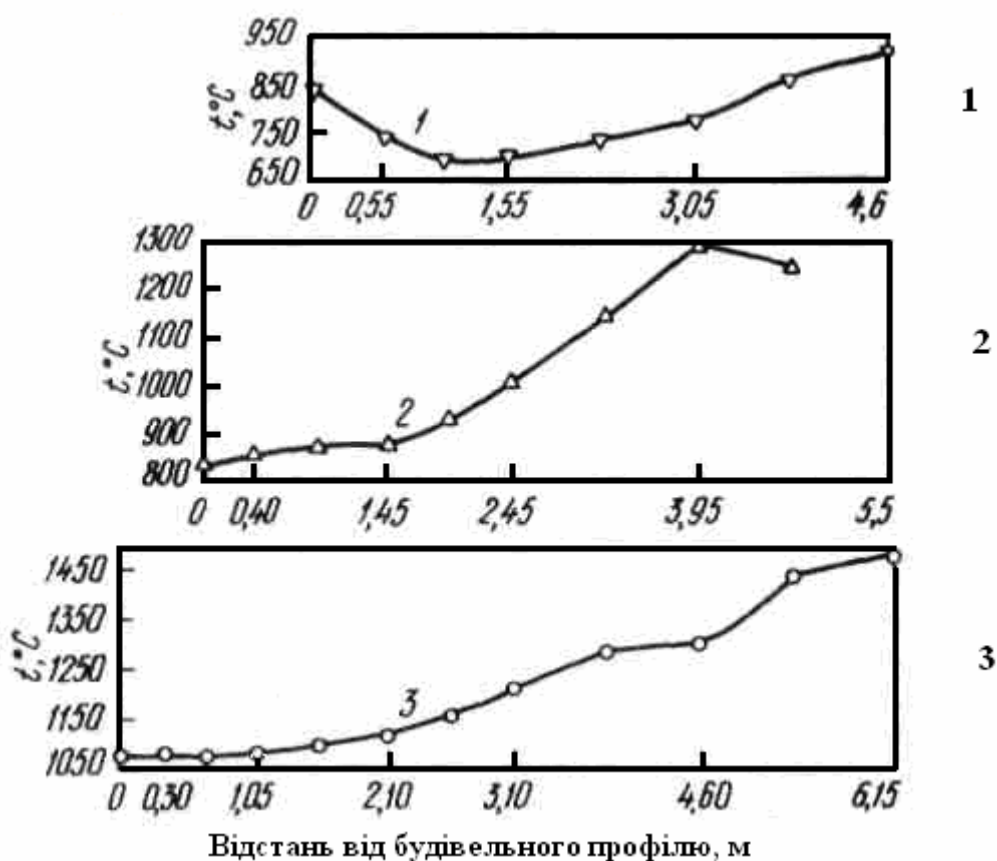
Комбінат,	P_k'	P_k''	ΔI_k	ΔP	Δk	$\Delta \Pi$	$\Delta I_{0,1} * 1$	$\Delta P_{0,1} * 1$
Азовсталь	Немає даних.	60	+5,5	+7,8	-2,1	-20	1,1	1,0
ДМК	Немає дан.	50	+6,0	+8,5	-0,5	-48	1,5	1,5
АрселорМіттал-Кривий Ріг	Немає дан.	50	+6,0	+8,3	-1,2	-40	1,5	1,6
Макіївський	Немає дан.	50	+5,6	+8,3	-2,5	-21	1,4	1,8
Нижне-Тагільський	Немає дан.	65	+5,4	+6,8	-1,3	-20	1,0	2,1
Челябінський	Немає дан.	70	+4,5	+6,3	-1,7	-21	0,8	1,2
Магнітогорський	17	48	-1,5	+4,7	-4,6	-14	-0,5	1,0
	17	80	+5,3	+6,9	-1,5	-29	0,8	1,1
Кузнецький	10	55	+6,9	+8,6	-1,6	-64	1,5	1,9
	10	57	+6,1	+9,0	-2,7	-47	1,3	1,9
Новолипецький	Немає дан.	80	+12,3	+15,8	-3,0	-54	1,8	2,2
		80	+12,6	+20,2	-6,3	-48	1,8	2,9
Череповецький Піч №1 ^{*2}	103/118	148/148	+4,8/	+10,4/	-5,1/	-46/	1,1/	2,3/
			+3,2	4,1	-0,9	-48	1,1	1,4
Піч №2 ^{*2}	109/108	148/148	+9,6/ -0,7	+12,3/0	0,24/-0,7	0/-35	2,5/ -0,2	3,1/0

Примітка. Чисельник - ливарний чавун, знаменник - передільний

Отже, при підвищенні тиску колошникового газу, зменшується перепад тиску по горизонтам печі, тобто хід процесу стає більш рівним. Продуктивність доменної печі пропорційна кількості коксу, що спалюється в одиницю часу, тобто ваговій витраті дуття. Прагнення збільшити продуктивність призводить до інтенсивної подачі дуття. При звичайному режимі плавки втрата напору по висоті доменної печі підтримується максимальною (критичною), тому не може бути підвищена за рахунок збільшення дуття, без погіршення рівного ходу печі. При підвищенні тиску втрата напору зменшується, завдяки чому можна збільшити кількість дуття і зробити процес більш інтенсивним.

1.4 Статичний тиск периферійних газів, а також температури газів між окремими горизонтами по висоті печі

З аналізу середніх (планиметрованих) даних виходить, що з підвищенням тиску газів в робочому просторі печі спостерігається зниження температури кладки шахти на верхніх і середніх горизонтах. Пояснюється це тим, що з підвищенням тиску газів на колошнику скорочуються зони горіння коксу і відбувається зосередження жару в горні. У зв'язку з цим перепад температур між газами і матеріалами в нижніх горизонтах печі збільшується, тому передача тепла від газів до матеріалів посилюється. Тепло газів краще використовується на нижніх горизонтах, а на верхні гази приходять зі зниженою температурою. Зміна температури по радіусах горизонтів представлена на рис. 1.4 [14].



1 - середина шахти, 2 - низ шахти, 3 - розпар

Рисунок 1.4 - Зміна температури по радіусах горизонтів.

Зниженню температури по висоті шахти печі сприяє також збільшення швидкості опускання шихтових матеріалів завдяки підвищенню інтенсивності плавки з переведенням на підвищений тиск.

На доменній печі №2 «АрселорМіттал-Кривий Ріг» було проведено дослідження розподілу статичного тиску по висоті печі при звичайному і підвищеному тиску.

Дослідження показали, що зміна розподілу матеріалів на колошнику впливає на втрати натиску між колошником і другим горизонтом, а зміна температурно-дуттєвого режиму - на величину втрат між другим горизонтом і фурмами.

Регулюючи температуру і витрату дуття, можна впливати на перепад тиску між фурмами і другим горизонтом, а змінюючи тиск газу на колошнику - на перепад тиску між другим горизонтом і колошником.

Така схема доцільна ще і тому, що в практичних умовах штуцер для відбору газу на першому (нижньому) горизонті часто забивається напіврідкими масами, яких немає на другому горизонті [4].

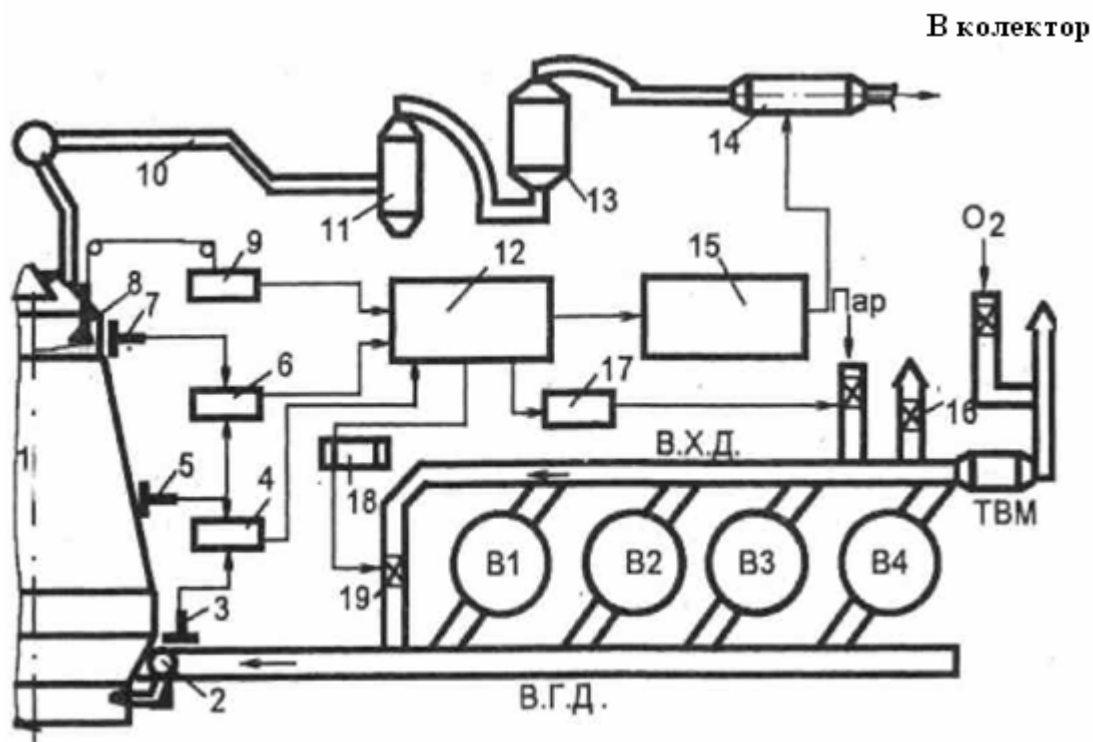


Рисунок 1.5 - Схема автоматичного регулювання ходу доменної печі по перепадах тиску між окремими горизонтами.

Доменна піч 1 оснащена відбірними пристроями для відбору імпульсів тиску 3 з повітропроводу 2 гарячого дуття, середини шахти 5 і на колошнику 7. Перепади тиску вимірюються диференціальними манометрами 4 і 6. Рівень шихти вимірюється рівнеміром 9 із зондом 8. Колошниковий газ відводиться газопроводом 10 і очищається від пилу в пиловловлювачі 11 і скрубєрі високого тиску 13. Тиск газу регулюється дросельною групою 14.

Контролер 12 сприймає сигнали струмових датчиків, вбудованих в диференціальні манометри і рівнемір шихти і видає імпульси на включення відповідних автоматичних регулювальників, залежно від співвідношення величин верхнього і нижнього перепадів тиску.

Якщо збільшився нижній і зменшився верхній, включається 15 регулювальник тисків газів на колошнику, тобто дросельна група пережимає вихід газу з доменної печі і на шихту створюється згори осаджуючий тиск. Якщо через витримку часу в одну хвилину не виходить сигнал з рівнеміра про осідання шихти і зависання її триває, то включаються в роботу автоматичні регулювальники температури 18 і зволоження 17 гарячого дуття. Зниження температури і збільшення вологості гарячого дуття зменшує об'єм горнових газів і їх підпираючу дію на шихту. Якщо ж і ці регулюючі дії не призводять до осідання завислої шихти, то відкривається клапан 16 «Снорт» і дуття частково випускається в атмосферу, що повинне осадити шихту [15,16]

1.5 Вплив підвищеного тиску на розподіл матеріалів на колошнику

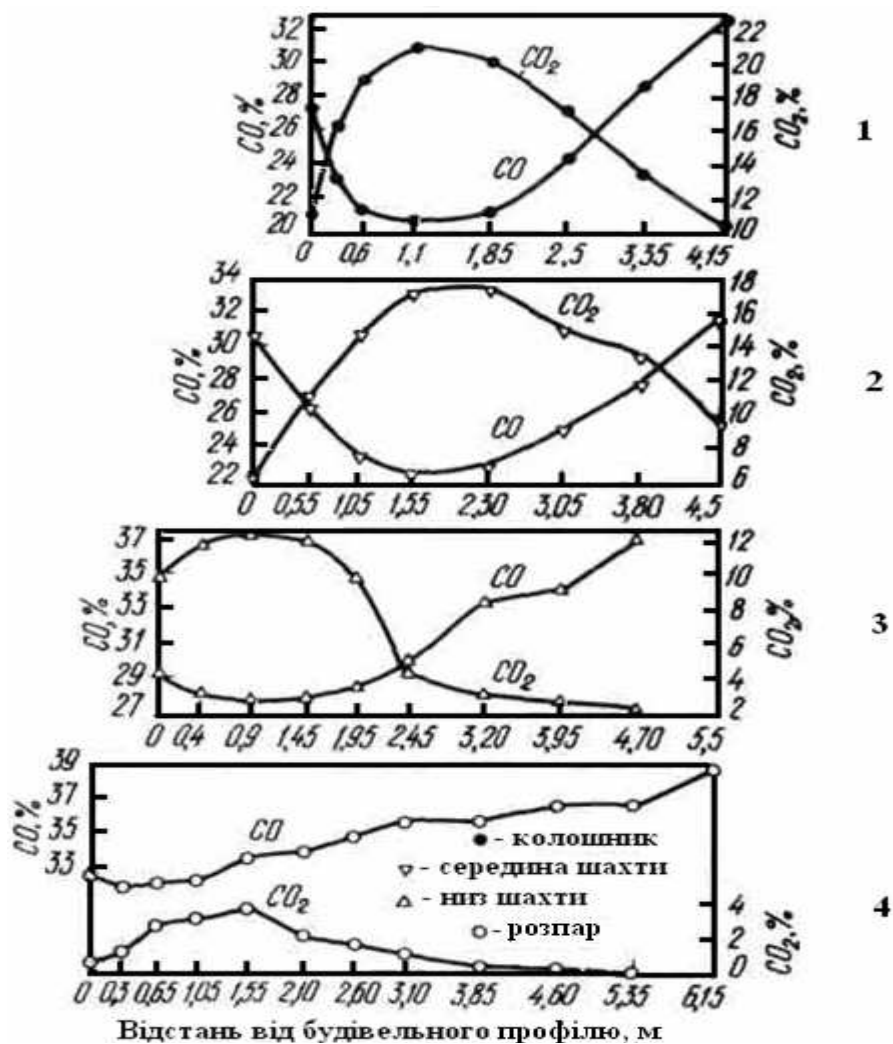
Дослідження показали, що підвищення тиску істотно змінює кути відкосу матеріалів на колошнику. При звичайному тиску підпор газів знизу зменшує силу ваги шматків, послабляє тертя між ними. При підвищенні тиску із зменшенням швидкості газів і підпору шматків матеріалів знизу матеріали ущільнюються, поверхня їх стає менш рухливою, кути відкосу збільшуються [13]. Тому була запропонована формула, що враховує перепад тиску:

$$\operatorname{tg}\alpha = \operatorname{tg}\alpha_0 - K((H+H')/R)(P_0/P_0-\Delta P) \quad (1.12)$$

де $(H + H')$ - висота падіння; ρ_0 - насипна маса матеріалів; ΔP - питоме падіння тиску в шарі. З формули видно, що при зменшенні ΔP (при підвищеному тиску) tga зростає.

Внаслідок зміни кутів відкосу і зменшення впливу підпору газу над рівнем засипу на траєкторії падіння шматків з конуса змінюється і розподіл матеріалів на колошнику: рівень шихти на периферії майже не міняється, а у осі знижується, тому шматки в більшій кількості скочуються до осі і товщина шару шихти у осі стає більше, ніж раніше. Що стосується розподілу газів по перерізу при підвищеному тиску, то з цього питання немає єдиної думки: в одних випадках посилюється, в інших зменшується рух газів у периферії [12].

На доменній печі об'ємом 2700 м^3 характер зміни вмісту газу по радіусу печі практично не змінився (рис 1.6).

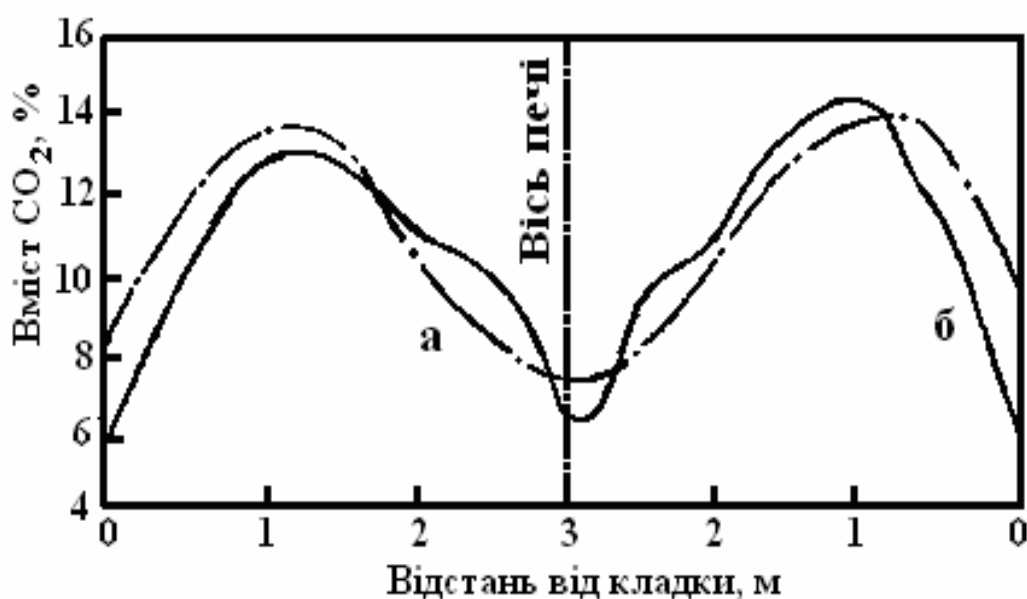


1 - колошник; 2 - середина шахти; 3 - низ шахти; 4 - розпар

Рисунок 1.6 - Зміна складу газу по радіусам горизонтів печі.

