МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

____Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки_____
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота / проєкт

_____перший (бакалаврський)_____
(рівень вищої освіти)

на тему_ **Реконструкція доменної печі з впровадженням заходів щодо підвищення технологічних показників_**_____

Виконав: студент _IV_ курсу, групи_6.1362-м-с2
спеціальності _____136 Металургія_____
(код і назва спеціальності)
освітньої програми _____Металургія_____
(код і назва освітньої програми)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)
_____І.О.Бухлаєв _____
(ініціали та прізвище)
Керівник __доц., к.т.н, доц. Кириченко О.Г._____
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)
Рецензент_проф., д.т.н., проф. Бєлоконь Ю.О.___
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кафедра____Металургійних технологій, екології та техногенної безпеки___
Рівень вищої освіти____перший (бакалаврський)_____

Спеціальність _____136 Металургія _____
(код та назва)
Освітня програма _____Металургія_____
(код та назва)
Спеціалізація _____
(код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри_____
«_____»_____20____року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ/ПРОЄКТ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

_____Бухлаєву Ігорю Олександровичу_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Реконструкція доменної печі з впровадженням заходів щодо підвищення технологічних показників _____
керівник роботи _____Кириченко Олексій Геннадійович, к.т.н., доц._____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом ЗНУ від «23» грудня 2025 року №1831-с_____

2 Строк подання студентом роботи _____15.06.2026_____

3 Вихідні дані до роботи __ Дослідити процес реконструкції доменної печі. Визначення закономірностей сучасних технологій виробництва чавуну. Науково-технічна література, авторські свідоцтва_____

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)
Реферат; вступ; 1 Загальна частина; 2 Конструкційна частина; 3 Технологічна частина; 4 Охорона праці та техногенна безпека; Висновки; Перелік джерел посилання_____

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

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1 Загальна частина	Кириченко О.Г., доцент		
2 Конструкційна частина	Кириченко О.Г., доцент		
3 Технологічна частина	Кириченко О.Г., доцент		
4 Охорона праці та техногенна безпека	Кириченко О.Г., доцент		

7 Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Вступ, реферат	11.05-15.05.2026	
2	1 Загальна частина	16.05-20.05.2026	
3	2 Конструкційна частина	21.05-27.05.2026	
4	3 Технологічна частина	28.05-06.06.2026	
5	4 Охорона праці та техногенна безпека	07.06-11.06.2026	
6	Висновки, перелік джерел посилання	12.06-14.06.2026	

Студент _____ _____І.О.Бухлаєв_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту) _____ _____О.Г.Кириченко_____
(підпис) (ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ _____Ю.О.Бєлоконь___
(підпис) (ініціали та прізвище)

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 103 с., 15 табл., 16 рис., 25 джерел

ДОМЕННА ПІЧ, РЕКОНСТРУКЦІЯ, ПИЛО ВУГІЛЬНЕ ПАЛИВО, ПОВНОТА ЗГОРЯННЯ, ЕКОНОМІЯ КОКСУ, КВКО

Мета роботи – зменшення питомої витрати коксу на тонну чавуну, підвищення продуктивності доменної печі та поліпшення умов праці.

Об’єкт розробки – реконструкція доменної печі ПАТ «Запоріжсталь» з впровадженням заходів щодо підвищення її технічного та технологічного рівня.

Метод дослідження та апаратура – аналітичне дослідження стану печі, статистичний аналіз впливу різних факторів на параметри процесу, порівняльна оцінка ефективності різних варіантів реконструкції.

Результати дослідження – виконано дослідження впливу ПВП на роботу доменної печі, на основі яких запропоновано кількість ПВП, марку та крупність ПВП, основні технологічні параметри роботи печі при вдуванні ПВП. Отримані результати можуть бути корисними при реалізації даної технології на доменних печах ПАТ «Запоріжсталь».

В загальній частині надано аналіз існуючої технології та устаткування доменного цеху, систематизована сировинна база, обґрунтовані техніко-економічні показники ДП №5, проаналізовані недоліки конструкції ДП №5 попередньої кампанії і запропоновані зміни, оцінений об'єм реконструкції та проведений розрахунок доменної шихти.

В конструкційній частині наведений вибір конструкції основних виробничих агрегатів, описані основні елементи конструкції доменної печі та представлений режим роботи.

В технологічній частин проведено обґрунтування реконструкції доменного цеху; надано опис технології доменної плавки з впровадженням пиловугільного палива та розроблені рекомендації по впровадженню ПВП.

У частині «Охорона праці та техногенна безпека» дається характеристика шкідливих умов доменного виробництва, санітарно-гігієнічних умов праці та визначаються заходи, що забезпечують комфортні умови праці, вимоги техніки безпеки, плануються протипожежні заходи, проводиться розрахунок захисного заземлення.

ЗМІСТ

Вступ 8
1 Загальна частина 12
1.1 Аналіз існуючої технології та устаткування 12
1.1.1 Ливарні двори і піддоменик доменних печей 13
1.1.2 Повітронагрівачі доменних печей 14
1.1.3 Завантажувальні пристрої доменних печей 14
1.1.4 Рудний двір 14
1.1.5 Бункерна естакада 15
1.2 Сировинна база 16
1.3 Техніко-економічні показники ДП №5 17
1.4 Недоліки конструкції ДП №5 попередньої кампанії і запропоновані зміни .. 18
1.5 Об'єм реконструкції 22
1.6 Розрахунок доменної шихти 28
2 Конструкційна частина 36
3 Технологічна частина 43
3.1 Обґрунтування реконструкції 43
3.2 Опис технології доменної плавки з впровадженням пиловугільного палива. 50
3.2.1 Горіння вугільного пилу в горні доменної печі 53
3.2.2 Кількість вугільного пилу, що згорає в кисневій зоні 56
3.2.3 Зміна довжини окислювальної зони 58
3.2.4 Аналіз виробничих результатів по вивченню горіння вугільних часток в горні доменної печі 61
3.2.5 Зміна газодинамічного режиму плавки і продуктивності доменної печі 64
3.2.6 Особливості установки вдування пилоподібного вугілля 69
3.2.7 Компоненти установки ВПУ: складування вугілля і вдування пилоподібного вугілля 71
3.2.8 Розмольно - сушильна установка 75
3.2.9 Вертикальний млин 77
3.2.10 Особливості роботи установки ВПУ 81

3.3 Рекомендації по впровадженню ПВП 87
4 Охорона праці та техногенна безпека 89
4.1 Вибір і характеристика майданчика ділянки підготовки пиловугільного палива ПАТ «Запоріжсталь» 89
4.2 Основні шкідливі і небезпечні фактори на ділянці підготовки пиловугільного палива 90
4.3 Розрахунок захисного заземлення 95
4.4 Засоби індивідуального захисту 96
4.5 Санітарно-побутові і допоміжні приміщення 98
4.6 Пожежна безпека 99
Висновки 101
Перелік джерел посилання 102

ВСТУП

Металургійний комбінат «Запоріжсталь» є одним із найбільших металургійних підприємств України. Його частка у національному виробництві складає: чавуну – 12%, сталі – 13% (зокрема мартенівської – 27%), прокату – 14% (в тому числі плоского – 37%).

Будівництво комбінату розпочали у 1931 році. Його основним завданням було постачання гарячекатаного та холоднокатаного листового металу для розвитку конвеєрного виробництва автомобілів, тракторів, сільськогосподарської техніки, залізничних вагонів тощо, які активно створювалися в цей період.

Проєктувати комбінат із повним металургійним циклом (виробництво чавуну, сталі та прокату) планувалося з урахуванням використання криворізької залізної руди, вугілля з Донецького регіону та електроенергії від Дніпрогесу. Перша плавка на доменній печі №1 була здійснена у 1933 році. До початку Другої світової війни, у 1941 році, більшість металургійних агрегатів та допоміжних цехів вже функціонували.

Завдяки високому технічному рівню проектування та застосуванню найсучаснішого на той час обладнання, комбінат швидко освоїв провідні технології, що дозволило йому зайняти лідерські позиції серед металургійних підприємств тієї епохи. Зокрема, окрім доменних печей об’ємом 960 м³, вперше у світі було побудовано доменну піч №3 об’ємом 1300 м³.

У мартенівському цеху діяли десять стаціонарних печей на 150 тонн кожна, де впроваджували сучасні технології виплавки сталі різних марок для виготовлення гарячекатаного та холоднокатаного металу. У ролі інноваційного прориву для країни виступило прокатне виробництво – тут вперше був запущений слябінг, а також перший у Європі безперервний стан гарячої прокатки тонколистового прокату (1680), що дозволяв випускати рулони завтовшки від 2 до 6 міліметрів.

В цеху холодної прокатки у 1939 році вперше на теренах країни було встановлено новітнє устаткування: безперервний трьохклітьовий і реверсивний

стани, а також спеціалізоване обладнання для травлення, термічної обробки, різання та обробки поверхні тонколистового прокату.

На той час «Запоріжсталь» була єдиним підприємством в країні, яке виробляло тонкий холоднокатаний лист для штампування складних панельних деталей кузовів автомобілів, тракторів, комбайнів та іншої техніки.

У 1950 році виробництво продукції на комбінаті не лише було повністю відновлено, але й перевищило довоєнний рівень у 1,6 раза. Поліпшення якості продукції, розширення асортименту та збільшення обсягів виробництва стало можливим завдяки впровадженню новітніх технологій і засобів автоматизації, розроблених на основі сучасних досягнень науки та техніки.