У розпарі в осьовій області печі діаметром >2 м двоокис вуглецю в газі практично відсутній. На середньому і верхньому горизонтах шахти характер зміни вмісту двоокису вуглецю відрізняється від нижнього горизонту лише деяким переміщенням гребеня рудних матеріалів до лінії будівельного профілю [14].

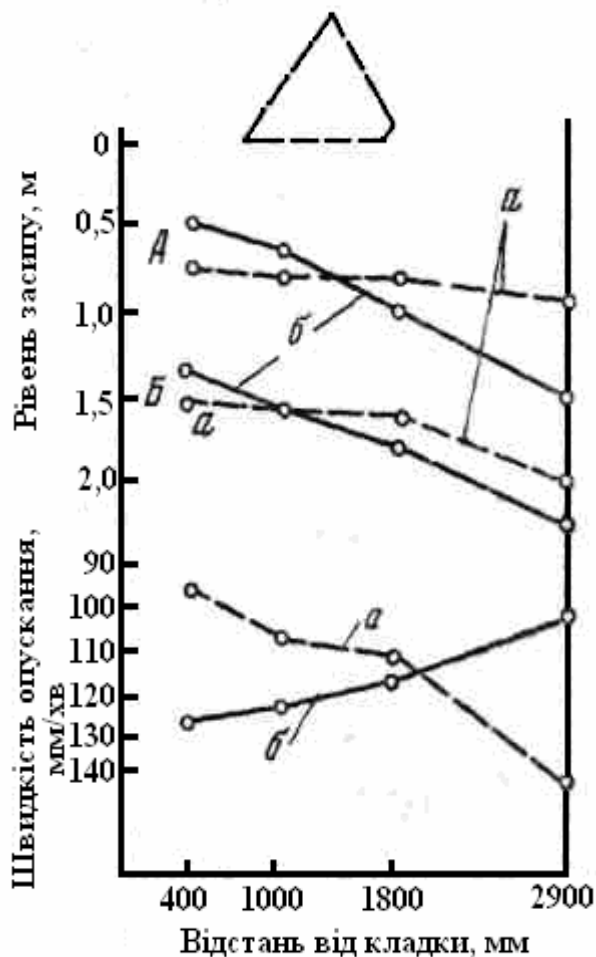
Проведені бригадою Санкт-Петербурзького політехнічного інституту дослідження показали, що при переведенні печі на підвищений тиск газів під колошником (80 КПа і вище) спостерігається сильно розвинений периферійний хід, що супроводжується інтенсивним нагрівом кладки шахти і погіршенням використання теплової і хімічної енергії газів: максимум на кривій вмісту вуглекислоти в газі по радіусу верхньої частини шахти зрушується до осі печі, вміст CO_2 на периферії падає (рис. 1.7).



а (— · —) - при 20 КПа; б (—) - при 80 КПа.

Рисунок 1.7 - Зміна складу газу по діаметру верхньої частини шахти при різних тисках газу на колошнику

Це явище викликається зміною розподілу матеріалів на колошнику: при підвищенні тиску газів глибина воронки матеріалів збільшується і відбувається перерозподіл швидкостей опускання шихти по радіусу колошника (рис. 1.8).



а - при тиску 20КПа ; б - при тиску 120 КПа

(А - після опускання подачі; Б - після паузи)

Рисунок 1.8 - Зміна розподілу матеріалів на колошнику і швидкості опускання при переході на підвищений тиск газу

Поглиблення воронки матеріалів на колошнику пояснюється в основному збільшенням кута відкосу коксу, що порівняно легко реагує на пониження швидкості стислого газу, при такому пониженні зменшується тертя між шматками коксу і газом і, отже, росте сила внутрішнього тертя.

Збільшення кута відкосу коксу, що супроводжується пониженням щільності укладання його шматків, призводить до своєрідної зміни перепадів тиску по висоті печі [7].

Посилення навантаження периферійного ходу, особливо при розпалі шахти і розпаренні, навіть відносно невеликих, дозволяє інтенсивніше завантажувати

периферію рудою. Практичне обґрунтування наведеного вище описується в роботах [8, 17, 18].

При переведенні печі на підвищений тиск спостерігається значний розвиток периферійного ходу, це необхідно передбачити і система загрузки має бути рудою вперед.

1.6 Вплив тиску на кількість винесеного пилю

Разом з газом з доменної печі виноситься значна кількість пилю, вміст якого при плавці на підготовленій шихті складає 2-40 г/м³. Нижня межа відноситься до роботи газу на підвищеному тиску [19].

Штучне підвищення тиску у верхній частині доменної печі зменшує об'єм вагової одиниці газу, що відходить, і його швидкість, що сприяє зменшенню винесення пилю, збільшенню часу контакту пічного газу з шихтовими матеріалами і до зростання міри використання газу.

При підвищенні тиску газу на колошнику сильно зменшується винесення колошникового пилю. За даними таблиці. 1.1 винесення пилю скорочується на 20 - 50 %, в деяких випадках - на 75 %. У доменних печах, що працюють з надлишковим тиском газу на колошнику 150-250 КПа, винесення пилю нерідко знижується до дуже невеликої величини - менше 10 кг/т чавуну

За даними [20] при встановленні якісних і кількісних залежностей винесення пилю від деяких параметрів доменного і агломераційного виробництва визначили, що істотний вплив на винесення пилю чинить тиск колошникового газу і вміст кремнію в чавуні, на кожні 100 КПа підвищення тиску і 0,1 % підвищення вмісту кремнію в чавуні призводять до зменшення винесення пилю.

Зменшення винесення при підвищенні тиску пояснюється пониженням швидкості газу над поверхнею шихти і його підйомної сили, внаслідок чого зменшується величина часток, що захоплюються газом в газовідводи. Умова рівноваги сферичної частки діаметром d (м) у висхідному газовому потоці визначається рівнянням (1.13), в якому ліва частина виражає діючу на частку підйомну силу газу, а права - вагу частки:

$$\psi \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\omega^2 \gamma}{2g} = \frac{\pi d^3}{6} \gamma_1 \quad (1.13)$$

де w - швидкість газу, м/с; γ і γ_1 - щільність газу і речовини частки, кг/м³; ψ - коефіцієнт опору газового потоку падінню частки, рівний, за даними Селла, при $0 < Re < 100$:

$$\psi = 24/Re + 4Re^{0,333} \quad (1.14)$$

Ця формула може бути з незначною похибкою ($\pm 5\%$ при $25 < Re < 75$) замінена на:

$$\psi = 20/Re^{0,65} \quad (1.15)$$

Підставляючи в (1.13) значення ψ з (1.15) і потім $w = w_0 \theta/\rho$; $\gamma = \gamma_0 \rho/\theta$; $g = 9,81$; $Re = w_0 \cdot \gamma_0 \cdot d/(\eta g)$, де θ - питома вага газу, η - динамічна в'язкість колошникового газу, ($2,4 - 2,8 \cdot 10^{-6}$ кг·с/м² при 200-300° С), отримаємо рівняння, рішення якого відносно діаметру частки дає (мм):

$$d = 3180 \eta^{0,394} \cdot \gamma_0^{0,212} \cdot \omega_0^{0,818} \cdot \Theta^{0,606} \cdot \gamma_1^{-0,606} \cdot P_k^{-0,606} \quad (1.16)$$

Частки більшого діаметру не можуть відноситися потоком газу і осідають на поверхні шихти. Згідно з рівнянням (1.16) максимальний розмір часток, що виносяться, зменшується зворотно пропорційно до абсолютного тиску газу в ступені 0,6. При підвищенні надлишкового тиску на колошнику від 10 до 250 КПа максимальний діаметр їх зменшується в $(350/110)^{0,6} \sim 2$ рази, а вагу - в 8 разів.

Внаслідок край нерівномірного розподілу швидкостей і температур газу по перерізу колошника, складнощів траєкторій газових потоків від поверхні шихти до газовідводів і нерівномірності винесення в часі (як відомо, найбільше

винесення буває у момент зсипання матеріалів з конуса), використання рівняння (1.16) для розрахункового визначення кількості пилу, що виноситься, було б неможливим і у тому випадку, якщо б гранулометричний склад компонентів шихти був в точності відомий [1, 21].

Як відомо, форсування ходу печей впливає на винесення пилу в протилежному напрямі. Тому необхідно визначити таке поєднання тиску газу і витрати дуття, при яких досягається одночасно як зростання продуктивності, так і зменшення винесення колошникового пилу [2].

1.7 Вплив тиску на витрати коксу

Витрати коксу на одиницю чавуну значною мірою визначають економічність доменної плавки: собівартість чавуну приблизно на 50 % обумовлена вартістю коксу. Тому питання про вплив тиску газу на витрату коксу в доменній плавці надзвичайно важливе [2].

Дж. Евері вважав основну перевагу запропонованого ним методу в тому, що підвищення тиску прискорює процеси непрямого відновлення в шахті, внаслідок чого певна міра відновлення досягається на вищих горизонтах і скорочується розвиток прямого відновлення (solution loss) за рахунок зменшення кількості CO_2 , що утворюється в гарячих зонах печі. Розуміючи, що підвищення тиску прискорює також і реакцію

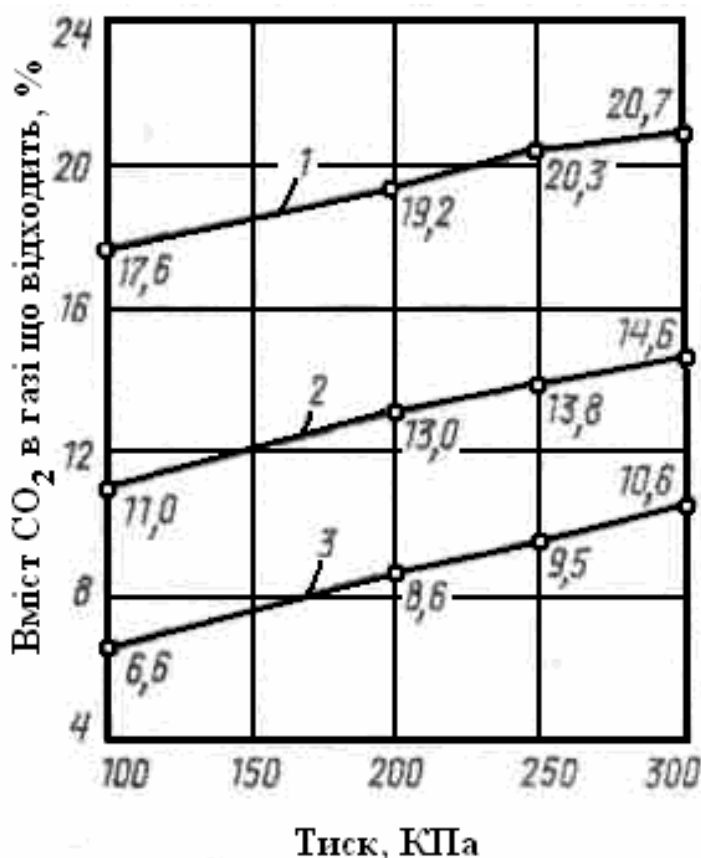


Проте Дж. Евері вважав, що швидкість цієї реакції повинна зростати у меншій мірі, ніж середня швидкість відновлення, оскільки підвищення тиску сильно зміщує вліво рівновагу реакції $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$, і у міру наближення до рівноваги швидкість її знижується.

Ці міркування Евері потребують наступних обмовок. По-перше, посилений розвиток непрямого відновлення не завжди супроводжується прискоренням відновлення у верхніх горизонтах печі. Як показали дослідження доменних

печей, що працюють з низькою витратою коксу і високим розвитком непрямого відновлення, процеси відновлення в таких печах зміщені, навпаки, в ділянку вищих температур. Це пояснюється тим, що в цих умовах процес відновлення у верхній частині печі наближається до рівноваги, внаслідок чого швидкість його сильно знижується.

По-друге, підвищення тиску газу не завжди призводить до прискорення відновлення. Так, з 12 досліджень, присвячених вивченню впливу тиску на швидкість відновлення, в трьох випадках залежність між ними за деяких умов не виявлена. У роботі автора, виконаній на протитечійній установці, показана лінійна залежність швидкості відновлення від тиску (рис. 1.9).



1 - криворізька руда; 2 - магнітний залізняк; 3 - агломерат.

Рисунок 1.9 - Вплив тиску газу на відновлення руд і агломерату в умовах протитечії (склад відновного газу 35 % CO і 65 % N₂, коефіцієнт надлишку газу n=1,9):

У деяких інших роботах ця залежність визначена близькою до параболічної (рис. 1.10). Як показали С. Т. Ростовцев і К. К. Шкодин різний характер впливу тиску слід пояснити відмінністю пористої структури відновлюваних матеріалів, що визначає вплив тиску на швидкість внутрішньої дифузії. Підвищення тиску прискорює кнудсенівську молекулярну течію, тобто. дифузію в дрібних порах, радіус яких (r) сумірний з довжиною вільного пробігу молекул (L), і не впливає на звичайну (вільну) дифузію у великих порах, в яких $r \gg 10L$. Чим більша частина внутрішньої поверхні відновлюваного матеріалу доводиться на дрібні пори, тим в більшій мірі підвищення тиску прискорює відновлення.

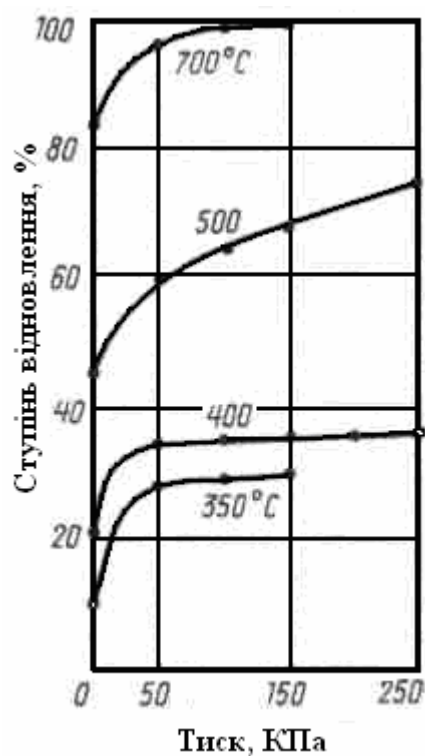


Рисунок 1.10 - Вплив надлишкового тиску на швидкість відновлення зерен залізняку розміром 0,75-1,0 мм воднем (руди 2 гр, тривалість дослідження 15 хв, витрата водню 40 л/год)

Виходячи з закономірності дифузії газів в пористих тілах, К. К. Шкодин показав, що з підвищенням тиску його вплив на швидкість відновлення повинен поступово затухати, і що залежність швидкості відновлення від тиску повинна змінюватися під дією будь-якого чинника, що впливає на швидкість дифузії в об'ємі пор або через шар відновлених продуктів. Таким чином, характер впливу тиску на швидкість відновлення визначається фізичною структурою

відновлюваного матеріалу і залежно від останньої по-різному для кожного матеріалу змінюється під дією інших чинників (температури, витрати і складу газу), прискорюючих або уповільнюючих процес.

Оскільки в більшій частині залізорудних компонентів шихти на дрібні пори доводиться значна частина внутрішньої поверхні, то можна вважати, що в більшості випадків підвищення тиску газів в доменних печах повинне супроводжуватися прискоренням процесу відновлення. У новітній японській кінетико-математичній моделі доменного процесу прийнято, що швидкість відновлення пропорційна квадратному кореню з абсолютного тиску.

Пізніша теоретична і експериментальна робота К. К. Шкодін з співробітниками показала, що характер впливу тиску на швидкість реакції $\text{CO}_2 + \text{C} = 2\text{CO}$ також визначається пористою структурою вуглецевого матеріалу (досліджувалися череповецький кокс і торфококс) і особливостями дифузійних явищ. Підвищення тиску до 600 КПа зменшувало швидкість окислення торфококса (матеріалу з великими порами) при 750°C і збільшувало швидкість окислення коксу при 950°C - в тим більшій мірі, чим вище була витрата газу і концентрація CO_2 в ньому. У обох випадках з підвищенням тиску вплив його на швидкість реакції затухає.

Мабуть, швидкість газифікації коксу може зростати і в більшій, і у меншій мірі, чим швидкість відновлення оксидів заліза при такому ж підвищенні тиску, - залежно від пористої структури різних компонентів шихти. В результаті прискорення обох процесів (відновлення і газифікація коксу) можна вважати, що якщо при підвищенні тиску розвиток непрямого відновлення і зростає в деяких випадках, то далеко не в такій мірі, як припускав Евері, що вважав за можливе повне «пригнічення» прямого відновлення.

Іншим, окрім посилення непрямого відновлення, потенційним джерелом економії коксу є підвищення температури дуття, яке можливе без порушення рівного ходу в результаті зменшення противотиску газів при підвищенні їх тиску в печі. В більшості випадків при переведенні доменних печей на роботу з підвищеним тиском, а також при наступному переході на ще вищий тиск температура дуття дійсно підвищувалася - і такою мірою, що цьому підвищенню

могла бути приписана уся або майже уся економія коксу, що спостерігалася. Це можна проілюструвати наступними даними, приведеними в таблицях:

Таблиця 1.2 - Вплив зміни температури дуття та тиску колошникового газу на витрати коксу на Новоліпецькому металургійному комбінаті.