У післявоєнний період активно проводилося будівництво нових цехів і металургійних агрегатів. Було введено в експлуатацію цех холодної прокатки жерсті та цех гнутих профілів, який випускав до 500 типорозмірів продукції, широко застосовуваної в машинобудуванні, будівництві й інших галузях. Крім того, розпочав роботу цех холодної прокатки №3 з відділеннями шліфування та полірування стрічок і пластин із неіржавіючої сталі. Збудовано й цех товарів народного споживання, де діяло відділення з виробництва кухонних мийок із нержавіючої сталі.

Сучасна технологія доменної плавки передбачає комплекс прийомів і засобів їх практичної реалізації, які забезпечують виплавку чавуну необхідного хімічного складу в доменних печах. Такі печі мають бути оснащені обладнанням для стабільної подачі сировини, ефективного видалення продуктів плавки та належного управління процесами. У цьому процесі використовуються добре підготовлені сировинні матеріали та високо нагріте комбіноване дуття, що дозволяє максимально ефективно утилізувати продукти плавки й вторинну сировину. Впроваджена технологія має гарантувати стабільний робочий процес із мінімальними економічними витратами та відповідати екологічним стандартам.

У металургії застосовувалися різноманітні технологічні рішення:

- впорскування різних видів паливних добавок у горн печі;
- використання дуття з високою температурою;
- збагачення дуття киснем і природним газом.

Ключовим компонентом цієї технології є точне управління процесом плавки через контроль основних параметрів. На підприємствах здійснюється радіометричний контроль рівня завантаження сировини, автоматизований аналіз складу колошникового газу по всьому перерізу печі та безперервний контроль вологості дуття з можливістю оперативного коригування його потоку.

Враховуються реальні перспективи вдосконалення технологій для досягнення кращих показників в існуючих умовах. Проте кризові явища в соціально-економічній галузі унеможливили повну реалізацію наявних технічних можливостей, що призвело до відкотів технологій на поточний рівень.

В Україні виробництво чавуну скоротилося у 2-2,5 разів з 46,5 до 17,8-20,9 мільйонів тонн на рік, тоді як витрати коксу зросли на 20% із 497 до 596-615 кілограмів на тонну. Кількість працюючих доменних печей зменшилася з 55 до 39, через що їх продуктивність впала в 1,5 раза, а простої, зокрема аварійні, збільшилися в 2,5 раза.

Для відновлення доменного виробництва в Україні за сучасних соціально-економічних обставин необхідно розробити стратегію технологічного розвитку на підприємствах і вирішити комплекс структурно-фінансових, організаційно-господарських та науково-технічних завдань.

Організація технології інтенсивно експлуатованих доменних печей потребує впровадження найбільш ефективних технологічних і конструктивних рішень, а саме:

- удосконалення властивостей шихтових матеріалів і методів їхнього завантаження в печі;

- раціонального використання природного газу та інших паливних добавок; - мінімізації застосування коксу;

- оптимізації складу шихти й контролю її перетворення в печі для отримання чавуну заданих характеристик.

В сучасних реаліях особливу увагу слід приділити технології доменної плавки із впровадженням пиловугільного палива та природного газу. Зокрема, витрати пиловугільного палива до 178 кг на тонну можуть стати основою для

значного зменшення потреби у коксі. Це надзвичайно актуально в умовах обмеженого доступу до природного газу в Україні.

Отже, науково-технічний потенціал доменного виробництва залишається досить значним. Його раціональне використання може створити умови для відновлення металургійної галузі та визначення перспектив подальшого розвитку як у короткостроковій, так і у довгостроковій перспективі.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз існуючої технології та устаткування

У складі доменного цеху наявні чотири доменні печі з наступним корисним об’ємом:

№2 -1513м^3

№3 -1513м^3

№4 -1513м^3

№5 -1513м^3

Шихта завантажується у доменну піч, а в її нижню частину подається нагріте до температури 1150-1200°С повітря, збагачене киснем для прискорення технологічного процесу. Також додається природний газ, який замінює частину коксу, використаного у плавці. Внаслідок хімічних реакцій окислення вуглецю, що міститься у коксі, і термічного розкладання природного газу утворюється оксид вуглецю. При його взаємодії з оксидами заліза відбувається часткове відновлення металу.

Остаточне відновлення заліза та його насичення вуглецем для отримання чавуну здійснюється у нижній зоні доменної печі. Оксиди кремнію, кальцію, магнію та інші елементи, які знаходяться в агломераті, окатишах, руді й вапняку, під час плавки переходять у шлак. Під час випуску продуктів плавки з доменної печі чавун і шлак розділяються.

Отриманий рідкий чавун переважно направляється до мартенівського цеху для виробництва сталі, а також до ливарного цеху для виготовлення виливків. Рідкий шлак транспортується на гранбассейн для грануляції й потім передається споживачам, зазвичай для використання у дорожньому будівництві.

Доменний газ, що утворюється в процесі виробництва чавуну, після очищення від пилу застосовується як паливо для технологічних потреб комбінату.

Всі доменні печі розташовані острівним способом у лінію. Вони спільно використовують рудний двір і бункерну естакаду для забезпечення виробничого процесу. Для транспортного обслуговування цех обладнаний залізничними коліями.

Основна транспортна схема включає переміщення вантажів між рудним двором, трансферкарами і агломераційним цехом. Додатковий вантажопотік спрямований з рудного двору через трансферкари до бункерів бункерної естакади доменних печей.

1.1.1 Ливарні двори і піддоменик доменних печей

Усі доменні печі оснащені власним ливарним двором, який обслуговується електромостовими кранами вантажопідйомністю 20-5 тонн. Шлакові та чавунні льотки доменних печей обслуговують такі механізми: бурильна машина з дистанційним управлінням, електрогармата типу Е-6-050 УЗТМ, шлакові стопори з пневматичними приводами. На доменних печах №2 і №3 встановлено нові гідравлічні гармати та бурильні машини розробки «Дніпродіпромез». Для підняття кришок головного жолоба використовується маніпулятор.

Заміна сопел і фурм здійснюється вручну. Щоб полегшити цей процес, сопла розміщені на радіальних монорейках. Для транспортування сопел, фурм і вогнетривкого матеріалу використовується кільцева монорейка з електротельфером.

На ливарних дворах передбачені жолоби для випуску чавуну і шлаку та їх розливу в ковші. На доменних печах №2 і №3 жолоби закриті, і з-під них здійснюється аспірація газів у зоні льотки і похилого жолоба. На доменних печах №2, №3, №4 і №5 для розливання чавуну і шлаку використовуються похилі жолоби, а пересування ковшів виконується за допомогою лебідок. Випуск чавуну проводиться відповідно до встановленого графіку, який визначає час початку і завершення процесу. На доменних печах №2, №3, №4 і №5 упродовж доби проводиться дванадцять випусків.

Набивання жолобів вогнетривким матеріалом на доменних печах №4 і №5 здійснюється вручну або за допомогою електровіброштампів. На доменних печах №2 і №3 головний жолоб відливають із бетону, що значно подовжує термін його експлуатації.

1.1.2 Повітронагрівачі доменних печей

Повітря, необхідне для спалювання вуглецю, перед подачею в піч попередньо нагрівається до температури 1100–1150 °С. На доменних печах № 2, 3, 4 і 5 впроваджена система автоматичного керування перемиканням повітронагрівачів.

Передбачено використання випарного охолодження шиберів гарячого дуття та відсічних клапанів газових пальників повітронагрівачів доменних печей № 3, 4 і 5.

У доменній печі № 2 встановлено повітронагрівачі з підкупольними пальниками, які забезпечують нагрів дуття до температури 1400 °С.

1.1.3 Завантажувальні пристрої доменних печей

Завантаження усіх доменних печей здійснюється за допомогою похилих скіпових підйомників. На доменній печі №5 встановлено безконусний завантажувальний пристрій (склиз), тоді як на інших печах застосовуються триконусні засипні апарати.

Охолодження доменних печей реалізовано за двоконтурною системою. Лещадь, горн, заплечики та розпар охолоджуються водяною системою, а шахта — за допомогою випарного охолодження. При цьому верхня третина шахти не має охолодження.

1.1.4 Рудний двір

Рудний двір використовується для зберігання запасів сировини, її усереднення під час штабелювання, а також подачі до трансферкарів агломераційного й доменного цехів.

Майданчик рудного двору має прямокутну форму, його довжина становить 560 метрів, а ширина — 58 метрів. На території розташовано дві розвантажувальні траншеї. Перша траншея призначена для вивантаження сировини за допомогою баштового вагоноперекидача з вантажопідйомністю 150 тонн.

Переміщення матеріалів із траншеї до штабеля здійснюється рудним грейферним перевантажувачем.

Транспортна система, що забезпечує безперебійне завантаження бункерів на бункерній естакаді шихтових бункерів аглофабрики, включає чотири рудні трансферкари з вантажопідйомністю по 50 тонн і три коксові трансферкари виробництва фірми "Атласів-кар" із вантажопідйомністю 30 тонн.

1.1.5 Бункерна естакада

Бункерна естакада доменного цеху має дворядну конструкцію, виконану із металу та залізобетону. На естакаді розташовані чотири залізничні колії:

а) призначену для подачі коксу в коксові бункери;

б) дві колії, якими доставляють агломерат, руду, окатиші та інші добавки до рудних бункерів;

в) консольну колію для вивантаження матеріалів із залізничних вагонів на рудний двір.

Агломерат завантажується в бункери за допомогою хоперів. Кокс транспортується з коксохімічного заводу у залізничних вагонах. Привізний кокс розвантажується з вагонів безпосередньо у бункери доменного виробництва.

Для кожної доменної печі передбачено два коксові бункери: об'єм кожного складає 300 м³ (для ДП №2 – два бункери на 240 м³ кожен, для ДП №5 – сім бункерів по 90 м³).

Бункери для агломерату, окатишів, залізняку, вапняку та інших добавок розташовані у двох рядах, загальна кількість яких становить 192 одиниці. Корисний об’єм кожного з них дорівнює 90 м³. У доменних печах №2 та №5 встановлено конвеєрні системи для переміщення матеріалів у скіпи, а також системи вилучення запиленого повітря з підбункерного приміщення.

Для ДП №2 передбачено 4 бункери для агломерату (два об'ємом 130 м³ та два по 110 м³), а також 16 бункерів для окатишів і добавок об'ємом 40 м³ кожен. ДП №5 обладнано 4 бункерами для агломерату (два на 210 м³ і два по 110 м³) та аналогічно 16 бункерами для окатишів і добавок об'ємом по 40 м³.

Для подачі матеріалів із бункерів у скіпи колошникових підйомників у доменному цеху функціонують сім вагон-вагів.

1.2 Сировинна база

У доменному виробництві використовуються такі матеріали: залізна руда (кускова), марганцева руда, окатиші, кальцитовий та доломітизований вапняк, агломерат, кокс, різного виду металодобавки й шлак силікомарганцю.

Основу залізорудної бази ПАТ "Запоріжсталь" становить Криворізьке родовище, відоме багатими покладами гематитових і магнетитових руд. Це родовище розташоване в Дніпропетровській області вздовж річок Жовта, Саксагань та Інгулець. Його протяжність сягає 90 км при середній ширині 3 км, а глибина видобутку руди доходить до 500 метрів. Видобуток проводиться як підземним, так і відкритим способом. Найбагатші руди, що містять 46-60% заліза (Fe), переважно складаються з гематиту та кварциту й залягають над скупченнями магнетитових руд. Руди Криворізького родовища характеризуються найнижчим вмістом фосфору (P) і сірки (S) порівняно з іншими родовищами.

Магнетитові кварцити спочатку подрібнюються до крупності -75 мкм, а потім проходять магнітну сепарацію на гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК). Отримані концентрати, які містять до 68% Fe, використовуються для виробництва агломерату та окатишів.

Окатиші постачаються із Михайлівського, Полтавського та Центрального гірничо-збагачувальних комбінатів. Агломерат надходить із місцевої агломераційної фабрики. Марганцеву руду комбінат отримує з рудоуправлінь у місті Покров. Постачання доломітизованого вапняку здійснюється з Єленівського родовища у Донецькій області, а кальцитовий вапняк надходить із Комсомольського та Новотроїцького родовищ.

Кокс виготовляється на місцевому коксохімічному заводі ПрАТ "Запоріжкокс". Шлак силікомарганцю постачається Запорізьким феросплавним заводом, тоді як зварний шлак надходить із нагрівальних колодязів прокатного цеху. Металеві добавки доставляються із копрового відділення.

1.3 Техніко-економічні показники ДП №5

Техніко-економічне обґрунтування передбачає комплекс заходів для доменної печі № 5, які включають заміну системи охолодження, оновлення футерування печі, створення сучасного ливарного двору, а також ремонт і заміну обладнання для повітронагрівачів із встановленням систем утилізації тепла відхідних газів.

Передбачається впровадження автоматизованої системи управління технологічними процесами, електроприводами для завантаження доменної печі і повітронагрівачів, а також інших супутніх систем.

Особливу увагу приділено екологічним аспектам. Заплановано організацію збору уловленого аспіраційного пилу з подальшою передачею його на аглофабрику, а також будівництво споруд для збирання, очищення та повернення до виробництва дощових стоків і переливів умовно-чистих вод.

У рамках комплексу капітального ремонту доменної печі № 5 також розглянуто заходи з реконструкції ТЕЦ-ПВС. Зокрема, це включає заміну турбоповітродувки станції № 5 на новий компресор для доменного дуття, оновлення живильних електронасосів, колекторів холодного дуття, трансформаторів та іншого обладнання.

Основні техніко-економічні показники щодо капітального ремонту доменної печі № 5 із виконанням реконструкції наведені в таблиці 1.1.

Наведені дані демонструють економічну вигоду від капітального ремонту доменної печі № 5 із реконструкцією, яка забезпечить металургійному комбінату додаткові щорічні доходи у розмірі 119,89 млн грн та 127,01 млн грн залежно від обраного варіанту — використання чавунних холодильних плит або мідних холодильних плит.

У довоєнний період фактичний обсяг виробництва чавуну за рік становив 3535,7 тис. тонн.

У початкових умовах обсяг виробництва чавуну становить 4500 тис. тонн, що зумовлено потребою забезпечення запланованого конвертерного цеху власним чавуном відповідно до техніко-економічного обґрунтування (ТЕО), розробленого у

2006 році ДП «Укрдіпромез». Це ТЕО передбачає реконструкцію сталеплавильного виробництва з будівництвом конвертерного цеху і ливарно-прокатного модуля.

Таблиця 1.1 - Техніко-економічні показники

Найменування показників	Варіант з чавунними холодильними плитами	Варіант з мідними холодильними плитами
Річний обсяг виробництва, тис. т	1170,0	1200,0
Капітальні витрати з врахуванням податку на додану вартість, млн. грн.	482,52	502,84
Капітальні витрати без врахування податку на додану вартість, млн. грн.	402,10	419,03
у тому числі СМР	171,73	168,87
Приріст основних виробничих фондів, млн. грн.	395,40	412,40
Товарна продукція, млн. грн.	1357,20	1392,00
Річні експлуатаційні витрати, млн. грн.	1240,10	1267,68
Приріст прибутку (балансової) млн. грн.	120,12	127,34
Приріст чистого прибутку, млн. грн.	90,1	95,5
Приріст нормованих оборотних коштів, млн. грн.	13,24	18,83
Приріст амортизаційних відрахувань, млн. грн.	29,79	31,51
Додаткова чисельність по комплексу ДП працюючих № 5, чол.	39	39
у тому числі по доменному цеху, чол.	14	14
Продуктивність праці одного цеху трудящого, тис. т/чол.	4,71	4,75
Продуктивність праці 1 працюючого по власне доменній печі № 5, тис. т/чол.	26,0	26,7
Термін окупності, років	3,5	3,4

На початковому етапі доменні печі працюють на власному агломераті, а дефіцит цього матеріалу частково компенсується закупленими окатишами (26%). Надалі планується впровадження заходів у сфері агломераційного виробництва, що забезпечить доменний цех 100% власним агломератом шляхом збільшення його обсягів.

У рамках вдосконалення технологій роботи доменних печей передбачено використання пиловугільного палива, яке буде вдуватися через фурми в горн печі. Це дозволить замінити природний газ та частково скоротити споживання коксу при виробництві чавуну. Обсяг виробництва чавуну при застосуванні пиловугільного палива залишиться на рівні 4500 тис. тонн на рік – як і в початкових умовах. Водночас установка для приготування пиловугільного палива забезпечить витрату цього ресурсу на рівні 150 кг на тонну чавуну при річному виробництві 675 тис. тонн, а перспективно – 200 кг на тонну чавуну при річному виробництві 900 тис. тонн пиловугільного палива.

Застосування технології вдування пиловугільного палива дасть змогу суттєво скоротити витрати коксу. При робочій витраті пиловугільного палива 150 кг/т економія коксу складе 85 кг/т (81 кг/т скіпового) або 382,5 тис. тонн на рік. Якщо витрата пиловугільного палива складе 200 кг/т чавуну, економія коксу зросте до 132 кг/т (123 кг/т скіпового) або 594 тис. тонн на рік. Однак слід врахувати, що використання пиловугільного палива потребуватиме застосування коксу вищої якості типу «Преміум». За рахунок зазначених показників економія природного газу становитиме 120 м³ на тонну чавуну або 540 тис. м³ на рік при витратах пиловугільного палива 150 і 200 кг/т відповідно.

Виробництво пиловугільного палива планується здійснювати з використанням газів кауперів для сушіння вугілля замість азоту.

Техніко-економічні показники наведені у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 - Техніко-економічні показники

Показники	Одиниці вимірювання	До проєкту	Після проєкту
Витратні матеріали			
Агломерат	кг/т чавуну	1556.0	1275.0
Залізна руда	кг/т чавуну	55.0	25.0
Окатиші	кг/т чавуну	193.0	456.0
Вапняк	кг/т чавуну	38.0	83.0
Кокс скіповий, т	кг/т чавуну	525.0	409.0
Природний газ	тыс.м^3/т чавуну	95.0	-
Пиловугільне паливо (ПВП)	кг/т чавуну	-	150
Електроенергія (доменні печі)	кВт·год/т чавуну	0.21	0.21
Витрата кисню (доменні печі)	тис.м^3/год	0.065	0.035
Витрата дуття (доменні печі)	тис.м.^{3}/хв	1.41	1.28

1.4 Недоліки конструкції ДП №5 попередньої кампанії і запропоновані зміни

Конструкція доменної печі №5 попередньої кампанії, зображена на рис. 1.1, характеризується наступними особливостями:

- конічна форма горна;

- глибина мертвого шару становить 865 мм;

- відстань між віссю чавунних льоток і віссю повітряних фурм складає 2900 мм;

- чавунні льотки виконані з шамотного матеріалу;

- кладка периферії горна та лещаді виконана із звичайного вуглецю горизонтальними шарами;

- центральна частина лещаді: укладена зверху вниз на торець у такій послідовності - муліт (7 шарів, загальна висота 3861 мм), графіт (висота 1600 мм); сукупна висота лещаді дорівнює 5461 мм;

- підлещадне охолодження здійснюється за допомогою повітря;

- периферія горна та лещаді охолоджується трьома рядами холодильних плит.