	Піч № 1			Піч № 2		
	Низьке	60	80	Низьке	60	80
$P_{к.}, \text{КПа}$	Низьке	60	80	Низьке	60	80
$t_{д}, \text{°C}$	738	802	834	685	784	847
$K, \text{кг/т чавуну}$	1160	1152	1125	1212	1151	1135

Нижче приведені аналогічні відомості по Череповецькому металургійному комбінату.

Таблиця 1.3 - Вплив зміни температури дуття та тиску колошникового газу на витрати коксу на Череповецькому металургійному комбінаті.

	Піч № 1			Піч № 2		
	103	116	148	108	129	148
$P_{к.}, \text{КПа}$	103	116	148	108	129	148
$t_{д}, \text{°C}$	876	910	954	885	886	950
$K, \text{кг/т чавуну}$	724	704	671	695	683	644

На тих комбінатах, на яких при переведенні доменних печей на підвищений тиск температура дуття не змінювалася або підвищувалася трохи, і економія коксу була дуже малою:

Таблиця 1.4 - Вплив зміни тиску колошникового газу на витрати коксу при незначному підвищенні температури дуття на Кузнецькому і Магнітогорському металургійних комбінатах.

	КМК		ММК	
	10	55	17	80
$P_{к.}, \text{КПа}$	10	55	17	80
$t_{д}, \text{°C}$	834	867	827	842
$K, \text{кг/т чавуну}$	869	855	711	700

За даними таблиці 1.1 економія коксу на різних доменних печах коливалася в більшості випадків в межах 1,5-3 %. Кореляція величини економії коксу з тиском газу на колошнику у край складна, оскільки переведення доменних печей на підвищений тиск відбувалося одночасно із здійсненням багатьох інших заходів (збільшення вмісту агломерату в шихті, застосування офлюсованого агломерату, зволоження дуття, підвищення його температури та ін.), що супроводжувалися не меншою економією коксу [11]. Диференціювати вплив кожного з них шляхом «приведення» витрати коксу до порівнянних умов не завжди вдається з достатньою точністю. Крім того, переведення на підвищений тиск могло використовуватися в різних напрямках:

а) інтенсивність плавки підвищувалася до досягнення первинного або близького до нього перепаду;

б) встановлювався проміжний режим. У першому випадку досягалася максимальна економія коксу, а продуктивність зростала зворотно пропорційно до відносної витрати коксу; у другому - досягалася максимальна продуктивність при мінімальній економії коксу.

Економія коксу від підвищення надлишкового тиску газу на колошнику вище 100 КПа оцінюється в $0,5 \pm 0,2\%$ на кожні 10 КПа підвищення тиску [1].

За практичними даними значного зниження коксу при підвищенні тиску колошникового газу не спостерігається.

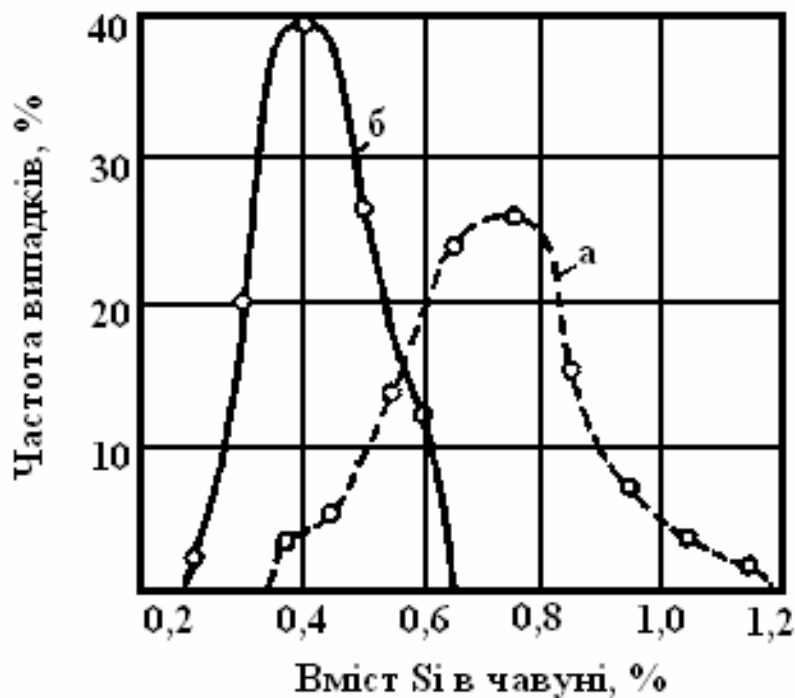
1.8 Вплив тиску на склад чавуну

У дискусії по доповіді Дж. Евері Р. Хенер висловив думку, що підвищення тиску в доменній печі повинне несприятливо позначитися на ході реакцій, що супроводжуються збільшенням об'єму газової фази:



По його припущенню, при подвоєнні парціального тиску CO в горні і при тому ж складі шлаку в чавун переходить $\frac{1}{4}$ кількості кремнію, $\frac{1}{2}$ марганцю і удвічі більше сірки.

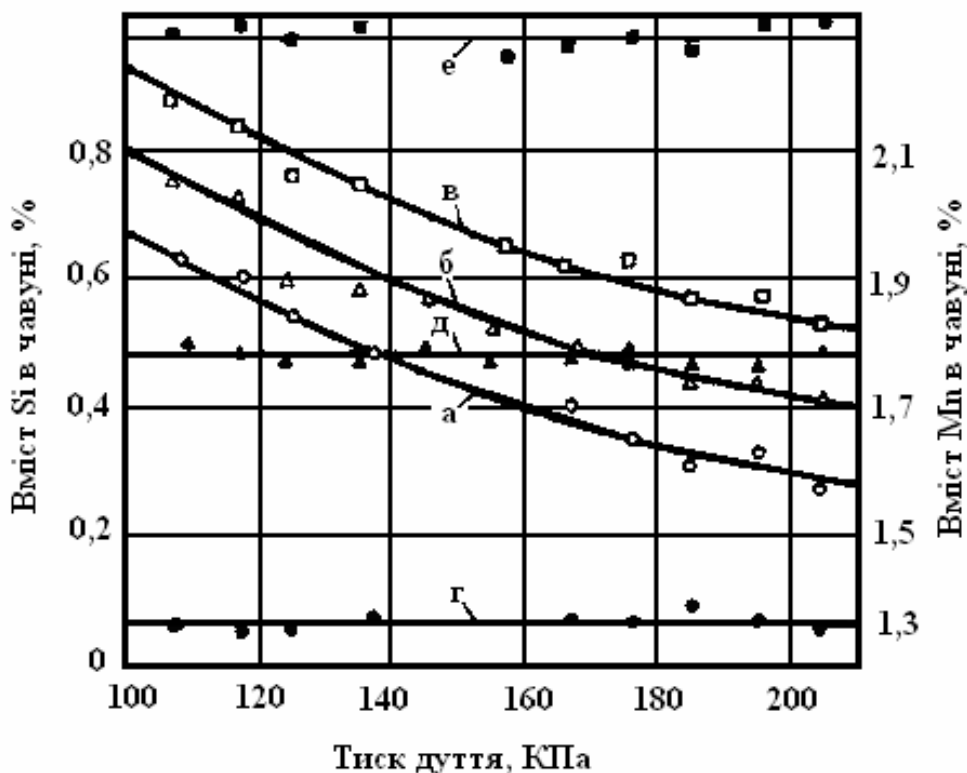
Дослідження В. Л. Покришкіна, проведені на доменних печах № 1 і 2 комбінату «Азовсталь», коли печі працювали як на звичайному, так і на різних рівнях підвищеного тиску, якісно підтвердили це припущення відносно відновлення кремнію і марганцю, але зниження вмісту їх в чавуні було менше передбаченого Р. Хенером (рис. 1.11 і 1.12).



а - надлишковий тиск дуття 111-120 КПа; б - надлишковий тиск дуття 181-190 КПа.

Рисунок 1.11 - Частотні криві вмісту кремнію в чавуні при звичайному і підвищеному тиску газів

Первинними даними служили аналізи чавуну по випускам і показники роботи печі за передуючих випуску 4 години. Склад шихти і її компонентів в період дослідження практично не мінявся; рівний хід печей сприяв отриманню достовірних даних. Для усунення впливу температури горна і основності шлаку усі отримані на доменній печі № 2 дані (по 1154 випускам) були розподілені на три групи за вмістом марганцю в чавуні і основності шлаку, відповідні певним температурним умовам.



а, б, в - вміст кремнію в чавуні I, II і III груп випусків; г, д, е - вміст марганцю в чавуні I, II і III груп випусків

Рисунок 1.12 - Залежність вмісту кремнію в чавуні від тиску газу (доменна піч № 2 комбінату «Азовсталь»)

Як видно з рис. 1.12, із збільшенням надлишкового тиску дуття на 110 КПа, вміст кремнію в чавуні зменшився. Середнє пониження вмісту кремнію на кожні 10 КПа підвищення тиску було однаковим для усіх трьох груп випусків і склало 0,036 %. Приблизно такі ж результати були отримані і на доменній печі № 1. Обробка даних по доменній печі № 3 комбінату «АрселорМіттал-Кривий Ріг», що виплавляла ливарний чавун, показала, що при підвищенні надлишкового тиску дуття зі 100 до 180 КПа вміст кремнію в чавуні знизився з 3,2 до 2,8 % або в середньому на 0,05 % на кожні 10 КПа підвищення тиску. Зниження [Si] було, таким чином, приблизно в 1,5 разу більше встановленого на комбінаті «Азовсталь» при виплавці передільного чавуну, але відносна величина його - значно менша.

Вплив тиску на відновлення марганцю виявився набагато слабкішим; при підвищенні надлишкового тиску дуття зі 100 до 210 КПа вміст марганцю в чавуні знизився з 2,05 до 1,9 % [4, 22].

Із збільшенням тиску дуття до 210 КПа знижувався також, всупереч припущенню Хенера, вміст сірки в чавуні - приблизно на 0,03 % для усіх трьох груп випусків (при роботі на звичайному тиску вміст сірки в чавуні, що випускається з доменних печей, підтримувався на комбінаті «Азовсталь» на рівні 0,10-0,14 %, з розрахунку на його десульфурацію марганцем в ковшах і в міксері по шляху надходження до споживачів). Пониження вмісту сірки в чавуні при роботі на підвищеному тиску пояснюється рівнішим ходом доменних печей, а також зменшенням кількості її в шихті в результаті деякого пониження витрат коксу [1, 4, 23].

Нарешті, було також виразно виявлено значне (на 0,4-0,5 %) збільшення вмісту вуглецю в чавуні при підвищенні тиску дуття у вказаних вище межах. У роботі В. Л. Покришкіна це пояснюється посиленням вуглецюванням губчастого заліза вуглецем сажі, кількість якого при підвищенні тиску газів різко зростає [1, 4, 24].

В. Н. Андронов вказав на те, що пониження вмісту кремнію в чавуні при збільшенні тиску повинне супроводжуватися підвищенням його температури, оскільки збережене при меншому відновленні кремнію тепло передається рідким і газоподібним продуктам плавки. За його розрахунками підвищення температури чавуну при збільшенні тиску дуття в 1,5 разу повинно скласти для різних видів чавуну 32-40° С. Підвищення температури послаблює знижуючий вплив тиску на вміст кремнію в чавуні і сприяє його десульфурацію [1, 23].

З усього сказаного можна зробити висновок, що підвищення тиску газів сприяє отриманню малокрем'янистого передільного чавуну і «ускладнює» виплавку чавуну з високим вмістом кремнію і марганцю. Ці ускладнення долаються, проте, шляхом деякого підвищення витрати коксу і пониження продуктивності проти того - невідомого - рівня цих показників, який мав би місце, не будь вказаного впливу тиску на склад чавуну. На практиці тому «ускладнення» залишаються непоміченими і, навпаки, на деяких комбінатах

(Череповецький, Новоліпецький) найбільший техніко-економічний ефект від підвищення тиску газів відзначався саме при виплавці ливарного чавуну.

Можна було б вважати, що даний прихований вплив тиску на склад чавуну впливає на поверхню при виплавці феромарганцю, виразившись у високому вмісті MnO в шлаку. Насправді, на доменних печах країн СНД, що виплавляють 72 % - вий феромарганець при надлишковому тиску газу на колошнику 80-100 КПа (піч № 1 Краматорського заводу, № 2 Алчевський меткомбінат, № 1 Косогорського заводу), вміст MnO в шлаку знаходиться в межах 6- 8%, будучи нижчим, ніж на печі № 2 Косогорського заводу, що працює на звичайному тиску [1].

1.9 Ефективність впровадження підвищення тиску газів на колошнику доменних печей

Для оцінки ефективності застосування підвищеного тиску порівняні техніко-економічні показники роботи печі з різним тиском газів при відносній постійності усіх інших чинників, що впливають на показники доменної плавки.

У таблиці 1.5 приведені дані ефективності застосування підвищеного тиску по трьох комбінатах, отримані на підставі узагальнення досвіду роботи доменних печей при зміні тиску газів на колошнику.

З приведених в таблиці 1.5 даних витікає, що при підвищенні тиску до 50 - 60 КПа ефективність виражається в прирості продуктивності на 6-8 %, отриманої в результаті збільшення інтенсивності ходу на 5,5-6,0 % і економії витрат коксу на 1,2-2,5 %.

Таблиця 1.5 - Ефективність застосування підвищеного тиску

Найменування комбінату	№ печі	Тиск газу на колошнику, КПа	Зміна техніко-економічних показників, %			
			Приріст продуктивності	Економія коксу	Зменшення кількості пилу	Збільшення інтенсивності
«Азовсталь»	2-4	160	7,5	2,1	20,0	5,5
«АрселорМіттал-Кривий Ріг»	3	150	8,0	1,2	40,0	6,0
Макєєвський метзавод	4	150	6,0	2,5	21,0	5,6

Верхня межа приросту продуктивності (8,0 %) по комбінату «АрселорМіттал-Кривий Ріг» відповідає більшій інтенсивності ходу (6,0 %) і найменшій економії у витраті коксу (1,2 %).

В усіх випадках при переведенні доменних печей на роботу з підвищеним тиском було отримано зменшення (від 20 до 40 %) винесення колошникового пилу.

Правильність приведених даних підтверджується близькими за значенням результатами роботи печей інших комбінатів. Так, на доменних печах комбінату «Запоріжсталь» при переведенні на роботу з тиском газу на колошнику до 145-149 КПа отримано приріст продуктивності на 4,5-6,0 %, економія у витраті коксу 0,7-1,2 % і зменшення кількості пилу на 8-29 % [4].

На Магнітогорському металургійному комбінаті з переведенням доменних печей на підвищений тиск газу на колошнику до 160-180 КПа досягнуте збільшення продуктивності на 3,0-6,0 % і зниження витрат коксу на 3,0-5,0 %. Винесення колошникового пилу зменшилося на 35-40 % [4, 6]. Слід зазначити, що до останнього часу на Магнітогорському металургійному комбінаті в меншій мірі, ніж на інших комбінатах, використовували підвищення тиску для збільшення кількості дуття. В результаті має місце менший приріст продуктивності, проте досягається велика економія коксу [4].

Підвищення тиску супроводжується збільшенням витрат за деякими статтями. Зокрема, збільшується витрата пари на стискування дуття. Збільшення загальної потреби в парі дещо знижує собівартість 1 т пари (внаслідок зміни долі постійних витрат), але в цілому вартість 1000 м³ дуття зростає.

Зменшення винесення колошникового пилу дозволяє понизити питому витрату агломерату, вапняку і коксу, відповідно зменшивши витрати по цих статтях, проте при цьому одночасно зменшується вихід шлаку і доменного газу, що зменшує суми надходжень за гранульований шлак і газ, що відпускаються на сторону.

При підвищенні тиску газу під колошником знижується стійкість засипного апарату, що збільшує простої печі і призводить до втрат виробництва (заміна засипного апарату, якщо вона не приурочена до середнього або капітального

ремонту, марно віднімає біля двох-трьох діб). 80 % витрат на заміну засипного пристрою доводиться на виготовлення, монтаж і демонтаж засипного апарату; ці суми покриваються з амортизаційних відрахувань і до собівартості чавуну не відносяться. Інші 20 % - втрати на постійних витратах, додаткова витрата коксу на розігрівання печі після зупинки і тому подібне - відносяться на собівартість чавуну.

Був зроблений розрахунок питомих капітальних витрат на виробництво 1 т чавуну в рік в масштабі усього народного господарства при різному тиску газу під колошником в умовах трьох найбільших металургійних комбінатів «АрселорМіттал-КривийРіг» (печі А і Б об'ємом 1386 м³ і 2000 м³), Череповецького (піч В корисним об'ємом 1033 м³) і Магнітогорського металургійного комбінату (піч Г об'ємом 1370 м³). Результати представлені в таблиці 1.6

Таблиця 1.6 - Зміна собівартості чавуну СЧ, питомих капітальних витрат ПК і приведених витрат ПВ при зміні тиску Р в печах А-Г

	А	Б		В	Г*		Г*	
Р, КПа	80/120	30/150	150/170	100/150	30/80 (I)	30/80 (II)	100/150 (I)	100/150 (II)
СЧ, %	1,5	2,2	1,1	1,2	3,9	0,8	5,1	2,8
ПК, %	3,3	9,8	2,3	3,8	4,4	2,2	5,3	1,3
ПВ, %	1,9	4,1	1,2	1,6	4,0	1,2	5,2	2,3

Чисельник – початковий тиск, знаменник – кінцевий тиск.

* Особливості варіантів I і II - в тексті.

На Магнітогорському комбінаті розраховували два варіанти підвищення тиску:

I - у поєднанні з високими рудними навантаженнями для найбільшої економії коксу;

II - при невисоких рудних навантаженнях з метою переважного підвищення продуктивності.

З розрахунку на 100 КПа продуктивність Р і питома витрата коксу К при цьому змінилися, ці зміни наведені в табл.1.7

Таблиця 1.7 - Вплив підвищення тиску на продуктивність і витрати коксу доменної печі Магнітогорського комбінату

Тиск, КПа	30/80 (I)	30/80 (II)	100/150 (I)	100/150 (II)
Р, %	+0,08	+0,72	+1,24	+0,30
К, %	-1,40	-0,48	-1,53	-0,80

Чисельник – початковий тиск, знаменник – кінцевий тиск.

По зміні показників в таблиці. 1.6 можна зробити висновок, що варіант I з вищою економією коксу є значно економічнішим.

На підставі вищевикладеного з'являється необхідність в більш детальному визначенні впливу роботи доменних печей підвищеного тиску на технологічні параметри процесу виплавки чавуну [24].

З вище наведеного можна зробити такий висновок, що при роботі печей на підвищеному тиску покращуються не тільки технологічні параметри, а ще й економічні. Рекомендується держати тиск колошникового газу максимально можливим. Тому виникає необхідність встановлення впливу тиску колошникового газу на показники доменної плавки.

2 МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТІВ

В даний час комп'ютеризація охопила всі сфери діяльності сучасного суспільства, в тому числі і промислове виробництво. Зараз неможливо уявити собі діяльність будь-якої організації чи підприємства без створення системи об'єднаної комп'ютерної мережі для зберігання і передачі інформації. Комп'ютеризація наукової діяльності забезпечила створення програмних продуктів на основі побудови складних математичних моделей технологічних процесів, в тому числі і доменної плавки, для якої характерна сукупність одночасно протікають процесів теплообміну, відновлення заліза, газодинаміки, фазових перетворень, фільтрації розплавів і багатьох інших [25].

У зв'язку з різноманіттям явищ, що відбуваються в робочому просторі доменної печі при високих температурах і підвищеному тиску в протivotоке величезних мас шихтових матеріалів і відновного газу, і труднощами їх фізичного моделювання, а також прямих вимірювань параметрів доменної плавки, математичні методи дослідження отримали значний розвиток [25 -31].

У НМетАУ для оптимізації базових режимів роботи доменних печей і методів оперативного управління доменною плавкою створена діалогова система «Персональний комп'ютер доменщика», орієнтована на оператора доменної печі. До її складу входять підсистеми «Шихта», «Завантаження», «Дуття», «Шлаки», «Розрахунок», «Тренажер», що дозволяють оптимізувати базові режими роботи доменних печей і методи оперативного управління доменною плавкою.

Завданням досліджень є вивчення розрахунковим шляхом підвищення тиску на колошнику доменної печі на показники плавки.

Стосовно до умов роботи доменної печі № 2 ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» з використанням спеціально розробленої програми «Шихта-N» [27] здійснювали розрахунковий аналіз зміни технологічних параметрів процесу плавки чавуну при ступінчастому підвищенню тиску.

Програма реалізована на алгоритмічній мові RASKAL і складається з послідовного ряду підпрограм, які виконують:

- розрахунок шихти (визначення точної витрати агломерату, флюсу, кількості і складу шлаку, а також його сумарної основності В, коефіцієнта розподілу сірки між шлаком і чавуном);

- розрахунок кількості збагаченого киснем вологого і сухого дуття;

- розрахунок кількості і складу колошникового газу (визначення балансу водню, середнього ступеня використання водню і оксиду вуглецю, кількості оксиду і діоксиду вуглецю, водню і азоту, які перейшли в колошниковий газ);

- розрахунок матеріального балансу процесу доменної плавки (визначення сумарного приходу матеріалів в доменну піч і вихід продуктів плавки);

- розрахунок температури колошникових газів (визначення теплоємності шихтових матеріалів і газів при їх температурах, середньої температури шихти, водяних еквівалентів газів і шихти; температури колошникового газу);

- розрахунок всіх статей теплового балансу, крім статті «втрати в навколишнє середовище»;

- розрахунок теоретичної температури горіння, температури горнового газу, чавуну і шлаку;

- розрахунок величини втрат теплоти в навколишнє середовище;

- розрахунок ступеня прямого відновлення заліза;

- розрахунок коефіцієнта використання корисного об'єму доменної печі і інтенсивності горіння вуглецю.

При проведенні розрахункових досліджень використовували наступні вихідні дані:

- якісні показники компонентів шихти, природного газу, коксу, пиловугільного палива, а також чавуну;

- вихідні параметри дуття;

- заданий температурний режим доменної печі;

- величину виносу основних шихтових матеріалів;

- характер розподілу і використання газу в печі.

Виконано розрахунки технологічних параметрів доменної плавки при використанні пиловугільного палива наступних складів:

- вугілля марки СС, що містить 80,3% вуглецю;

- суміш вугілля марок СС і АТ з співвідношенням витрат 1:1 і середнім вмістом вуглецю 85,95%;

- вугілля марок СС і Т з співвідношенням 1:1 і середнім вмістом вуглецю 81,22%.

Варіант 1 є базовим, тобто при роботі доменної печі без добавок палива, варіант 2 відповідає роботі печі при витраті природного газу 100 м³/т чавуну, варіанти 3-12 передбачають послідовну заміну природного газу пиловугільним паливом і доведення його витрати до 160 кг / т чавуну.

У дослідні періоди плавки забезпечували стабільність наступних технологічних параметрів:

- співвідношення витрат «агломерат - окатиші - залізна руда» становило 1,0: 0,05: 0,08 при середньому вмісті заліза рівному 55,2%;

- теоретичну температуру горіння підтримували на рівні 2095 ° С за рахунок варіювання параметрів комбінованого дуття;

- при відносно постійній величині основності і виході шлаку вміст сірки в чавуні не перевищує 0,033%, а кремнію - 0,62%.

3 ВПЛИВ ПІДВИЩЕННЯ ТИСКУ НА ОСНОВНІ ПОКАЗНИКИ РОБОТИ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

3.1 Результати лабораторних досліджень підвищення тиску на техніко-економічні показники доменної плавки за допомогою ЕОМ

В умовах університету на кафедрі металургії за допомогою програми «ШИХТА» розраховані і отримані дані, характеризуючи вплив тиску колошникового газу на деякі показники доменної плавки [32].

У програмі при усіх постійних початкових даних: кількість завантажувальних у піч шихтових матеріалів, кількість палива, кількість дуття, вміст кисню в дутті, та ін., змінюється один параметр - тиск колошникового газу. Дані, які змінювали приведені в таблиці 3.1

Таблиця 3.1 - Зміна тиску колошникового газу

Тиск колошникового газу, КПа					
P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	P ₅	P ₆
20	100	150	200	250	300

На підставі результатів обчислень вибирались основні техніко-економічні показники доменної плавки, які найбільш змінилися в процесі збільшення тиску колошникового газу і ті, що мають найбільший інтерес для даної дослідної роботи. Ці дані зведені в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 - Основні показники доменного процесу при підвищенні тиску колошникового газу

P, КПа	КВКО	П, т/добу	$\Delta P_{\text{заг}}$, КПа
20	0,572	2645,105	143,5
100	0,493	3068,966	135,9
150	0,461	3281,996	131,1
200	0,439	3446,469	126,4
250	0,422	3585,308	121,6
300	0,411	3681,265	116,9

В процесі розрахунку тиск колошникового газу змінювали від 20 до 300 КПа. Отримали залежності коефіцієнту корисного використання об'єму і загального перепаду тиску від підвищення тиску газу.

Оскільки основним показником доменного процесу є середньодобова продуктивність, то дані (КВКО), отримані за допомогою електронної обчислювальної машини. Завдяки формулі $KVKO = V_k / \Pi$ розраховували продуктивність для кожного значення тиску колошникового газу.

Для печі корисним об'ємом 1513м^3 , який відповідає об'єму печей комбінату «Запоріжсталь», отримали середньодобову продуктивність печі при різному тиску колошникового газу:

$$\Pi_1 = \frac{V_{\kappa 1}}{KBKO_1} = \frac{1513}{0,572} = 2645,105, m / \text{добу}$$

$$\Pi_2 = \frac{1513}{0,493} = 3068,966, m / \text{добу}$$

$$\Pi_3 = \frac{1513}{0,461} = 3281,996, m / \text{добу}$$

$$\Pi_4 = \frac{1513}{0,439} = 3446,469, m / \text{добу}$$

$$\Pi_5 = \frac{1513}{0,422} = 3585,308, m / \text{добу}$$

$$\Pi_6 = \frac{1513}{0,411} = 3681,265, m / \text{добу}$$

З літературних джерел [10, 11] відомо, що при підвищенні тиску на кожні 10 КПа в інтервалі 100 - 200 КПа, середньодобова продуктивність зростає на 1 - 2 %.

У цьому дослідженні продуктивність також підвищується і має таку залежність:

При зміні тиску від 100 КПа до 200 КПа:

$$\Pi_1 = \frac{3446,469 - 3068,966}{3446,469} \cdot 100\% = 10,95\%$$

Тобто в середньому на кожні 10 КПа зміни тиску колошникового газу в інтервалі 100 - 200 КПа, приходится збільшення продуктивності на

$$\frac{10,95}{10} = 1,1\%$$

Таким чином данні, отримані за допомогою програми «Шихта» співпадають з літературними [1, 2, 10, 11].

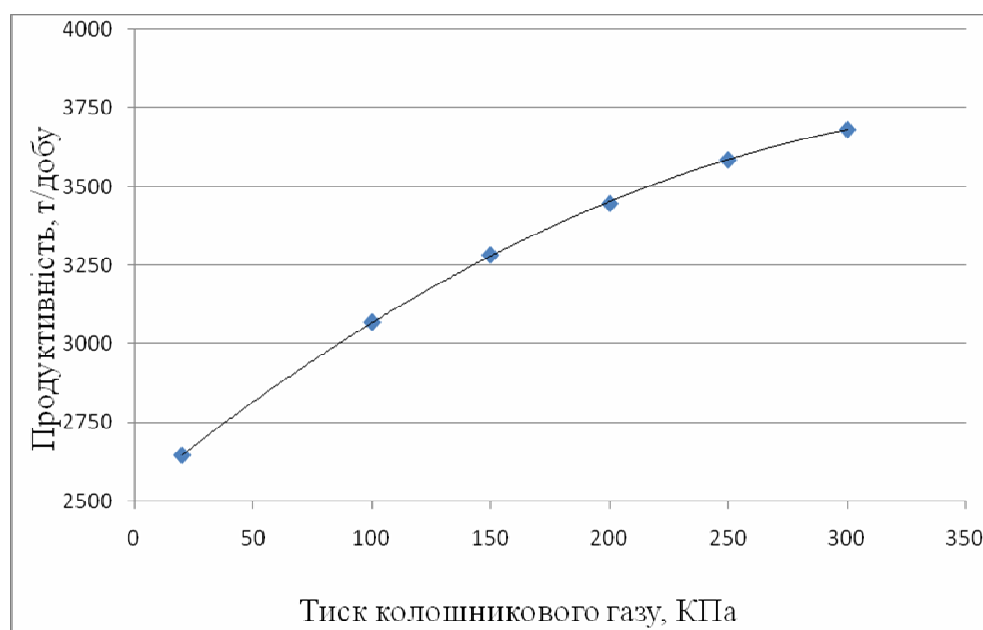
При зміні тиску від 200 КПа до 300 КПа:

$$П_2 = \frac{3681,265 - 3446,469}{3681,265} \cdot 100\% = 6,38\%$$

При підвищенні тиску в інтервалі 200-300 КПа продуктивність знижується на кожні 10 КПа становить:

$$\frac{6,38}{10} = 0,64\%$$

За даними таблиці 3.2 побудовано графік залежності продуктивності при зміні тиску колошникового газу, який представлено на рис. 3.1

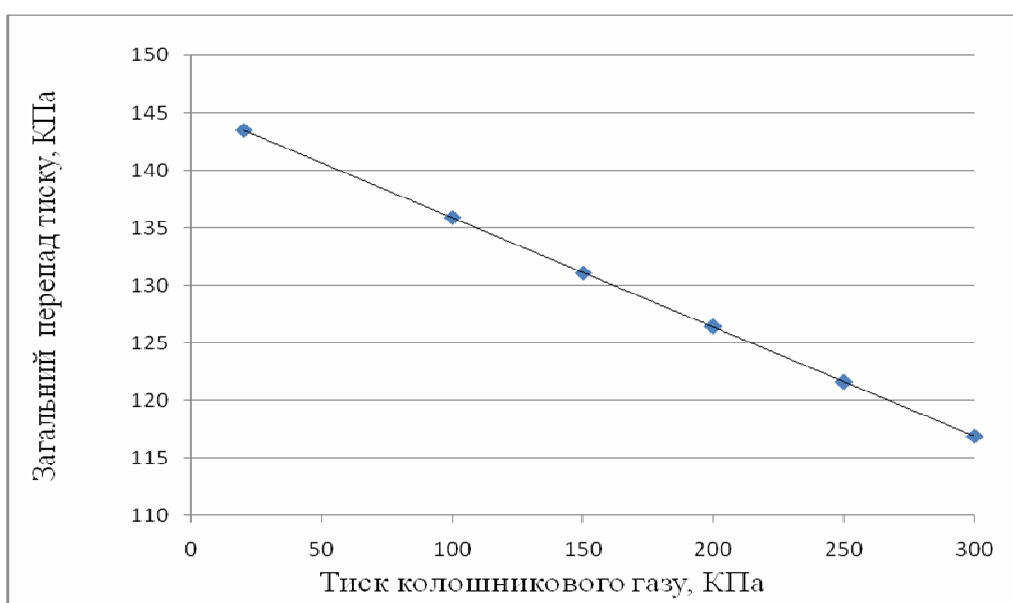


$$y = -0,01x^2 + 6,20x + 2525,61; R^2 = 0,988$$

Рисунок 3.1 - Вплив підвищення тиску колошникового газу на продуктивність (розрахункові дані)

Порівнявши теоретичні [1, 2, 5, 7, 8, 10-12, 17, 18], розрахункові дані і залежності, приведені на рис. 2.1, можемо зробити висновок, що з підвищенням тиску колошникового газу продуктивність доменної печі дійсно підвищується.

Зі збільшенням тиску колошникового газу зменшується його об'єм, що призводить до зменшення перепаду тиску по висоті. Знаючи, що кожна піч працює на граничному перепаді тиску, то можна проводити плавку більш інтенсивно при збільшенні кількості дуття до граничного перепаду тиску. Зміна перепаду тиску по висоті печі при підвищенні тиску колошникового газу зображена на рис. 3.2



$$y = 0,00000001x^2 - 0,00095446x + 1,454; R^2 = 0,99$$

Рисунок 3.2 - Вплив підвищення тиску колошникового газу на загальний перепад тиску (розрахункові дані),

Теоретичними і практичними даними [1, 2, 5, 7, 8, 10-13, 17, 18] доведено, що в результаті підвищення тиску на колошнику і його постійності, підтримуваної автоматично, хід печі стає рівнішим, а загальний перепад тиску знижується.

3.2 Аналіз впливу підвищення тиску колошникового газу на печач

3.2.1 Вплив корисного об'єму доменної печі на тиск колошникового газу

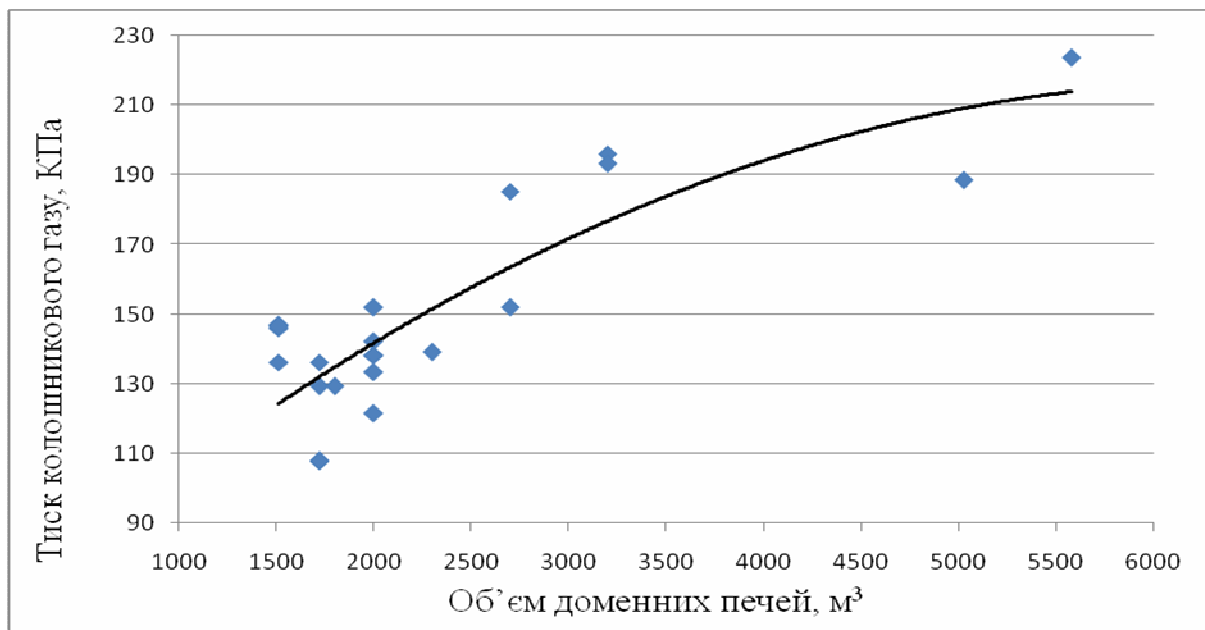
В даний час на підприємствах чорної металургії України, країн ближнього і далекого зарубіжжя виводяться з експлуатації доменні печі малого об'єму із

застарілим устаткуванням, проводяться капітальні ремонти першого розряду доменних печей, що залишаються в експлуатації.