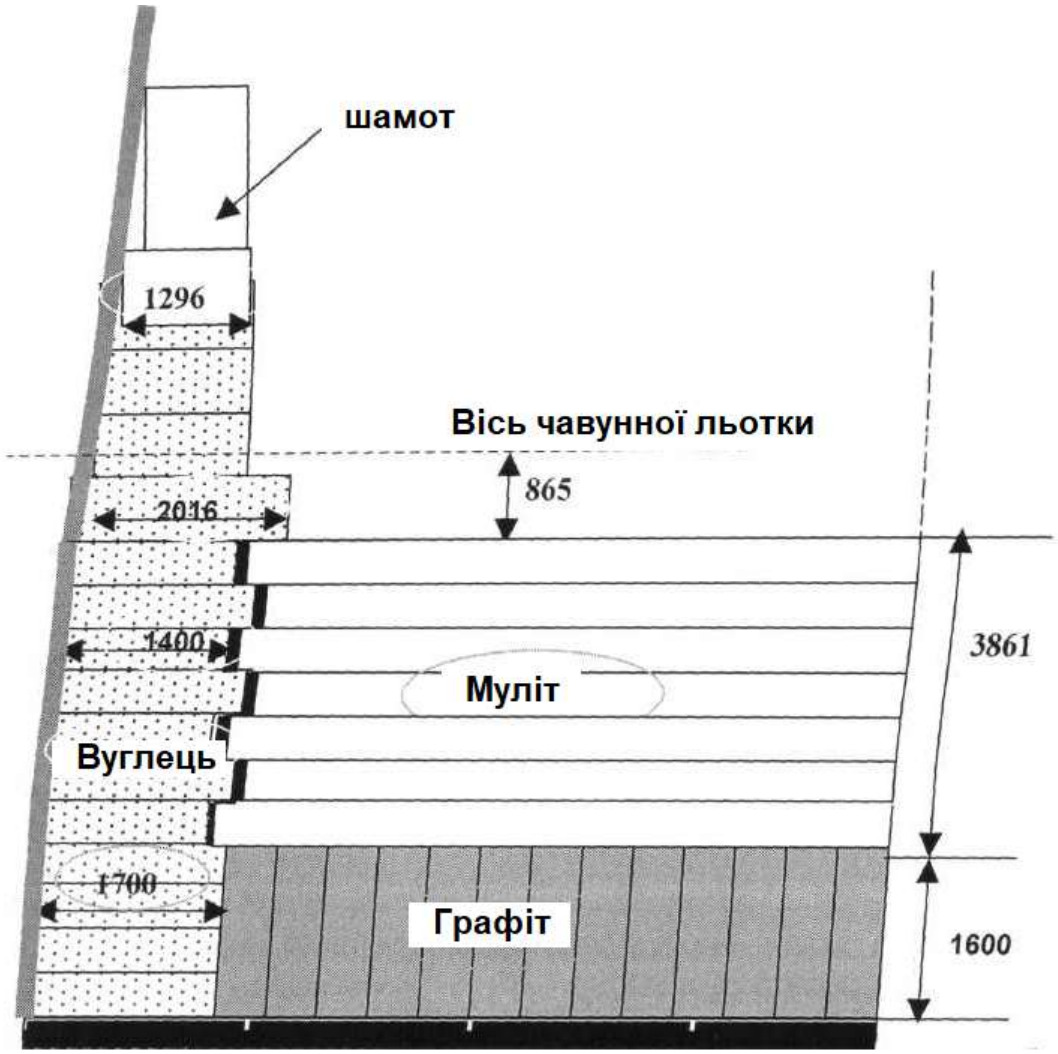


Рисунок 1.1 – Конструкція ДП №5 попередньої кампанії

Недоліки конструкції:

1. Застосування конічного горна з перегином кожуха нижче осі чавунних льоток спричиняє зменшення товщини стінок горна в найбільш критичній та конструктивно напруженій зоні.

2. В існуючій конструкції лещаді ряди мулітових блоків затиснуті між двома масивами вуглецевих блоків. Через різницю коефіцієнтів термічного розширення між мулітом та вуглецем при тих самих температурах утворюється температурна напруга в зоні контакту, що спричиняє тріщини у вуглецевих блоках. Особливо критичним це стає при температурах, характерних для верхніх шарів лещаді.

3. Через розташування ізотерми 1150°С під верхнім рядом масиву муліта (внаслідок великої висоти масиву лещаді) чавун проникає через тріщини вздовж кордону між вуглецем і мулітом в проміжки між першим і другим рядами стакана лещаді. Це зменшує радіальне обтискання верхнього ряду, яке протидіє піднімальній силі, що зрештою призводить до спливання більшої частки верхнього ряду. Процес триває доти, поки чавун не втратить здатність проникати через нові ряди кладки без затвердіння в них.

4. Вертикальне укладання графітованих блоків створює значні контактні термічні опори на стиках (зазори до 1 мм), що заважає рівномірному розподілу теплових навантажень по денцю печі. Це також знижує ефективність роботи холодильників нижньої лещаді, які мають забезпечувати охолодження.

5. Низька висота мертвого шару призводить до недостатнього притискання верхнього ряду кладки центрального масиву лещаді до решти рядів під вагою чавуну, що залишається в металоприймачі після випуску. Мала глибина мертвого шару також сприяє збільшенню периферійних потоків чавуну і шлаку, які викликають інтенсивний знос робочої поверхні кладки горна у зоні його стику з лещаддю.

6. Шамотні чавунні льотки здебільшого працюють як гарнісажні елементи. Наприклад, на доменних печах Запорізького меткомбінату об'ємом 3000 м³ і №1 Єнакіївського метзаводу об'ємом 1386 м³ шамот фактично був витіснений гарнісажем. Низька стійкість шамотних вогнетривів пояснюється їх низьким коефіцієнтом теплопровідності, через що ізотерма 1150°С наближається до охолодженої поверхні. В зарубіжній практиці для зон льоток використовують

мікропористі або супермікропористі вуглецеві вогнетриви з високим коефіцієнтом теплопровідності.

7. Укладання труб для підлещадного охолодження здійснюється у низькотеплопровідний вогнетривкий бетон, що є додатковим недоліком конструкції.

1.5 Об'єм реконструкції

Доменна піч №5 була збудована у 1952 році. У 1988 році її реконструювали, збільшивши корисний об'єм з 1410 до 1513 м³. Під час реконструкції виконали такі основні заходи: оснастили піч автоматизованими системами управління технологічними процесами та модернізували систему завантаження шляхом встановлення безконусного завантажувального пристрою.

Станом на сьогодні верх кожуха печі перебуває в незадовільному технічному стані, футеровка шахти та горна практично відсутні, а безконусний завантажувальний пристрій потребує заміни. Ливарний двір, який має застарілу конструкцію, не відповідає сучасним економічним і санітарно-гігієнічним стандартам. Крім того, обладнання бункерної естакади зношене, система аспірації працює неналежно, а продуктивність завантажувальної системи є недостатньою.

Обладнання та часткова футеровка повітронагрівачів також потребують заміни. Технологія експлуатації блоку енергозатратна та передбачає додавання природного газу до доменного. Металоконструкції та обладнання для газоочистки доменного газу знаходяться в аварійному стані та вимагають оновлення. Постачання дуттєвим повітрям не забезпечує необхідної продуктивності печі.

У зв’язку з високим ступенем зношеності обладнання, футеровкою, металоконструкціями, електрообладнанням, контрольно-вимірювальною апаратурою та потребою підвищення надійності роботи доменної печі №5 у режимі високої продуктивності, комбінат ухвалив рішення виконати капітальний ремонт із реконструкцією ДП №5 та пов’язаних допоміжних об’єктів.

Перелік об’єктів, реконструктивних заходів та ремонтних робіт:

1. Безпосередньо доменна піч:

- Замінити засипний апарат на БЗУ конструкції "Азовмаш". Передбачити систему пригнічення викидів аналогічно до ДП №2.

- Провести заміну системи охолодження. Систему охолодження рекомендується розглянути у таких варіантах:

* фурмені прилади охолоджуються технічною водою, інші елементи – у замкнутому контурі з очищеною хімічно водою з примусовою циркуляцією;

* система інтенсивного охолодження (СІО) заплечиків і нижньої частини шахти, фурмені прилади – технічною водою, решта – у замкнутому контурі з очищеною хімічно водою;

* СІО для заплечиків, шахти та повітронагрівачів, фурмені прилади – технічною водою, інші компоненти – технічною водою у відкритому контурі. Замкнуті контури варто виконати з підваріантами теплообміну «вода-вода» або «вода-повітря». Холодильні плити встановлюються на ділянці від лещаді до захисних плит колошника. У нижній частині шахти та заплечиках використовуються мідні холодильники, інші – чавунні. Два нижні ряди захисних плит колошника повинні бути водоохолоджуваними.

- Замінити фільтри технічної води на фільтри тонкого очищення та додатково забезпечити магнітну обробку води.