Збільшення корисного об'єму доменних печей дозволяє отримати приріст виробництва чавуну, збільшити продуктивність праці, максимально механізувати і автоматизувати виробничі процеси і понизити питомі капітальні витрати на кожну тонну приросту чавуну і одиницю собівартості продукції. Інтерес представляє виявлення залежності зміни тиску колошникового газу при збільшенні об'єму на діючих печах.

Під час проведення дослідження брались до розрахунку 23 печі різного корисного об'єму від 1513 м³ до 5580 м³ шести заводів СНД [27-31]. Отримані дані [29] зведені у табл. 3.3

За даними, приведеними в табл. 3.3 побудовано графік залежності тиску колошникового газу від об'єму доменної печі, який зображено на рис 3.3.



$$y = -0,000004x^2 + 0,049x + 58,836, R^2 = 0,71$$

Рисунок 3.3 - Залежність тиску колошникового газу від об'єму печі

На графіку видна чітка залежність, яка доводить, що зі збільшенням об'єму доменної печі, тиск колошникового газу також збільшується.

Отже, при збільшенні об'єму доменної печі, збільшують тиск колошникового газу, для отримання рівного ходу печі, кращого використання відновлювального газу, більш рівного сходу шихти, а також більшої продуктивності.

Таблиця 3.3 - Колошниковий тиск на печах різного об'єму країн СНД

№ печі	«Запоріжсталь»		№ печі	«Азовсталь»		№ печі	Череповецький		№ печі	Новоліпецький		№ печі	Ім. Ілліча		№ печі	«АрселорМіттал- Кривий Ріг»	
	V _к , м ³	P, КПа		V _к , м ³	P, КПа		V _к , м ³	P, КПа		V _к , м ³	P, КПа		V _к , м ³	P, КПа		V _к , м ³	P, КПа
2	1513	136,3	3	1513	146,1	4	2700	185,3	3	2000	142,2	3	1719	129,4	1	1719	108,1
4	1513	146,9	4	1719	107,9	5	5580	223,6	4	2000	152,0	4	2000	138,3	4	1719	107,9
5	1513	146,9	5	1719	136,3				5	3200	193,2	5	2300	139,2	5	2000	121,6
			6	1800	129,4				6	3200	196,1				6	2000	133,4
															7	2000	138,3
															8	2700	152,0
															9	5027	188,5

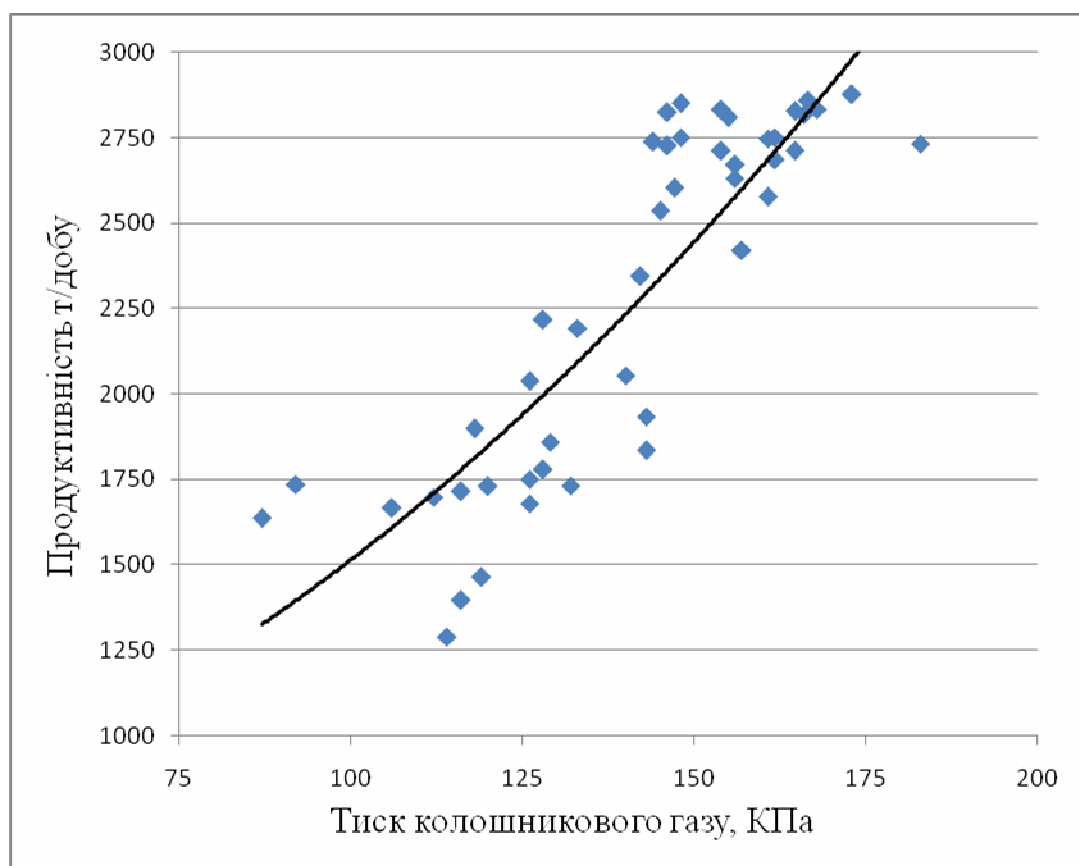
3.2.2 Вплив тиску на продуктивність доменної печі

Величина надлишкового тиску колошникового газу визначається технологічними міркуваннями, головним з яких є необхідність забезпечення найбільшої продуктивності печі. Виявлення залежності продуктивності печі від збільшення тиску колошникового газу – одна з важливіших задач. Опрацьовані дані [33-37], які становлять інтерес, приведені в табл. 3.4.

Таблиця 3.4 - Продуктивність доменних печей корисним об'ємом 1513м³ при різному тиску за 2001-2020 роки

«Запоріжсталь»				«Азовсталь»	
ДП 2		ДП 4		ДП5	
Тиск, КПа	Продуктивність, т/добу	Тиск, КПа	Продуктивність, т/добу	Тиск, КПа	Продуктивність, т/добу
174	2672	183	2732	155	2809
168	2833	160,8	2578	154	2832
173	2876	164,7	2713	154	2713
166	2818	161,08	2685	156	2670
160,8	2748	145,1	2535	146,1	2825
166,7	2859	147,1	2603	144,1	2739
164,7	2828	156,9	2421	148,1	2751
161,8	2752	143	1834,1	148,1	2851
155,9	2631	132	1731,1	146,1	2727
156,9	2421	118	1898,6	142,2	2344
140	2053,7	129	1859,4	128	2216,2
143	1934,8	119	1463,7	133	2193,5
126	2037,2	116	1397,2	128	1779
126	1750,7	114	1289,6	126	1680
120	1730,4	-	-	-	-
116	1715,2	-	-	-	-
112	1697,4	-	-	-	-
106	1667	-	-	-	-
92	1736	-	-	-	-
87	1636	-	-	--	-

За даними, приведеними в табл.3.4 побудовано графік, зображений на рис.3.4.



$$y = 0,043x^2 + 6,666x + 478,2; R^2 = 0,730$$

Рисунок 3.4 - Залежність продуктивності доменних печей від підвищення тиску колошнікового газу

Судячи з графіку, бачимо, що при підвищенні тиску продуктивність печі значно збільшується. З практичних даних відомо, що при підвищенні тиску колошнікового газу і одночасному збільшенні кількості дуття, що подають у доменну піч, продуктивність печі збільшується у значній мірі.

Інтерес становить виявлення залежності зміни продуктивності для печей різного корисного об'єму. Дані по 4 печам різного корисного об'єму від 1513 до 2700м³ комбінатів «АрселорМіттал-КривийРіг» та «Запоріжсталь» приведені в табл. 3.5.

За даними табл. 3.5 побудовано графік, приведений на рис 3.5, на якому зображена певна залежність зміни продуктивності для доменних печей різного корисного об'єму при підвищенні тиску колошнікового газу.

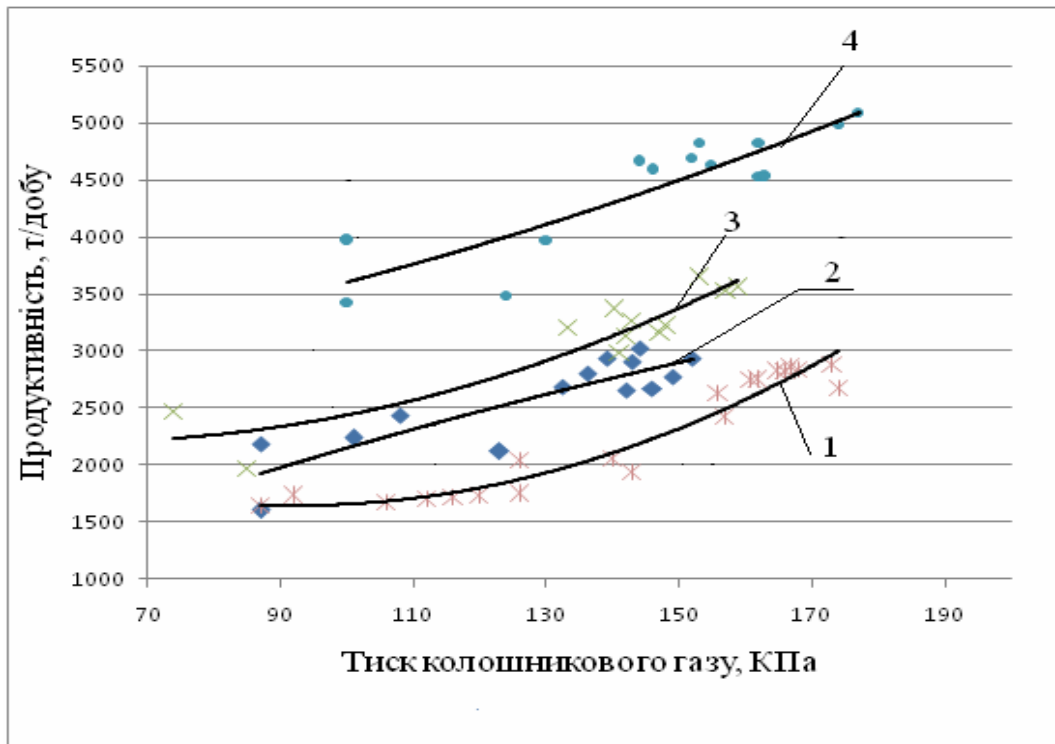
Таблиця 3.5 - Продуктивність доменних печей при різному тиску колошникового газу для доменних печей різного корисного об'єму

«Запоріжсталь»		«АрселорМіттал-КривийРіг»					
ДП 2, V _k =1513 м ³		ДП 1, V _k =1719 м ³		ДП 5, V _k =2000 м ³		ДП 8, V _k =2700 м ³	
Тиск, КПа	Продуктивність, т/добу	Тиск, КПа	Продуктивність, т/добу	Тиск, КПа	Продуктивність, т/добу	Тиск, КПа	Продуктивність, т/добу
174	2672	146	2669	148	3224	162	4529
168	2833	142	2654	141	2979	174	4984
173	2876	149	2775	143	3256	177	5088
166	2818	143	2909	142	3131	162	4820
160,8	2748	132,4	2686	147,1	3155	162,8	4533
166,7	2859	144,1	3025	158,9	3563	153	4817
164,7	2828	152	2941	153	3651	154,9	4629
161,8	2752	139,2	2934	157	3526	144,1	4667
155,9	2631	136,3	2807	140,2	3372	146,1	4593
156,9	2421	107,9	2437	133,4	3201	152	4690
140	2053,7	87	1603,7	85	1966,3	100	3975,1
143	1934,8	101	2238,4	74	2461,8	130	3963
126	2037,2	87	2187	-	-	100	3418
126	1750,7	123	2117,5	-	-	124	3485,4
120	1730,4	-	-	-	-	-	-
116	1715,2	-	-	-	-	-	-
112	1697,4	-	-	-	-	-	-
106	1667	-	-	-	-	-	-
92	1736	-	-	-	-	-	-
87	1636	-	-	-	-	-	-

Відомо, що зі збільшенням корисного об'єму печі намагаються тримати більший тиск колошникового газу. Дані криві мають чітку залежність збільшення продуктивності зі збільшенням тиску, причому збільшення продуктивності, що відноситься на 1 КПа тиску колошникового газу для печей з більшим корисним об'ємом має більшу величину, ніж для печей малого. Керуючись даними табл.3.5 отримали:

для печі корисним об'ємом 1513 для тиску 106 КПа продуктивність складає 1667 т/добу, а для тиску 173 КПа – 2876 т/добу. Середньодобова продуктивність на 1 КПа тиску складе:

$$\frac{2876 - 1667}{173 - 106} = 18,1 \text{ т / КПа}$$



$$1 - 1513 \text{ м}^3, y = 0,20x^2 - 37,74x + 3\,387,82; R^2 = 0,93$$

$$2 - 1719 \text{ м}^3, y = -0,04x^2 + 23,87x + 114,83; R^2 = 0,76$$

$$3 - 2000 \text{ м}^3, y = 0,15x^2 - 17,51x + 2\,730,45; R^2 = 0,85$$

$$4 - 2700 \text{ м}^3, y = 0,05x^2 + 5,16x + 2\,575,97; R^2 = 0,78$$

Рисунок 3.5 - Залежність продуктивності доменних печей різного корисного об'єму від підвищення тиску колошнікового газу

Таким чином розраховується середньодобова продуктивність для інших печей:

Для печі об'ємом 1719 м³:

$$\frac{2941 - 1604}{152 - 87} = 20,6 \text{ т / КПа}$$

Для печі об'ємом 2000 м³:

$$\frac{3563 - 1966}{159 - 85} = 21,5 \text{ т / КПа}$$

Для печі об'ємом 2700 м³:

$$\frac{5088 - 3418}{177 - 100} = 21,7 \text{ т / КПа}$$

Таким чином чим більше корисний об'єм печі, тим вище приріст продуктивності на 1 КПа підвищення тиску.

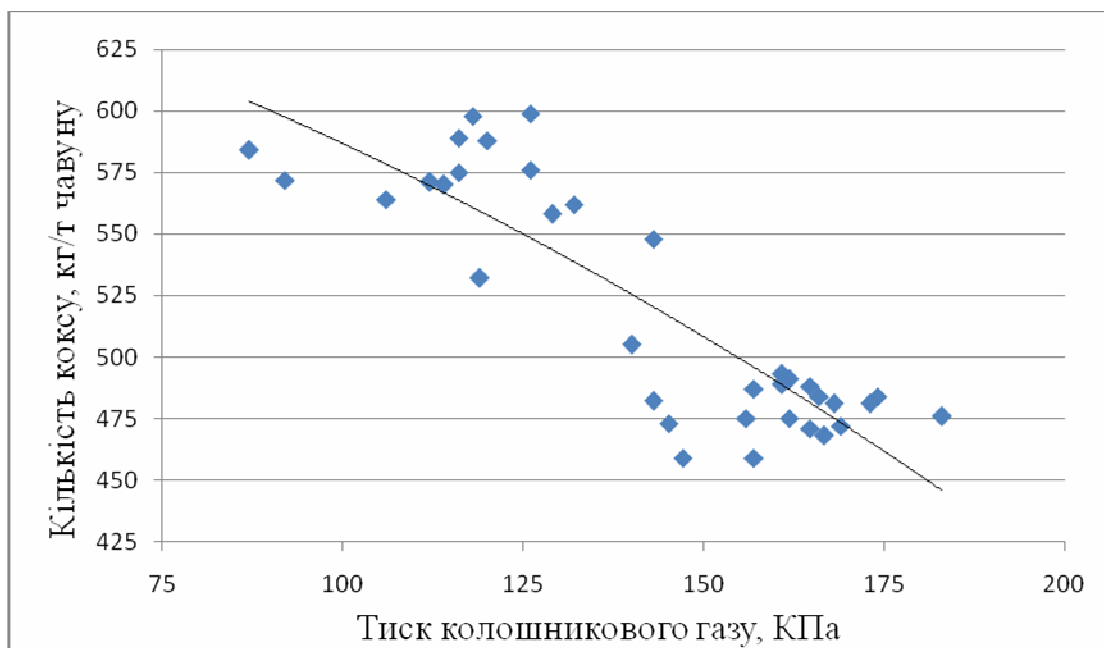
3.2.3 Вплив тиску на витрату коксу

Відомо, що залежність між коксом та продуктивністю зворотно пропорційна, тоді для збільшення продуктивності необхідно зменшити витрату коксу. Але зменшення коксу має бути граничним, бо, як відомо, кокс – є основним паливом в процесі виплавки чавуну, також кокс грає роль розрихлювача стовпу шихтових матеріалів і з коксом в доменну піч потрапляє вуглець, завдяки якому проходить відновлення заліза. Так, як існує певна залежність між продуктивністю и витратою коксу, то представляє інтерес визначення залежності збільшення тиску колошникового газу на витрати коксу. Данні, пов'язані з впливом підвищення тиску колошникового газу на витрату коксу наведені в табл. 3.6.

Таблиця 3.6 - Витрати коксу при різному тиску колошникового газу на печах №2 і № 4 комбінату «Запоріжсталь»

№ 2		№ 4	
Тиск, КПа	Витрати коксу, кг/т год	Тиск, КПа	Витрати коксу, кг/т год
174	484	169	472
168	481	183	476
173	481	160,8	489
166	484	164,7	471
160,8	493	161,8	475
166,7	468	145,1	473
164,7	488	147,1	459
161,8	491	156,9	459
155,9	475	143	482
156,9	487	132	562
140	505	118	598
143	548	129	558
126	576	119	532
126	599	116	589
120	588	114	570
116	575	-	-
112	571	-	-
106	564	-	-
92	572	-	-
87	584	-	-

За даними табл. 3.6 побудовано графік, що показує вплив підвищення тиску колошникового газу на витрату коксу, який приведений на рис 3.6.



$$y = -0,003x^2 - 0,595x + 685,1; R^2 = 0,744$$

Рисунок 3.6 - Вплив підвищення тиску колошникового газу на витрату коксу

При підвищенні тиску колошникового газу, збільшується час контакту газу з шихтою, краще обробляються газом рудні матеріали, тому збільшується ступінь непрямого відновлення і зменшується ступінь прямого., що призводить до економії коксу. Це доведено на прикладі двох печей, що мають однаковий корисний об'єм, комбінату «Запоріжсталь». За даними рис 3.6 видна залежність зменшення витрат коксу при підвищенні тиску колошникового газу, яка на прикладі складає в середньому 75-100 кг при зміні тиску на 50 КПа в інтервалі 125 – 175 КПа.

3.2.4 Вплив тиску на міру використання CO

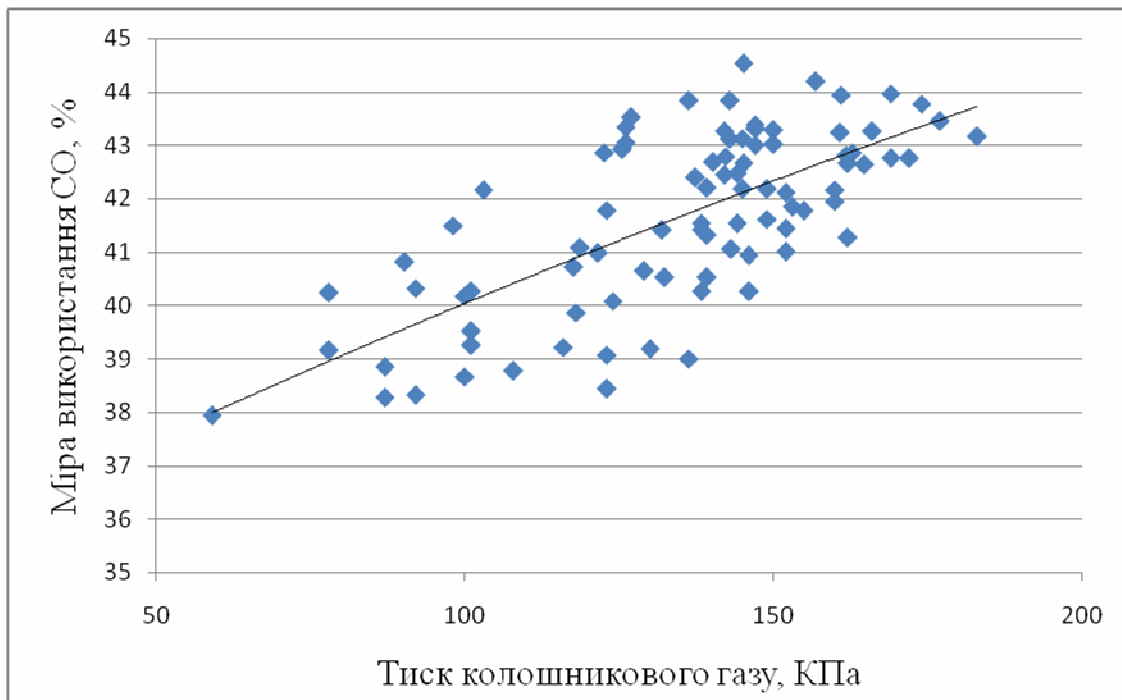
Штучне підвищення тиску у верхній частині доменної печі зменшує об'єм вагової одиниці газу, що відходить, і його швидкість, що сприяє збільшенню часу контакту пічного газу з шихтовими матеріалами і призводить до зростання міри використання газу. В табл. 3.7 наведені данні використання газу CO при різному тиску.

Таблиця 3.7 - Міра використання газу СО при різному тиску колошникового газу

«АрселорМіттал-КривийРіг»										«Запоріжсталь»			
ДП 1, $V_k = 1719 \text{ м}^3$		ДП 4, $V_k = 1719 \text{ м}^3$		ДП 6, $V_k = 2000 \text{ м}^3$		ДП 7, $V_k = 2000 \text{ м}^3$		ДП 8, $V_k = 2700 \text{ м}^3$		ДП 4, $V_k = 1513 \text{ м}^3$		ДП 5, $V_k = 1513 \text{ м}^3$	
Тиск газу, КПа	$\eta_{\text{CO}}, \%$	Тиск газу, КПа	$\eta_{\text{CO}}, \%$	Тиск газу, КПа	$\eta_{\text{CO}}, \%$	Тиск газу, КПа	$\eta_{\text{CO}}, \%$	Тиск газу, КПа	$\eta_{\text{CO}}, \%$	Тиск газу, КПа	$\eta_{\text{CO}}, \%$	Тиск газу, КПа	$\eta_{\text{CO}}, \%$
87	38,28	59	37,94	92	40,32	101	40,27	100	40,18	169	43,97	122,6	42,86
87	38,85	78	42,24	92	38,32	116	39,22	100	38,67	161	43,94	136,3	43,83
101	39,52	78	40,16	101	39,26	138,3	41,43	124	40,08	169	42,76	126	43,33
107,9	38,78	90,2	41,82	117,7	40,72	138,3	40,27	130	39,18	183	43,16	127	43,52
123	39,08	98,1	41,5	121,6	40,98	139,2	42,21	144,1	41,53	160,8	43,23	123	41,79
132,4	40,52	103	42,16	123	38,44	139,2	40,52	146,1	40,27	164,7	42,63	126	43,05
136,3	39	118,7	41,08	138,3	41,55	145,1	42,66	152	40	161,8	42,82	-	-
139,2	41,32	125,5	42,92	140,2	42,69	152	42,11	153	41,84	145,1	44,53	-	-
142	42,45	137,3	42,39	142,2	42,79	160	42,17	154,9	41,78	147,1	43,31	-	-
143	43,12	142	43,26	143,2	41,06	160	41,95	162	41,27	156,9	44,2	-	-
144,1	42,47	145	43,13	145	42,18	166	43,26	162	42,66	143	43,83	-	-
146	40,93	147	43,39	147	42,99	172	42,76	162,8	42,86	132	41,42	-	-
149	41,62	150	43,29	149	42,18	-	-	174	43,78	118	39,87	-	-
152	41,44	-	-	150	43,02	-	-	177	43,45	129	40,64	-	-
-	-	-	-	92	40,32	-	-	100	40,18			-	-

η_{CO} – ступінь використання СО.

За даними табл. 3.7 побудовано графік залежності міри використання CO від підвищення тиску колошникового газу, що зображений на рис 3.7



$$y = -0,00x^2 + 0,06x + 34,77; R^2 = 0,57$$

Рисунок 3.7 - Вплив підвищення тиску колошникового газу на міру використання CO

Судячи з графіку, можна зробити висновок, що зі збільшенням тиску колошникового газу в інтервалі 100-150 КПа міра використання газу CO збільшилась в середньому на 3 %.

3.2.5 Вплив тиску на кількість винесеного пилу

Звісно, що зі збільшенням тиску колошникового газу зменшується кількість винесеного пилу. Тому важливим є виявлення залежності підвищення тиску колошникового газу на кількість винесеного пилу. За останні роки поліпшення якості шихтових матеріалів, а також впровадження передової технології сприяли значному зменшенню винесення колошникового пилу з доменних печей. Зазвичай про винесення судять по кількості пилу, уловленого в пиловловлювачах.

Зменшення винесення пилу, пов'язане з роботою печей на підвищеному тиску, пояснюється зменшенням швидкості газу над поверхнею шихти і зниженням підйимальної сили газу.

Внаслідок цього, величина часток пилу, що захоплюються газом, зменшується. Відповідно, чим вище тиск колошникового газу, тим більша кількість крупних фракцій залишається в печі і виноситься пил лише дрібної фракції [1].

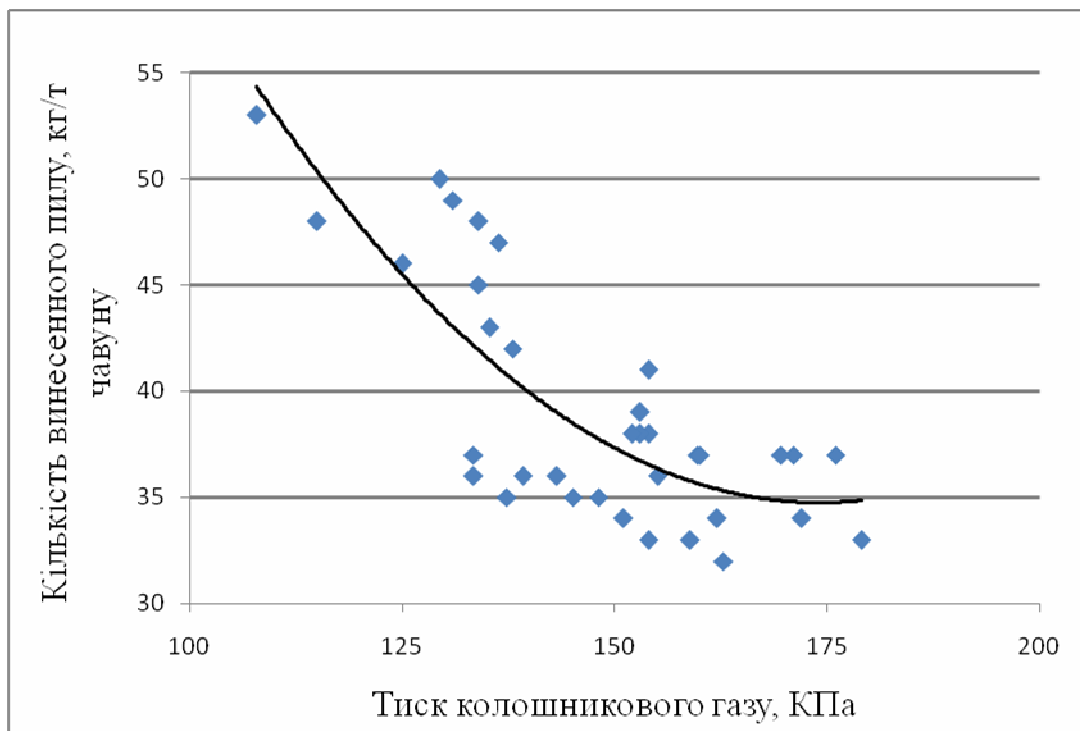
Дослідними даними [32] доведено, що в найкрупнішій фракції колошникового пилу є найбільша кількість вільного вуглецю. Компоненти, що входять до колошникового пилу розподіляються по фракціях нерівномірно. Максимальна кількість заліза знаходиться в найбільш дрібних фракціях ($<0,07$ мм). Вміст заліза в цих фракціях для різних печей вагається від 50 до 54 %, причому він вище за вміст заліза в найбільш крупних фракціях ($>0,66$ мм) майже в 1,5—2 рази. Вільний вуглець, навпаки, переважно знаходиться в найбільш крупних фракціях, і його вміст по окремих печах коливається від 18 до 38%, тоді як в найбільш дрібних фракціях це значення не перевищує 5%. Вміст кремнезему — найбільш абразивного елементу колошникового пилу — в окремих фракціях не значно коливається (від 8,0 до 10,5 %). Проте абсолютна його кількість в колошниковому пилу різних печей неоднакова [20].

Вище написане свідчить про те, що є необхідність у визначенні впливу підвищення тиску колошникового газу на кількість колошникового пилу. У дослідженні враховувалися печі об'ємом 1719 і 1800 м³ комбінату «Азовсталь» [33 - 37], данні зведені в табл.3.8.

За даними табл. 3.8 побудовано графік залежності підвищення тиску колошникового газу на кількість колошникового пилу, який зображений на рис. 3.8 для печей різного об'єму.

Таблиця 3.8 - Кількість винесеного пилу при різному тиску колошникового газу на печах комбінату «Азовсталь»

ДП 3, $V_k=1719 \text{ м}^3$		ДП 6, $V_k=1719 \text{ м}^3$		ДП 4, $V_k=1800 \text{ м}^3$	
Тиск, КПа	Винесення пилу, кг/т чавуну	Тиск, КПа	Винесення пилу, кг/т чавуну	Тиск, КПа	Винесення пилу, кг/т чавуну
155	36	179	33	154	33
154	41	176	37	153	38
154	38	172	34	162	34
138	42	171	37	160	37
135,3	43	153	39	152	38
133,4	36	145,1	35	151	34
133,4	37	159,8	37	169,6	37
137,3	32	158,9	32	162,8	32
143,2	36	148,1	35	139,2	36
107,9	53	136,3	53	129,4	52
-	-	125	46	134	45
-	-	115	48	131	49
-	-	-	-	134	48



$$y = 0,005x^2 - 1,56x + 170,68; R^2 = 0,63$$

Рисунок 3.8 - Вплив підвищення тиску колошникового газу на винесення пилу з доменної печі

Спостерігається залежність зниження винесення колошникового пилу при збільшенні тиску колошникового газу. В деяких випадках винесення пилу зменшується майже в два рази. Ця залежність спостерігається і в теоретичних, і в практичних роботах [1-5, 7, 8, 10-12, 14, 15, 19-22, 37]. Ще одним позитивним фактом підвищення тиску є те, що при зменшенні виносу колошникового пилу, система очищення колошникового газу значно спрощується. Газ очищується в сухому пиловловлювачі, скрубєрі високого тиску, а також при дроселюванні газу.

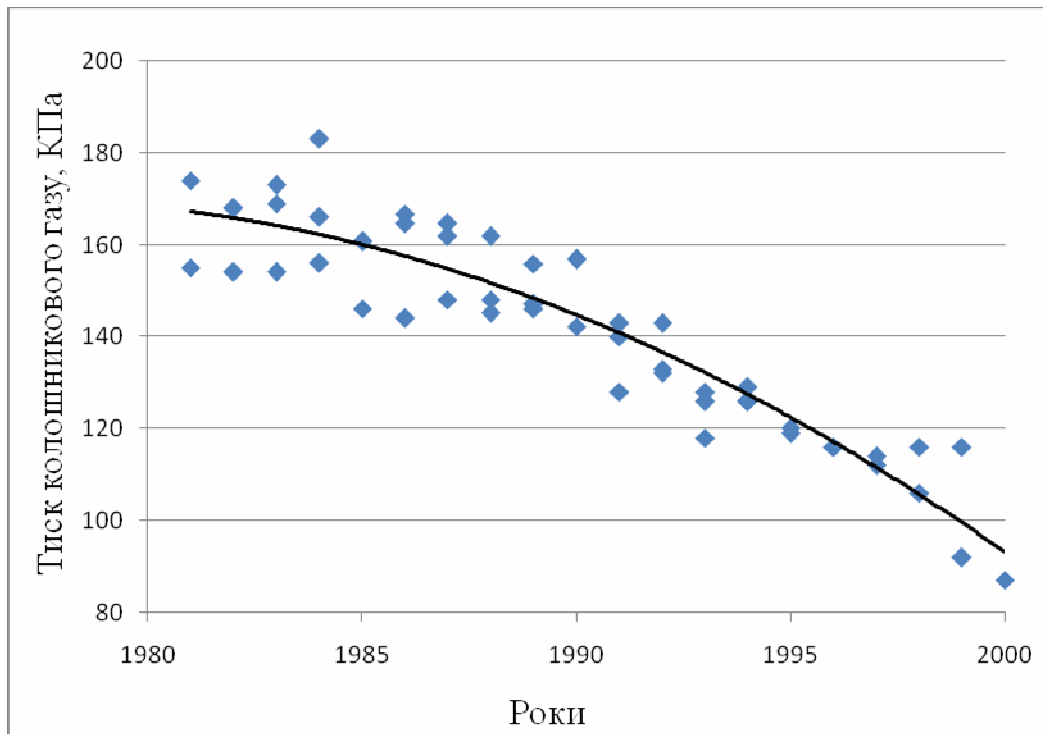
3.2.6 Вплив тривалої роботи доменної печі на тиск колошникового газу

Відомо, що пил доменного процесу має абразивні властивості, тому коли доменна піч працює при підвищеному тиску колошникового газу найчастіше з усього устаткування печі з ладу йдуть засипні пристрої. Це підтверджують практичні данні, наведені в табл. 3.9.