- Провести заміну футеровки печі. Кожух печі залишається без змін, зберігаються існуючі висотні відмітки денця, льоток, повітряних фурм та система охолодження денця. Рекомендується здійснити частковий ремонт кожуха відповідно до результатів обстеження. Рами чавунних льоток мають бути трирівневими. Шлакову льотку передбачено демонтувати.

- Заміна:

* атмосферних, вихлопних і наповнювальних клапанів;

* футерувальних плит куполу;

* зондських апаратів із встановленням радарних рівнемірів;

* термозондів;

* обладнання для відбору проб газу;

* фурмених пристроїв (зокрема зварна амбразура, сопло, фурмений холодильник та фурма конструкції «Запоріжсталь»).

- Виконати ремонт металоконструкцій опорної системи, колошникового та кільцевих майданчиків шахти, а також врізань газовідводів у купол печі за результатами обстеження.

- Повністю замінити систему централізованого змащення.

2. Ливарний двір та піддомненник

- Робочий майданчик ливарного двору та піддомненника організовується у два рівні за зразком ДП№2.

- Каркас будівлі ливарного двору зберігається в існуючому вигляді.

- Основні та транспортні жолоби виконуються за аналогією з ДП№2.

- Передбачено встановлення гідравлічних машин для відкривання і закриття чавунних льоток, маніпулятора, жолобів-розподільників конструкції «Дніпрогідромаша» з коливальним механізмом.

- Заміна крана ливарного двору на однобалочний консольний кран конструкції «Запоріжкрана». Механізація процесів обслуговування коливальних жолобів.

- Ремонт залізобетонних конструкцій та металоконструкцій відповідно до результатів технічного обстеження.

3. Повітронагрівачі, пиловловлювач та енергоміст

- Заміна обладнання: клапанів холодного дуття, пристроїв газоподілу, перепускних клапанів, димових, газових дросельних клапанів, газових пальників, шиберів гарячого та тягового дуття, а також клапана «снорт» з встановленням глушника за принципом ДП№3 і гвинтового транспортера.

- Монтаж вантажо-пасажирського ліфта в існуючій шахті.

- Ремонт обладнання, яке залишатиметься в експлуатації, згідно з дефектною відомістю.

- Ремонт металоконструкцій кожухів повітронагрівачів і пиловловлювача, естакади, монтажних майданчиків та залізобетонних конструкцій відповідно до результатів обстеження.

- Ремонт футеровки повітронагрівачів, повітропроводу гарячого дуття та газовідводів із заміною футерових плит, а також ремонт пиловловлювача згідно з

дефектною відомістю. Заміна колекторів, трубопроводів та арматури енергоносіїв на енергомості та у центральному вузлі, обладнання перехідних майданчиків на енергомості, а також ремонт металоконструкцій відповідно до висновків обстеження.

- Перепланування та ремонт електроприміщень для встановлення нового обладнання управління електроприводами і САУ. Інтеграція локальних систем кондиціонування повітря.

- Розширення зони обслуговування мостового крана блоку ВН.

- Встановлення системи утилізації тепла димових газів у блоці повітронагрівачів з централізованою станцією подачі повітря для горіння.

4. Машзал скіпового підйомника, похилий міст

- Виконання перепланування та ремонту електроприміщень машзала для встановлення нового обладнання керування електроприводами та САУ. Обладнання локальних систем кондиціонування повітря

- Замінено відхильні та головні шківи

- Виконано заміну скіпової лебідки на лебідку моделі LSP 2 9 виробництва ЮУМЗ

- Проведено ремонт металоконструкцій похилого моста відповідно до результатів обстеження

5. Будівля управління піччю, центральна приточна станція

- Виконано перепланування та ремонт приміщень для встановлення нового обладнання керування електроприводами та САУ. Обладнано локальні системи кондиціонування повітря

- По відомості дефектів виконано ремонт обладнання, металоконструкцій та теплоізоляції повітропроводів центральної приточної системи

6. Бункерна естакада

- Заміна грохотів коксу та агломерату з покращенням відсіву дрібноти агломерату

- Замінено затвори коксу, агломерату та затвори нижніх бункерів дрібноти коксу й агломерату

- Виконана заміна вагових воронок для коксу, агломерату та добавок разом із живильниками

- Замінено футеровку коксових та аглобункерів на плити кам’яного литва, а також футеровку бункерів для коксівної дрібниці та аглодрібниці

- Виконано заміну аспіраційних укриттів грохотів, живильників і точок пересипки матеріалів

- Встановлено систему обігріву горловини бункерів коксівної дрібниці

- Проведено ремонт конвеєрів коксу, добавок і окатишів за відомістю дефектів із заміною роликів

- Здійснено ремонт металоконструкцій коксівних та аглобункерів, бункерів для дрібноти коксу й агломерату, естакади конвеєрів, грат, настилів, майданчиків, а також рейок залізничних колій бункерної естакади за відомістю дефектів

7. Системи аспірації

- Встановлено системи аспірації ливарного двору, бункерної естакади, приймальної воронки БЗУ з монтажем рукавних фільтрів

8. Електрообладнання

- Розробка системи управління електроприводами механізмів шихтоподачі, завантаження, БЗУ, повітронагрівачів на основі програмованих контролерів із заміною щитів систем керування (ЩСУ) та кабельної продукції.

- У машинному залі скіпового підйомника встановити двотрансформаторну комплектну трансформаторну підстанцію (КТП).

- Проведення заміни тиристорних перетворювачів шихтоподачі та скіпового підйомника.

- Прокладання окремих кабельних трас для машинного залу, лівої і правої сторін шихтоподачі, БЗУ, чавунної та шлакової сторін ливарного двору, а також для систем освітлення в трубних блоках.

9. Системи АСУ ТП, контрольно-вимірювальних приладів (КВП) та зв’язку

- Впровадження систем автоматизації технологічних процесів (АСУ ТП) і КВП з функціональними можливостями, аналогічними тим, що використовуються на ДП №2.

- Заміна обладнання КВП, закладних елементів, імпульсних і кабельних трас.

- Прокладання кабелів зв’язку між АТС і кросовою станцією газового цеху, ДП №5 та станцією ковшевою, а також оновлення внутрішніх мереж зв'язку в центральному вузлі комунікацій. Оснащення ДП №5 системою гучномовного диспетчерського зв’язку, охоронно-пожежною сигналізацією, модульними комплексами автоматичного пожежогасіння та системою відеоспостереження.

10. Системи очищення колошникового газу

- Модернізація систем обприскування скрубера та труб Вентурі, заміна компенсаторів діаметром 2000 мм.

- Оновлення дросельної групи, насосів для підкачування, вимірювальних шайб і гідрозатворів.

- Заміна запірної арматури, реконструкція відведення шламових вод із систем очищення газу до циклу оборотного водопостачання, а також оновлення обладнання та кабельно-провідникової продукції у системах електроприводів і контрольно-вимірювальної автоматики (КВП і А).

- Ремонт корпусів установок, газопроводів, залізобетонних опор скрубера та краплевловлювача за результатами оглядів. Також передбачений ремонт шламового лотка, технічних майданчиків та будівлі газоочисної станції разом із її системами загального будівництва (ОБ) і будівельних конструкцій (БК), відповідно до виявлених дефектів.

11. Електропостачання

- Проведення ремонту комплектної трансформаторної підстанції (КТП) п/ст №194 із заміною автоматичних вимикачів ліній відгалужень.

- Реконструкція підстанції №123.

12. ТЕЦ

- Заміна турбоповітродувки ст. №5.

- Оновлення живильних електронасосів ст. №1 та №5.

- Заміна колекторів холодного дуття від турбогазодувної станції (ТВД) до доменної печі №5 на основі результатів технічного огляду.

- Оновлення скидних водоводів для циркуляційної води.

Під час реконструкції доменної печі ДП-5 зберігається її корисний об'єм, а також впроваджується сучасний ливарний двір із встановленням двох коливальних

жолобів для розливу чавуну та двох жолобів для розливу нижнього шлаку. У блоці повітрянагрівачів планується замінити обладнання клапанів і передбачити систему утилізації тепла відхідних газів із централізованою станцією подачі повітря для горіння.

Реконструкція охоплює бункерну естакаду, бункери для дрібноти коксу та агломерату, систему газоочищення колошникового газу, пиловловлювач, машинний зал і похилий міст. Також буде реалізована система аспірації для ливарних дворів, бункерної естакади, скіпової ями та приймальної воронки БЗУ із встановленням рукавних фільтрів.

1.6 Розрахунок доменної шихти

1.1 Вихідні дані

1.1.1 Залізорудна складова шихти включає агломерат і котуни. Співвідношення цих матеріалів, що надходять до цеху, становить 80% агломерату й 20% котунів.

1.1.2 Витрати сухого коксу на виплавку однієї тонни чавуну складають 530 кг/т.

1.1.3 Основність шлаку має бути 1,24.

1.1.4 Вміст (MgO) у шлаку має становити 4,9%.

1.1.5 Склад одержуваного чавуну:
94,07% [Fe]; 4,50% [C]; 0,70% [Mn]; 0,60% [Si]; 0,05% [S]; 0,08% [P].

1.1.6 Вміст золи в коксі – 11,60% (A); сірки – 2,00% (S); вологи – 4,60% (W); винос коксу колошниковими газами – 0,60 %.

1.1.7 Ступінь відновлення Fe –0,997; Mn –0,82; P –1.

1.1.8 Розподіл сірки: у чавун та шлак переноситься 87%; йде з газом –13%.