Таблиця 3.9 - Зміна тиску газу на колошнику впродовж експлуатації доменних печей

Роки	Азовсталь № 5	Запоріжсталь № 2	Запоріжсталь №4
	Тиск, КПа	Тиск, КПа	Тиск, КПа
2001	155	174	179
2002	154	168	175
2003	154	173	169
2004	156	166	183
2005	146,1	160,8	160,8
2006	144,1	166,7	164,7
2007	148,1	164,7	161,8
2008	148,1	161,8	145,1
2009	146,1	155,9	147,1
2010	142,2	156,9	156,9
2011	128	140	143
2012	133	143	132
2013	128	126	118
2014	126	126	129
2015	-	120	119
2016	-	116	116
2017	-	112	114
2018	-	106	116
2019	-	92	116
2020	-	87	133

За даними таблиці 3.9 побудовано графік залежності зміни тиску на колошнику впродовж експлуатації доменних печей, який наведено на рис 3.9.



$$y = -0,14x^2 + 555,34x - 548,79; R^2 = 0,87$$

Рисунок 3.9 - Зміна тиску газу на колошнику в процесі роботи доменних печей

Отже чим більше років працює доменна піч, тим в більшій мірі зношуються контактні поверхні великого конусу і доменщики вимушені управляти роботою доменної печі з пониженим тиском колошничкового газу.

По результатам проведених досліджень можна зробити такі висновки:

1. При підвищенні тиску колошничкового газу загальний перепад тиску в печі зменшується, це дає можливість збільшити кількість дуття.
2. При підвищенні тиску швидкість фільтрації газу через стовп шихтових матеріалів зменшується, збільшується час перебування газу у контакті із залізородними матеріалами, внаслідок чого підвищується використання теплової і хімічної енергії газу, знижується міра прямого відновлення і витрата коксу.
3. Зменшення швидкості руху газів печі сприяє меншому винесенню пилу.

4. Зменшення винесення пилу, у тому числі і коксу, а також втрат тепла на одиницю чавуну при зростанні продуктивності також сприяє скороченню витрат коксу.

5. Підвищення тиску на кожні 10 КПа дає підвищення продуктивності на 1,0-2,0 %, краще використання відновлювальних газів, скорочення витрат коксу на 0,1-0,5 %

3.3 Використання газової утилізаційної турбіни, як основного джерела отримання дешевої електроенергії на печах, що працюють на підвищеному тиску колошникового газу

У зв'язку зі збільшенням вартості природного газу і електроенергії для металургійних підприємств України найважливішим завданням є впровадження енергозберігаючих технологій, у тому числі використання надлишкового тиску доменного газу для вироблення електроенергії. В даний час в Україні експлуатуються більше 30 доменних печей об'ємом більше 1386 м³, які можуть бути обладнані газовою утилізаційною безкомпресорною турбіною (ГУБТ). Впровадження якої являє собою один з напрямів видобутку дешевої електроенергії.

Газорозширювальна турбіна ГУБТ, здійснюючи необхідний підпір тиску газу на колошнику доменної печі (ДП) за рахунок опору руху газу через лопатки турбіни, утилізує його тиск; генератор, зв'язаний валом з турбіною, виробляє електроенергію. Для забезпечення стійкої роботи ГУБТ витрата газу має бути стабільною. Для виконання цієї вимоги в тракті газоочистки встановлюють дросельну групу. Перший зразок ГУБТ потужністю 8000 кВт·ч (ГУБТ-8) був встановлений на Череповецькому металургійному комбінаті на доменній печі № 3 у 1968 р. і успішно експлуатується в даний час, ставши полігоном для відробітку багатьох технологічних і технічних вдосконалень, що знайшли вживання як у вітчизняній, так і в зарубіжній практиці [39, 40].

ГУБТ легко вбудовується в технологічний цикл доменного виробництва. Схема включення ГУБТ приведена на рис. 3.10.

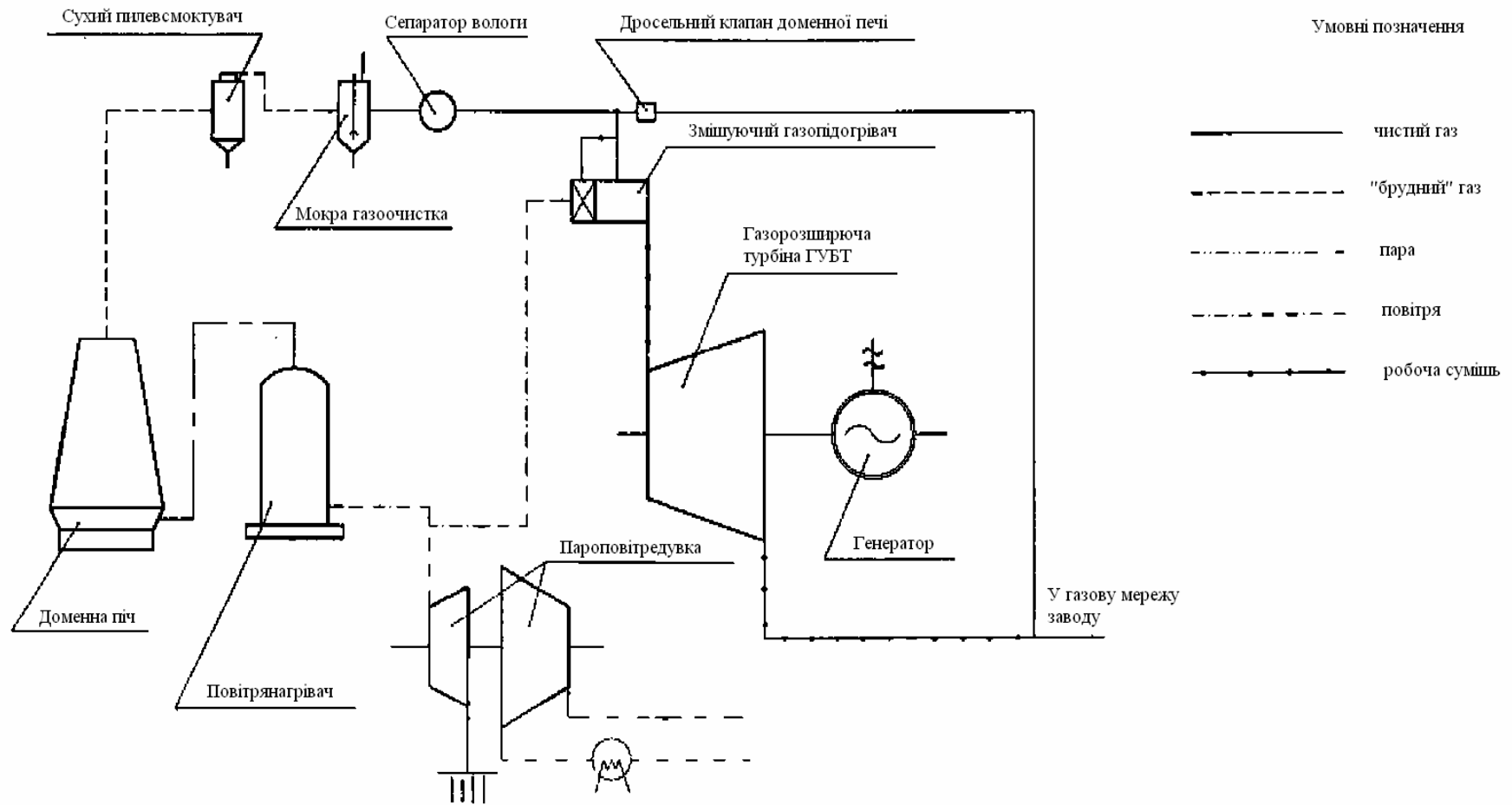


Рисунок 3.10 - Принципова схема підключення ГУБТ

Турбіна встановлюється паралельно дросельній групі доменної печі. Наявність щільних відсічних засувок на трубопроводі доменного газу забезпечує автономність турбіни і можливість проведення регламентних робіт на турбіні без втручання в технологічний цикл доменного виробництва.

Перелік середовищ, що підводяться і відводяться, для забезпечення роботи ГУБТ на газотурбінній розширювальній станції (ГТРС): доменний газ; повітря від повітродувки; висококалорійний газ; вода циркуляційна; вода технічна; повітря технічне; азот; електроенергія.

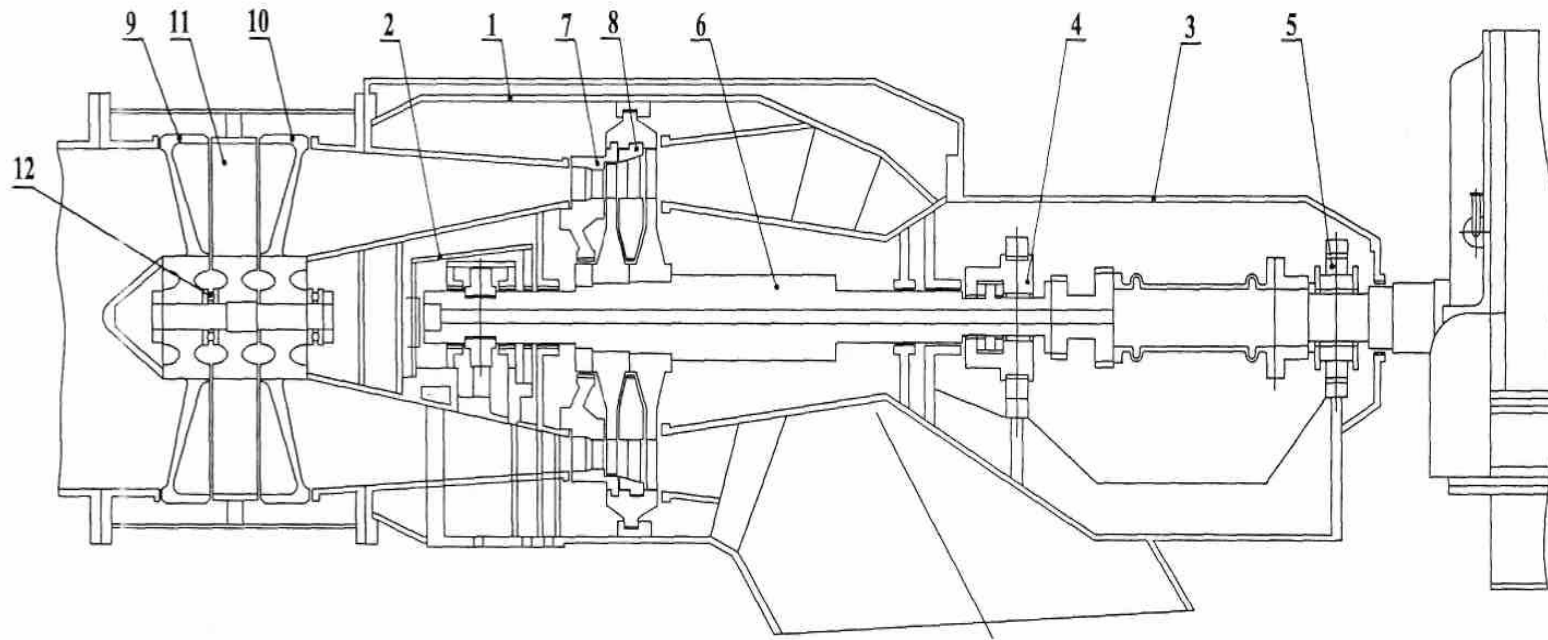
Повітря від повітродувки доменної печі подається в газопідігрівач для забезпечення горіння. Висококалорійний газ необхідний для займання і підтримки стійкого горіння. Циркуляційна вода подається на повітроохолоджувачі і маслоохолоджувачі. Технічна вода використовується для промивки проточної частини турбіни і для охолодження доменного газу у вихлопному газопроводі при роботі турбіни в моторному режимі. Гаряча вода необхідна для підігріву масла в маслобаці перед запуском турбіни в холодну пору року. Повітря технічне подається на ежектор відсмоктування газоповітряної суміші як резерв для подачі на ущільнення турбіни, на обдування окремих елементів устаткування, а також на заміщення азоту в газопроводах при необхідності розтину турбіни.

Азот - із ступенем очищення не нижче 95% - подається на лабіринтові ущільнення турбіни і для продування газопроводів до і після регламентного обслуговування турбіни, пов'язаного з її розтином. Встановлена на трубопроводах замочна і регулююча арматура використовується в системі автоматичного управління ГУБТ.

Потужність турбіни, що фактично розвивається, залежить від режиму роботи доменної печі і визначається витратою і параметрами доменного газу [41].

Турбіна є одноциліндровим прямоточним двоступеневим агрегатом (Рис. 3.11).

Прямоточність досягається тим, що вхід газу в турбіну виконаний осьовим, а вихлоп нахилений під гострим кутом до горизонтальної осі турбіни. Це забезпечує високі аеродинамічні показники турбіни.



1 - корпус; 2 - корпус переднього підшипника; 3 - корпус заднього підшипника ; 4 - опорно-упорний вкладиш; 5 - опорний вкладиш; 6 - ротор; 7 - діафрагма 1 ступеня; 8 - діафрагма 2 ступеня; 9 - діафрагма регулююча; 10 - діафрагма стопорна, рухома; 11 - діафрагма нерухома; 12- опорний підшипник качання

Рисунок 3.11 - Проміжний розріз турбіни ГУБТ

Корпус турбіни 1 виконаний зварним з обрешеченням, що підвищує його стійкість.

Корпуси переднього 2 і заднього 3 підшипників виконані у згоді з корпусом турбіни. Корпус переднього підшипника спирається на корпус турбіни трьома стійками. У корпусі заднього підшипника розташовані опорно-упорний вкладиш 4 турбіни, опорний вкладиш 5 генератора, вузли системи регулювання. Ротор турбіни 6 має два диски. Вал і диски виготовлені з легованої сталі, робочі лопатки - з неіржавіючої. Крізний отвір в роторі служить для підведення замикаючого повітря до задніх ущільнень турбіни.

Діафрагма 7 першого ступеню - зварно-лита з поворотними направляючими лопатками. Діапазон повороту лопаток - від 38,5 до 52,5°. Кут установки лопаток вибирається залежно від витрати і параметрів газу доменної печі.

Діафрагма 8 другого ступеню - чавунно-лита із залитими направляючими лопатками. Матеріал направляючих лопаток — неіржавіюча сталь.

Зважаючи на високу токсичність доменного газу прийняті особливі заходи, які попереджують його попадання в машинний зал:

- число розбірних з'єднань зведене до мінімуму. Всі з'єднання, які не вимагають розбирання під час ремонтів, зварні, наприклад, з'єднання вихлопу турбіни з газопроводом низького тиску;
- фланці горизонтального і вертикального роз'ємів турбіни закриті кожухом, під яким під час роботи підтримується невелике розрідження;
- майже всі фланцеві з'єднання мають спеціальні камери, з яких також проводиться відсмоктування.

Завдяки розвиненій системі кінцевих ущільнень виключена можливість попадання газу в машинний зал при всіх режимах роботи установки [41-44].

Труднощі забезпечення ефективної роботи ГУБТ викликані рядом чинників, основними з яких є наступні: використання в якості складових шихти окаток, які вносять велику кількість пилу дрібної фракції, недосконалість конструкції морально застарілих і таких, що не відповідають сучасним вимогам доменної плавки конусних завантажувальних пристроїв, режими роботи доменних печей із

зниженим тиском газу на колошнику (менше 150 КПа), незадовільне очищення газу перед ГУБТ. Режим роботи доменних печей на підвищеному тиску газу вимагає збільшення тиску дуття, тобто потужніших повітродувних машин.

Важливим чинником, що впливає на ефективність роботи ГУБТ, є вживання безконусного завантажувального пристрою (БЗП), здатного стабільно підтримувати високий тиск газу на колошнику ДП. На доменних печах з БЗП за деяких умов можна стабільно тримати тиск до 200КПа, за винятком коротких зупинок, наприклад, для заміни ущільнення клапанів БЗП [45]. Найважливішими недоліками конусних завантажувальних пристроїв (КЗП) є, по-перше, низька стійкість вузла газощільнювача - конуса і чаші, заміна якого пов'язана з повним розбиранням всього завантажувального пристрою, що веде до простоїв печі, значних трудових і матеріальних витрат, по-друге, обмежені можливості управління радіальним і окружним розподілом шихтових матеріалів по перетину печі. У КЗП при великій поверхні контакту між конусом і чашею і їх деформації під впливом високих температур неможливо тривалий час утримувати постійним підвищений тиск газу на колошнику. Термін експлуатації конусів КЗП близько 1 року і протягом більшої частини цього терміну тиск практично може триматися на рівні лише трохи вище атмосферного. Унаслідок конструктивних особливостей в разі вживання КЗП в інтервалі між капремонтами третього розряду надлишковий тиск доменного газу монотонно падає від 150 до 100-50 КПа, що зменшує ефективність вживання ГУБТ. Клапанне газощільнення БЗП дозволяє забезпечити тиск газу практично постійним протягом всього терміну його експлуатації. Тому вживання ГУБТ на печах з БЗП значно ефективніше і в першу чергу установки газоутилізації слід застосовувати саме на цих печах [40].

На металургійних підприємствах України сьогодні експлуатуються БЗП конструкції фірми «Пауль Вюрт» на ДП-9 «АрселорМіттал-КривийРіг» (об'єм печі 5000 м³), БЗП з розподільником «воронка-скліз» на ДП-5 «Запоріжсталі» і два лоткових БЗП конструкції «Азовмаш-Діпромет» на доменних печах № 3 і 4 «Азовсталі». На українських доменних печах застосовується кокс і залізородні матеріали невисокої якості, з низькою гарячою міцністю. [46]

Величина тиску доменного газу є показником, що визначає доцільність вживання газових безкомпресорних утилізаційних турбін; чим вище тиск газу перед ГУБТ, тим більше електроенергії буде вироблено генератором. Тиск газу перед ГУБТ залежить від режиму роботи доменної печі і опору тракту газоочистки. Економічно доцільно застосовувати для очищення доменного газу апарати, що чинять мінімальний опір, що зберігає потенційну енергію газу для корисного використання в ГУБТ.

Досвід експлуатації ГУБТ показує, що зменшення ефективності їх роботи пов'язане не лише з невисоким тиском газу на колошнику доменних печей, але і надмірно великим пропусканням доменного газу через дросельні групи повз ГУБТ (через низьку герметичність дроселів в закритому стані до 40 %), а також недосконалістю систем газоочистки і автоматизації, все це зменшує ефективність турбіни. Доменний газ містить 10-30 г/м³ пилу, дисперсний і хімічний склад якого визначається складом і якістю завантажувальних в піч матеріалів, тиском газу, вмістом в дутті кисню, кількістю заміників коксу, що вдувають в піч. Для забезпечення надійної експлуатації основних споживачів доменного газу (повітронагрівачів доменних печей, ГУБТ, коксових печей) нормативне його очищення від пилу до 4 мг/м³ і охолодження до температури не більш 40° С здійснюється, як правило, послідовно в пиловловлювачі, в скрубєрі, трубах Вентурі і дросельній групі. Дослідження показали, що остаточне нормативне очищення газу від пилу дрібної фракції до 4 мг/м³ досягається в регульованих трубах Вентурі при перепаді тиску газу 0,02 МПа і у зв'язку з цим відпадає необхідність використання дросельної групи для доочистки газу і зрошування водою для змивання пилу [48].

На ДП-9, обладнаною безконусним завантажувальним пристроєм конструкції фірми «Пауль Вюрт», газоочисна система доменного газу, розроблена «ЮВЕнергочормет», призначена для очищення і охолодження газу в кількості 750 тис. м³/год. З колошника доменної печі газ по похилому газопроводу поступає в два сухі пиловловлювачі, в яких він заздалегідь очищається від пилу фракції 80-100 мкм. У пиловловлювачах осідає до 50 % колошниковому пилу, що виноситься

з печі. Далі брудний газ поступає в скруббер високого тиску для напівтонкого очищення від пилу (в основному > 25 мкм) до $0,5 - 1,0$ г/м³, де зрошується водою, охолоджується до $50-60$ °С і насичується парами вологи. Потім напівчистий газ поступає в три труби Вентурі для часткового очищення газу від пилу дрібної фракції до $50-150$ мг/м³ і охолодження на $4-5$ °С. Далі доменний газ поступає в дросельну групу, яка призначена для регулювання заданого тиску газу на колошнику і забезпечена форсунками для остаточного тонкого очищення газу від пилу до 4 мг/м³ (за відсутності ГУБТ), змивання пилових відкладень, а потім в два краплевловлювача. На ДП-9 після труб Вентурі перед дросельною групою розташований газопровід, призначений для подачі напівчистого газу на вхід газової утилізації турбіни ГУБТ. Після краплевловлювачей чистий газ поступає на повітрянагрівачі ДП-9 і в заводський колектор доменного газу.

Сучасні системи очищення доменного газу, що забезпечують на виході вміст пилу в газі до 4 мг/м³, дозволяють встановлювати газові безкомпресорні турбіни утилізації і виробляти за рахунок використання енергії тиску газу значну кількість електроенергії. Вживання вказаних заходів є вельми перспективним і реальним для комбінату «Криворіжсталь» оскільки в УкрГНТЦ «Енергосталь» розроблена конструкція скрубберів, що забезпечують необхідне очищення доменного газу від пилу, а на українських і російських машинобудівельних заводах виробляються безкомпресорні турбіни (АТЗТ «Невський завод» і ВАТ «Уральський турбінний завод» - Росія, ГП НПКГ «Заря»-«Машпроект» -Україна). ДП-9 «АрселорМіттал-КривийРіг» є одним з об'єктів для установки ГУБТ [49-51]

Параметри доменного газу такі: витрата газу 800 тис. м³/год.; тиск газу на колошнику $130-150$ КПа; температура газу перед газоочисткою 270 °С; тиск чистого доменного газу $11-12$ КПа; температура чистого газу $40-45$ °С. Очищення і охолодження доменного газу виробляється в сухому пиловловлювачі радіального типу, скруббері високого тиску, трьох трубах Вентурі з краплевловлювачами. Технологічна схема по вживанню ГУБТ на ДП-9 передбачає її установку паралельно існуючій дросельній групі, при цьому газова турбіна утилізації оснащується замочною, регулюючою арматурою і системою

автоматичного регулювання (комплексне постачання заводу виробника). Крім того, для зменшення пропуску газу дросельною групою перед нею можуть бути встановлені швидкодіючі щільнокриючі клапани, які при роботі турбіни знаходяться в закритому стані.

Економічна доцільність вживання газових безкомпресорних утилізаційних турбін визначається на підставі кількості електроенергії, виробленою ГУБТ, і витратами на її будівництво і обслуговування. Для розрахунку прийнято: тиск доменного газу на колошнику – 180 КПа; витрата газу - 800 тис.м³/год; температура газу перед ГУБТ - 60°C; тиск доменного газу перед ГУБТ - 160 КПа, за ГУБТ - 12 КПа, а капітальні витрати такі: вартість турбіни з генератором (комплект постачання АТЗТ «Невський завод») і реконструкції будівлі і газоочистки - 9,5 млн. дол. США. За результатами попереднього економічного розрахунку кількість електроенергії, що виробляється генератором, 18 МВт·год, собівартість виробленої електроенергії ГУБТ на ДП-9 складе близько 60 грн. за 1 МВт·год, що набагато нижче за ціну електроенергії, що відпускається енергетичними компаніями

Термін окупності газової установки утилізації складе 2 роки.

Турбіна ГУБТ повністю автоматизована. Управління турбіною здійснюється з центрального щита доменної печі персоналом, обслуговуючим доменну піч.

Нормальна експлуатація турбіни забезпечується періодичними оглядами, контрольними перевірками автоматичних і захисних пристроїв.

Регламентні роботи по турбіні необхідно, по можливості, суміщати з ремонтами доменної печі.

Міжревізійний період роботи турбіни близько 12 місяців.

Періодичність регламентних робіт, термін служби деталей турбіни в значній мірі залежать від вмісту в доменному газі пилу, краплинної вологи, агресивних домішок [41, 42, 52].

Отже вживання газових безкомпресорних утилізаційних турбін ~ один з ефективних заходів, що дозволяють зменшити енергоємність виробництва чавуну

і собівартість металопродукції в цілому. Завдяки впровадженню ГУБТ можна виробити без вживання палива до 20-50 кВт·год електроенергії на 1 т чавуну. При модернізації комплексу споруд для підготовки до використання доменного газу, в який входять апарати газоочистки сухого і мокрого типу, ГУБТ, дросельна група, система оборотного водопостачання, засоби захисту довкілля від пилогазових викидів із завантажувального пристрою, окрім додаткового вироблення електроенергії при установці ГУБТ, досягається зменшення витрати води на газоочистку до 40 % [52].

ВИСНОВКИ

1. При переході на підвищений тиск колошникового газу виявлено зниження загального перепаду тиску по об'єму печі, що веде до кращого ходу процесу виплавки чавуну.
2. При збільшенні тиску колошникового газу зменшується його швидкість, збільшується час перебування газу у контакті з залізорудними матеріалами, що призводить до кращого використання хімічної і теплової енергії газу.
3. У зв'язку зі зменшенням швидкістю газу, який перебуває в печі, міра використання його збільшується, відповідно збільшується ступінь непрямого відновлення і зменшується ступінь прямого. Збільшення ступені непрямого відновлення сприяє економії коксу.
4. При меншій швидкості газу зменшується кількість винесеного пилу, що добре впливає на процес плавки і полегшує роботу газоочисних споруд.
5. Впровадження в технологічну схему ГУБТ, що працює на надлишковому тиску, дозволить отримувати дешеву електроенергію.
6. Пропонується впровадження ГУБТ на доменній печі №5 комбінату «Запоріжсталь».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. Москва : Metallurgy, 1980. 304 с.
2. Щедрин В. М. Теория доменной плавки под давлением. Москва : Metallurgizdat, 1962. 454 с.
3. Лемберикман И. С. Оборудование доменных печей для работы на повышенном давлении. Днепропетровск, 1958. 70 с.
4. Балон И. Д. Опыт работы доменных печей на повышенном давлении газов // Бюллетень научно-технической информации Украинского научно-исследовательского института металлов, 1957. С. 54-62.
5. Ефименко Г. Г., Гиммельфарб А. А., Левченко В. Е. Metallurgy чугуна. Киев: Вища школа. Головное изд., 1988. 352 с.
6. Зюзин В. И. Механическое оборудование металлургических цехов. Пособие для конструкторов и механиков. Москва : Государственное научно-техническое издательство литературы черных и цветных металлов, 1980. 296 с.
7. Тетеревятников Е. Г., Андронов В. Н. Работа доменной печи на давлении под колошником до 1,3 ати // Сталь. 1957. №3. С 200-204.
8. Сергеев П. Ф., Васильченко Н. И. Работа доменной печи на давлении газа под колошником 0,8 ати // Сталь. 1956. №11. С. 963-971.
9. Крячко Г. Ю. О проблемах в использовании некоторых средств интенсификации доменного процесса // Metallургическая и горнорудная промышленность. 2003. №4. С. 6-9.
10. Товаровский И. Г., Каменев Р. Д., Рабинович Г. Б. Доменная плавка в мощных печах. Москва : Metallurgy, 1968. 116 с.
11. Metallurgy и коксохимия / под ред. Г. П. Афонина. Киев : Техника, 1966. 180 с.
12. Готлиб А. Д. Доменный процесс. Москва : Metallurgy, 1966. 504 с.
13. Стефанович М. А. Анализ хода доменного процесса. Москва : Metallurgy, 1960. 286 с.

14. Некрасов З. И., Бузоверя М. Т., Геращенко В. Е., Покрышкин В. Л. Анализ восстановительных процессов в шахте доменной печи объемом 2700м³ // Доменное производство. Москва : Металлургия, 1975. С. 85-100.
15. Смоляк В.А., Логинов В.И Автоматическое регулирование хода доменной печи по перепадам статического давления газов // Бюллетень ЦНИНЧМ, 1960. С. 4-7.
16. Смоляк В. А. Алгоритмы модернизированного управления доменным процессом // Математическое моделирование, № 1 (20), 2009. С. 52-56.
17. Жеребин Б. Н., Казарновский Г. Е., Крепышев Н. В., Минкин В. М. Работа доменной печи Кузнецкого комбината при повышенном давлении // Сталь. 1955. №12. С. 1063-1073.
18. Товаровский И. Г. Доменная плавка. Днепропетровск: Пороги, 2003. 596 с.
19. Воскобойников В. Г., Кудрин В. А., Якушев А. М. Общая металлургия: [учебник для вузов]. Москва : Металлургия, 1985. 480 с.
20. Корж А. Т., Колесник И. Л., Лебедь П. К. Исследование влияния различных факторов на вынос колошниковой пыли из доменных печей // Интенсификация процессов доменной плавки и освоение печей большого объема Москва : Металлургия, 1977. С. 60-65.
21. Сперкоч И. Е., Курунов И. Ф. Резервы интенсификации доменного процесса // Металлург. 2005. №2. С. 33-37.
22. Покрышкин В. Л. Влияние повышенного давления газа на химический состав чугуна // Сталь. 1956. № 6. С. 487-492.
23. Андронов В. Н. Влияние повышения давления газа на химический состав чугуна // Сталь. 1960. № 10. С. 869-877.
24. Сабин-Гуз Л. А., Каган И. С., Чорнихов В. С. Экономическая эффективность повышения давления под колошником доменных печей // Сталь. 1966. № 3. С. 210-212.
25. Товаровский И. Г. Познание процессов и развитие технологии доменной плавки: монография. Днепр: Журфонд, 2015. 912 с.

26. Lavrov V. V., Spirin N. A., Burykin A. A. et al. Automatic control software for the blast-furnace shop // *Steel Transl.* 2015. Vol. 45. № 9. P. 669–673.
27. Kokot G., Burczyński T., John A. Advanced numerical simulations of selected metallurgical units // *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering.* 2012. Vol. 55. № 2. P. 523–528.
28. Рамм А. Н. Современный доменный процесс. М.: Металлургия, 1980. 304 с.
29. Бугаев К. М. Экспериментально-аналитическое исследование тепло- и массообмена в доменной печи // *Познание процессов доменной плавки: коллективный труд / Под ред. В. И. Большакова и И. Г. Товаровского. Днепр: Пороги, 2006. С. 190–206.*
30. Дмитриев А. Н. Развитие и применение теории газодинамики, тепло- и массообмена для решения практических задач доменного производства на основе комплекса математических моделей // *Познание процессов доменной плавки: коллективный труд / Под ред. В. И. Большакова и И. Г. Товаровского. Днепр: Пороги, 2006. С. 207–226.*
31. Семакова В. Б., Семаков В. В. Аналитическое исследование возможности снижения расхода кокса при улучшении восстановительной работы газового потока в доменной печи // *Вісник Приазовського державного технічного університету: зб. наукових праць / ПДТУ, Серія: Технічні науки. Маріуполь, 2011. – Вип. 22. С. 36–41.*
32. Штепа Е. Д., Танкин А. Д., Муравьев В. Н. Определение фракционного химического состава колошниковой пыли. Москва : Металлургия. 1967. №3. С 8-11.
33. 27 Отчет о научно-исследовательской работе Анализ работы доменных печей советского союза (за 1981-1982гг) . ИЧМ, Днепропетровск, 1983.
34. Отчет о научно-исследовательской работе Анализ работы доменных печей советского союза (за 1983-1984гг) . ИЧМ, Днепропетровск, 1985.
35. Отчет о научно-исследовательской работе Анализ работы доменных печей советского союза(за 1985-1990гг). ИЧМ, Днепропетровск, 1991.

36. Отчет о научно-исследовательской работе Анализ работы доменных печей Украины (1991-1992). ИЧМ, Днепропетровск, 1993.
37. Отчет о научно-исследовательской работе Анализ работы доменных печей Украины (1993-1994). ИЧМ, Днепропетровск, 1995.
38. <http://www.metll.ru/page/gorenie-v-gorne/davlenie-gazov.html> Металлургия. Доменный процесс и внедоменная металлургия. 2008г.
39. Ницкевич Е. А. Теплоэнергетика доменного производства. Москва : Металлургия, 1966. 385с.
40. Сазанов Б.В. Доменные газотурбинные установки. Москва : Металлургия, 1965. 266 с.
41. <http://utz.ru/catalog/id/45> Газовая утилизационная турбина типа ГУБТ для металлургического завода.
42. Теплитский М. Г. Применение газовой турбины для использования избыточного давления доменного газа // Бюллетень, 1970, 18 (638). С. 20-22.
43. Ковалевский М. М., Колчанов А. П., Курош В. Д., Теплитский М. Г. Опыт доводки и эксплуатации головного образца ГУБТ-8 // Промышленная энергетика, 1969. № 10. С. 20-24.
44. Варшавский Я. И. Результаты испытания головного образца газовой утилизационной бескомпрессорной турбины ГУБТ-8 // Промышленная энергетика, 1970. № 8. С. 46-49.
45. Майоров А. И., Авербух М. Б., Петушков В. В. Бесконусные загрузочные устройства // Тяжелое машиностроение, 2001. №5 . С. 6-8.
46. Воробьев С. А., Соколов С. Ю., Сперкач И. Е. О работе газорасширительных установок за доменными печами в ОАО «Северсталь» в 2003 г. // Сталь. 2004. № 5. С. 122-124.
47. Старицкий В. И. Газовое хозяйство заводов черной металлургии. Москва : Металлургия, 1973. 496 с.
48. Сперкач И. Е. Новые технологические и технические решения по газоочистной системе доменного газа // Сталь. 2007. № 3. С. 97-103.

49. Сталинский Д. В., Каненко Г. М., Алхасова В. В. Совершенствование работы газоочисток доменного газа // *Металлург, и горноруд. пром-сть*. 2005. №5. С. 79-81.
50. Сталинский Д. В., Каненко Г. М., Алхасова В. В. Оптимизация конструкций газоочисток доменного газа // *Химическая техника*. 2006. № 11. С. 36-37.
51. Сталинский Д. В., Каненко Г. М., Алхасова В. В. Очистки доменного газа // *Экология и промышленность*. 2005. № 2. С. 37-40.
52. Большаков В. И., Голыбых Г. Н., Лаврик А. И., Сталинский Д. В., Каненко Г. М. Оценка эффективности применения газовых утилизационных турбин на Украине // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2007. №6. С.13-18.