1.2 Встановлюємо загальні характеристики складу матеріалів для шихти

1.2.1 Встановлюємо середній хімічний склад залізорудної частини шихти. Підсумкові результати представлені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Середній хімічний склад залізорудної частини шихти

Найменування матеріалу	%, частка у суміші	Fe	Mn	S	P	Fe_2O_3	MnO	FeO	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3
Агломерат	80	43,424	0,688	0,016	0,032	50,928	0,888	10,000	8,520	8,560	0,440	0,552
Окатиши	20	12,066	0,000	0,006	0,004	16,918	0,000	0,280	1,640	1,060	0,040	0,040
Суміш залізорудної частини	100	55,490	0,688	0,022	0,036	67,846	0,888	10,280	10,160	9,620	0,480	0,592

1.2.2 Відсоткову частку шлакоутворювальних компонентів для шихтових матеріалів визначено та узагальнено у таблиці 1.2.

Таблиця1.2 – Відсоткова частка шлакоутворюючих для шихтових матеріалів

Найменування матеріалу	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	MnO	% частка шлакоутворюючих, a_i
Залізорудна суміш	10,160	9,620	0,592	0,480	0,888	21,740
Вапняк звичайний	1,570	53,390	0,170	1,300	0,000	56,430
Доломітизований вапняк	0,890	37,000	0,200	15,500	0,000	53,590
Зола коксу	43,000	6,100	23,000	1,360	0,390	73,850

1.2.3 Визначаємо отримання чавуну з шихтових матеріалів за допомогою формули

$$\frac{0{,}997 \cdot Fe_j + 0{,}82 \cdot Mn_j + P_j}{[Fe]+[Mn]+[P]}$$

де Fe_j, Mn_j, P_j – вміст заліза, марганцю та фосфору в j-му матеріалі, %.

0,997 і 0,82– ступінь переходу з шихти до чавуну заліза та марганцю відповідно;

[Fe], [Mn] та [P] – вміст заліза, марганцю та фосфору в передільному чавуні, %.

Вихід чавуну із залізорудної частини шихти набуде

$$e_{з.ч.} = \frac{0,997 \cdot 55,490 + 0,820 \cdot 0,688 + 0,036}{94,070 + 0,700 + 0,080} = 0,590 \text{ т/т}$$

Вихід чавуну з коксу буде

$$e_{к.} = \frac{0,997 \cdot 15,71 \cdot 0,116 + 0,82 \cdot 0,30 \cdot 0,116 + 0,17 \cdot 0,116}{94,07 + 0,70 + 0,08} = 0,0197 \text{ т/т}$$

де 0,116 - частка золи в коксі (11,60%).

1.2.4 Визначаємо вміст у шихтових матеріалах надлишкового оксиду кальцію

$$RO_j = CaO_j – Bn \cdot SiO_{2\,j},$$

де CaO_j; $SiO_{2\,j}$ – вміст CaO та SiO_2 у j-му шихтовому матеріалі, %;

Bn – основність шлаку.

Встановлюємо в залізорудній частині шихти вміст надлишкового оксиду кальцію

$$RO_{ж.ч.} = 9,620 - 1,24 \cdot 10,160 = -2,9784$$

Встановлюємо у вапняку звичайному вміст надлишкового оксиду кальцію

$$RO_{и.к.} = 53,390 - 1,24 \cdot 1,570 = 51,4432$$

Встановлюємо у вапняку доломітизований вміст надлишкового оксиду кальцію

$$RO_{и.д.} = 37,000 - 1,24 \cdot 0,890 = 35,8964$$

Встановлюємо в коксі вміст надлишкового оксиду кальцію

$$RO_{к.} = (6,100 - 1,24 \cdot 43,000) \cdot 0,116 = -5,47752$$

де 0,116 - частка золи в коксі (11,60%).

1.3 Питомі витрати шихтових матеріалів

У розрахунках потрібно споживатися такими позначеннями питомих витрат матеріалів (кг/т чавуну):

$g_{з.ч.}$ - Залізорудна частина шихти;

$g_{і.к.}$ – вапняк кальцитовий;

$g_{і.д.}$ – вапняк доломітизований;

К – кокс;

b_j – вміст MgO в j-му матеріалі, % частках.

$$e_{з.ч.} \cdot g_{з.ч.} + e_к \cdot К = 1000;$$

$$RO_{з.ч.} \cdot g_{з.ч.} + RO_{и.к.} \cdot g_{и.к.} + RO_{и.д.} \cdot g_{и.д.} + RO_{к.} \cdot К + [Si] \cdot \frac{60}{28} \cdot 1000 \cdot Вп = 0;$$

$$g_{з.ч.} \cdot b_{з.ч.} + g_{и.к.} \cdot b_{и.к.} + g_{и.д.} \cdot b_{и.д.} + К \cdot b_к \cdot \frac{А}{100} = \frac{(MgO)}{100} \cdot \left[\left(g_{ж.ч.} \cdot a_{ж.ч.} - \frac{60}{28} \times \right. \right.$$

$$\left. \left. \times \frac{[Si] \cdot 1000}{100} - \frac{71}{55} \cdot \frac{[Mn] \cdot 1000}{100} \right) + g_{и.к.} \cdot a_{и.к.} + g_{и.д.} \cdot a_{и.д.} + К \cdot \frac{А}{100} \cdot a_{к.} \right].$$

Цю систему слід розв'язувати щодо невідомих $g_{ж.ч.}$; $g_{и.к.}$; $g_{и.д.}$.

Точність обрахунку невідомих 0,1 кг/т чавуну.

1.3.1 Підставимо чисельні значення та вирішимо систему рівнянь

$$0{,}590 \cdot g_{з.ч.} + 0{,}0197 \cdot 530 = 1000;$$

$$-2{,}978 \cdot g_{з.ч.} + 51{,}443 \cdot g_{и.к.} + 35{,}896 \cdot g_{и.д.} - 5{,}47752 \cdot 530 + 0{,}60 \cdot 2142{,}857143 \cdot 1{,}24 = 0$$

$$0{,}0048 \cdot g_{з.ч.} + 0{,}013 \cdot g_{и.к.} + 0{,}155 \cdot g_{и.д.} + 530 \cdot 0{,}0136 \cdot 0{,}116 = 0{,}049 \cdot [(0{,}217 \cdot g_{ж.ч.} -$$

$$- 21{,}42857143 \cdot 0{,}60 - 12{,}909 \cdot 0{,}70) + 0{,}564 \cdot g_{и.к.} + 0{,}536 \cdot g_{и.д.} + 530 \cdot 0{,}116 \cdot$$

$$0{,}739$$

Спростимо систему рівнянь

$$G_{з.ч.} = 1678{,}385;$$

$$51{,}443 \cdot g_{и.к.} + 35{,}896 \cdot g_{и.д.} = 6307{,}701;$$

$$-0{,}015 \cdot g_{и.к.} + 0{,}129 \cdot g_{и.д.} = 10{,}139.$$

Розв'язуючи систему рівнянь, одержуємо витрати шихтових матеріалів

$g_{ж.ч.}$ =1678,385кг – залізорудна частина;

$g_{і.к.}$ =62,684кг – вапняк кальцитовий;

$g_{і.д.}$ =85,887кг – вапняк доломітизований.

Кількість агломерату та котунів у залізорудній частині суміші набуде

g_a =1342,7кг – агломерату;

g_e =335,7кг - котунів.

Перевірка

а) 0,590 · 1678,385 + 0,0197 · 530 = 1000

1000 = 1000;

б) -2,978 · 1678,385 + 51,443 ·62,684 + 35,896 ·85,887 -5,478 · 530 + 0,60 · · 2142,9 · 1,24 = 0

0 = 0;

в) 1678,385 · 0,0048 + 62,684 · 0,013 + 85,887 · 0,155 + 530 · 0,0136 · 0,116 = 0,049 · [(1678,4 · 0,217 - 21,429 · 0,60 - 12,909 · 0,70) + 62,684 · 0,564 + + 85,887 · 0,536 + 530 · 0,116 · 0,739]

1.4 Розкриваємо сумарний надходження хімічних елементів їх шихтових матеріалів. Результати представлені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4.1 - Сумарний прихід хімічних елементів їх шихтових матеріалів.

Найменування матеріалу	Кількість сухих, кг	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3
		кг/т чавуну			
Агломерат	1342,708	142,998	143,670	7,385	9,265
Окатиші	335,677	27,526	17,791	0,671	0,671
Вапняк кальцитовий	62,684	0,984	33,467	0,815	0,107
Вапняк доломітизований	85,887	0,764	31,778	13,312	0,172
Зола коксу	61,480	26,436	3,750	0,836	14,140
Разом		198,709	230,456	23,020	24,355

1.5 Вихід шлаку та склад шлаку та чавуну

Оксид кальцію, магнію та алюмінію повністю переходять у шлак. Діоксид кремнію частково відновлюється і переходить у чавун, а решта переходить у шлак.

1.5.1 Визначаємо витрати діоксиду кремнію на відновлення

$$\frac{60}{28} \cdot 0{,}60 \cdot \frac{1000}{100} = 12{,}857 \text{ кг/т чугуна } (SiO_2)$$

1.5.2 Визначаємо кількість марганцю, що переходить у чавун і шлак

Встановлюємо кількість оксиду марганцю, завантаженого в піч

$$\frac{1342,708\cdot 1,11}{100} + \frac{335,677\cdot 0,00}{100} + \frac{61,480\cdot 0,39}{100} = 14,904+0,240=15,144\text{кг}.$$

Установлюємо кількість марганцю, що переходить у шлак

$$15,144\cdot 0,18=2,726\text{кг, (MnO)}$$

де 0,18 - ступінь переходу марганцю в шлак.

Встановлюємо кількість марганцю, що переходить у чавун

$$15,144\cdot 0,82\cdot \frac{55}{71} = 9,62\text{кг}$$

або $\frac{9,620\cdot}{100} = 0,962$ % [Mn]

1.6 Розрахунок вмісту оксиду заліза у шлаку

Втрачене Fe та Fe у флюсі повністю переходить у шлак

або $3,103\cdot \frac{72}{56} = 3,989$кг (FeO).

940,7:0,997-

940,7+62,684·0,0016+85,887·0,002=3,103 кг (Fe)

1.7 Встановлюємо кількість сірки, що переходить у чавун і шлак

1.7.1 Кількість сірки, що приходить із шихтовими матеріалами в доменну піч

$$1342,708\cdot 0,0002+335,677\cdot 0,0003+530\cdot 0,02=10,969\text{кг}$$

1.7.2 Встановлюємо кількість сірки віддаленої газами з печі

$$10,969\cdot 0,13=1,426\text{кг}$$

Отже, кількість сірки, що приходить із шихтою, складе

$$q_s = 10,969-1,426=9,543\text{кг}.$$

1.7.3 Встановлюємо кількість сірки, що переходить у чавун

За емпіричною формулою добуваємо коефіцієнт розподілу сірки між шлаком та чавуном

$$L_s = 68 \cdot B_n - 38 = 68 \cdot 1{,}24 - 38 = 46{,}32$$

де B_n – основність шлаку.

Встановлюємо сумарну кількість компонентів, що переходять у шлак

$$Мп = (SiO_2 – [Si] \cdot 60{:}28 \cdot 10) + (Al_2O_3) + (CaO) + (MgO) + (FeO) + 0{,}25 \cdot MnO =$$

$$= 198{,}71 - 12{,}86 + 24{,}355 + 230{,}456 + 23{,}020 + 3{,}989 + 0{,}18 \cdot 15{,}144 = 470{,}40 \text{кг}.$$

Залежно від приходу сірки з шихтою та коефіцієнта її розподілу обчислюємо вміст (%) сірки у чавуні

$$\frac{100 \cdot 9{,}543}{470{,}40 \cdot 46{,}32 + 1000} = 0{,}042 \quad \% S$$

$$[S] = \frac{100 \cdot q_S}{Mn \cdot L_S + 1000} =$$

Встановлюємо кількість сірки, що переходить у шлак

$q_s – 10 \cdot [S] = 9{,}543 – 10 \cdot 0{,}042 = 9{,}124$

або $\frac{9{,}124 \cdot 100}{470{,}397 + 9{,}543} = 1{,}901$ % (S)

1.8 Встановлюємо кількість фосфору в чавуні

Весь фосфор, що приходить із шихтовими матеріалами, повністю переходить у чавун

$1342{,}708 \cdot 0{,}0004 + 335{,}677 \cdot 0{,}0002 + 62{,}684 \cdot 0{,}0001 + 85{,}887 \cdot 0{,}0001 + 530 \cdot \cdot 0{,}0017 = 1{,}520$кг

або $\frac{1{,}520 \cdot 100}{1000} = 0{,}152$ % [P].

1.9 Остаточний склад чавуну дорівнює

Fe	Si	Mn	S	P	C
94,07	0,60	0,962	0,04	0,152	4,174

Остаточний склад чавуну коректується рахунок вуглецю [С].

100 -94,07-0,60-0,962-0,04-0,152=4,174% [С].

1.10 Кількість та хімічний склад шлаку. Результати наведені у таблиці 1.10.

Таблиця 1.10.1 – Кількість та хімічний склад шлаку

Компонент	Переходить у чавун	Переходить у шлак	Усього	
			кг	%
SiO_2	12,857	185,852	185,852	38,758
CaO	-	230,456	230,456	48,060
MgO	-	23,020	23,020	4,801
Al_2O_3	-	24,355	24,355	5,079
MnO	-	2,726	2,726	0,568
FeO	-	3,989	3,989	0,832
S	0,419	9,124	9,124	1,903
Разом шлаку			479,522	100,000

1.10.1 Перевіряємо основність шлаку

$$Bn = \frac{(CaO)}{(SiO_2)} = \frac{48,060}{38,758} = 1,24$$

1.11 Витрата шихтових матеріалів на виплавку 1 т чавуну.

Найменування матеріалу	Сухі без виносу, кг	Вологі без виносу, кг	Вологі з виносом, кг
Агломерат	1342,71	1342,71	1369,56
Окатиші	335,68	339,03	342,42
Вапняк звичайний	62,68	63,94	64,26
Вапняк доломітизований	85,89	87,35	87,78
Зола коксу	530	554,38	557,71
Разом	2356,96	2387,41	2421,73

1.11.1 Загальний вміст вологи в шихті становить:

2387,41-2356,96 =30,45кг/т чавуну

1.11.2 Загальний винос сухого пилу із шихти складає:

2421,73-2387,41 =34,33кг/т чавуну

2 КОНСТРУКЦІЙНА ЧАСТИНА

Чавун отримують шляхом його виплавки у доменних печах, які є агрегатами шахтного типу. Процес виплавки відбувається безперервно. Шихтові матеріали, такі як агломерат, котуни, кокс і флюси, завантажують у піч зверху, тоді як у нижній її частині вдмухується повітря. Унаслідок згоряння коксу утворюються гази, до складу яких входять оксиди вуглецю в суміші з азотом і воднем. Потоки гарячого газу, які піднімаються до верхніх рівнів печі, прогрівають тверді шихтові матеріали. Поступово ці матеріали опускаються вниз у результаті згоряння коксу та розплавлення шихти. При досягненні певних температур починають розкладатися складні сполуки і відбувається процес відновлення заліза з оксидів, що завершується насиченням заліза вуглецем й його розплавленням.

Отриманий розплав накопичується у нижній частині печі. У ньому розчиняються елементи, такі як кремній, марганець, а також, частково відновлені компоненти — фосфор і сірка. Цей розплав перетворюється на чавун, до складу якого входить понад 92% Fe; 3,5-4,3% C, а також домішки Mn, Si, P, S. Після накопичення чавун періодично випускають з печі.

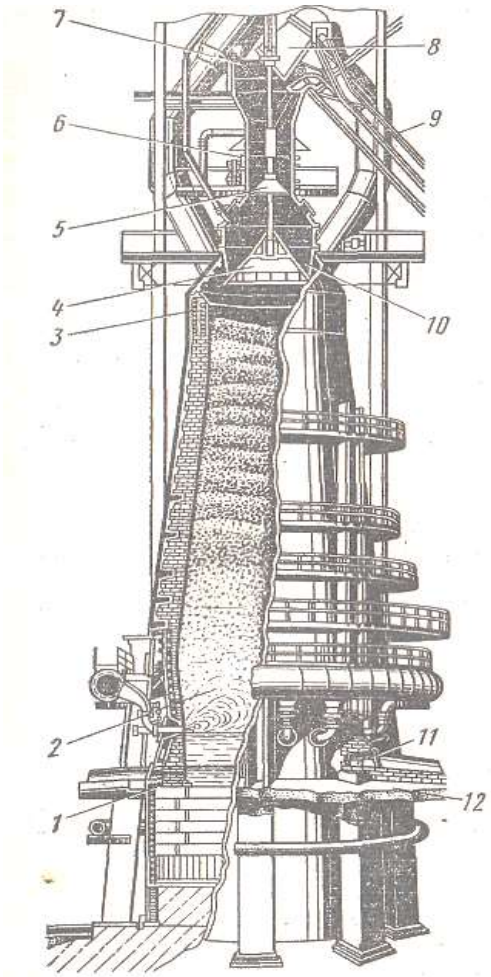
Внутрішній простір печі, обмежений футеровкою з вогнетривкої цегли, називають корисним об’ємом. Найбільші доменні печі мають корисний об’єм 5000 м³ і здатні виплавляти до 12 тисяч тонн чавуну щодня — це близько 9 тонн кожної хвилини.

Загальний вигляд і розріз сучасної доменної печі представлений на рисунку 2.1. Вертикальний розріз робочого простору називають профілем печі. У ньому можна виділити такі основні частини: колошник, шахту, розпар, заплічики та горн (рисунок 2.2). Профіль печі створюють таким чином, щоб забезпечити рівномірне опускання шихтових матеріалів і рівномірний розподіл висхідних газів по всій площині горизонтального перерізу.

Безпосередньо під колошником розміщена шахта печі. Її поступове розширення донизу дозволяє матеріалам легко просуватися вниз. Заплічики мають конусоподібну форму, що звужується до низу — це потрібно для того, щоб врахувати зменшення обсягу шихтових матеріалів внаслідок утворення рідких

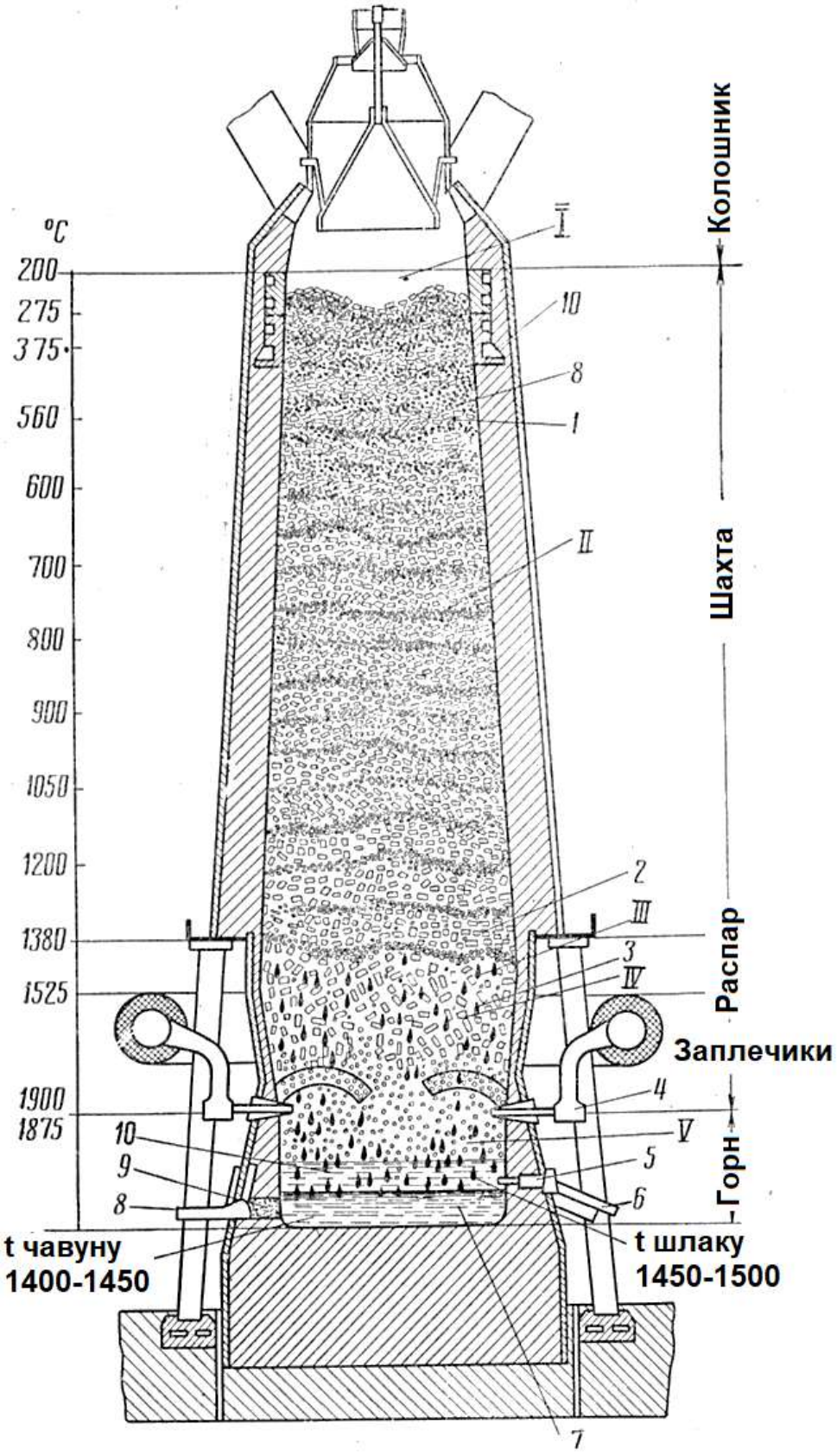
продуктів плавки та вигоряння коксу. Найбільш широка циліндрична частина між шахтою і заплічиками називається розпаром.

Фундаменти печі. Маса доменної печі разом із завантаженими в неї матеріалами може сягати 30 тисяч тонн. Для рівномірного розподілу тиску такої значної ваги на ґрунт підземну частину фундаменту (підошву) виконують у вигляді восьмикутної залізобетонної плити завтовшки до 4 метрів. Надземна частина фундаменту, або пень, виготовляється із жаростійкого бетону. На підошві фундаменту розташовуються сталеві колони, які підтримують сталеве кільце, що оточує доменну піч. Це кільце, яке називають мораторним, слугує для прийняття навантажень, створених металевими конструкціями печі.



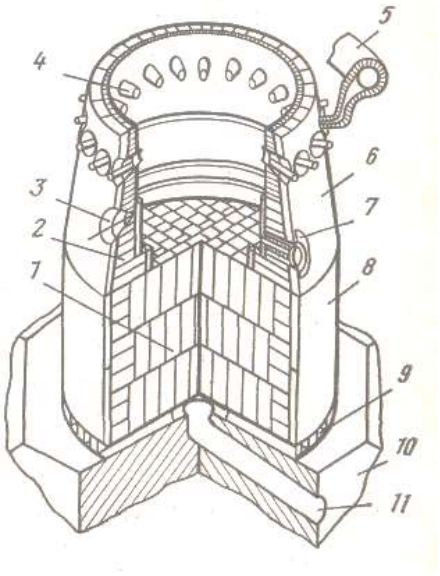
1 - льотка для випуску чавуну; 2 - фурмовий пристрій для подачі комбінованого дуття; 3 - циліндрична частина колошника; 4 - великий конус завантажувального пристрою; 5 - малий конус завантажувального пристрою; 6 - розподільник шихти, що обертається; 7 - приймальна лійка; 8 - скіп; 9 - похилий міст; 10 - міжконусний простір; 11 - льотка для випуску шлаку; 12 - робочий майданчик

Рисунок 2.1 – Загальний вид доменної печі



1-шихта; 2-краплі чавуну; 3-шлак; 4-фурми для подачі повітря в піч; 5-шлакова клітина; 6-жолоб для випуску шлаку; 7-рідкий чавун; 8-жолоб для випуску чавуну; 9-чавунна льотка; 10-рідкий шлак

Рисунок 2.2 – Вертикальний розріз доменної печі



1 - кладка лещаді; 2 - кладка горна; 3 - шлакова льотка; 4 - повітряні фурми; 5 - кільцевий трубопровід гарячого дуття; 6 - сталевий кожух горна; 7 - чавунна льотка; 8 - кожух ляща; 9 - канали охолодження низу лещаді; 10 - фундамент; 11 - трубопровід для подачі повітря для охолодження

Рисунок 2.3 – Конструкція лещаді і горна

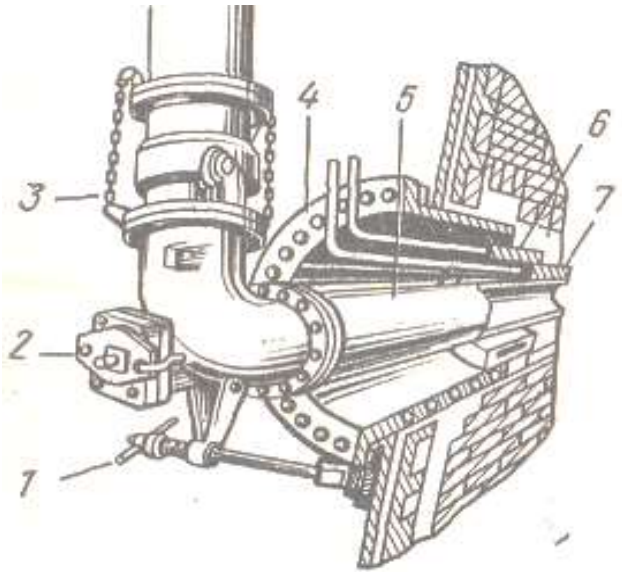
Лещадь і горн. Над фундаментом печі знаходиться ляск завтовшки до 5,5 м (Рис. 2.3). Нижню частину лещаді споруджують із графітованих вуглецевих блоків, зовнішню частину — з вуглецевих блоків, а центральну — з високоглиноземної цегли. Простір між лещаддю та льотками утворює нижню частину горна, де накопичуються чавун і шлак. Кладка ляща і горна розташована в чавунних плитових холодильниках, через які проходять труби з циркулюючою водою. Між ляском та пнем зазвичай розміщують металеві плити з пазами для повітряного охолодження. Сталевий кожух товщиною 40-50 мм охоплює зовнішню сторону металевих холодильників і футеровки. У зазорі між кладкою та холодильниками, що становить 100-120 мм, щільно укладається вуглецева маса.

У горні розташовані льотки для випуску чавуну та шлаку. Сучасні доменні печі обладнані від однієї до чотирьох чавунних льоток, розташованих на висоті 600-1800 мм від ляща. Через ці льотки накопичений у горні чавун випускають 6-8 разів на добу разом із частиною шлаку. Шлакові льотки, які використовуються для випуску «верхнього» шлаку, знаходяться вище чавунних льоток на 1400-2000 мм і

можуть бути однією або двома. Їх вісь нахилена під кутом 45-60° до осі чавунної льотки та забезпечена водоохолоджуваною арматурою — так званим шлаковим приладом. Шлаковий прилад встановлений у проріз горнових плитових холодильників і закріплений до кожуха печі. Якщо шлакових льоток дві, друга встановлюється під кутом 60-90° до першої. Шлакові отвори закривають металевими пробками за допомогою стопорного механізму. У великих доменних печах випуск шлаку переважно здійснюють разом із чавуном через ті самі льотки.

Фурми. По периметру верхньої частини горна з рівними інтервалами розташовані від 18 до 42 фурм, через які в піч подається нагріте повітря температурою 1100–1300 °С. Комплекс пристроїв, що забезпечує подачу повітряного дуття від кільцевого повітропроводу до горна, називається фурменним приладом (рис. 2.4). Він складається з мідної водоохолоджуваної фурми з внутрішнім діаметром до 200 мм, закріпленої в холодильниках і печі, яка виступає всередину кладки на 300 мм. Повітря надходить до фурми по сталевому соплу з футеровкою, яке з'єднане з рухомим коліном і, далі, через нерухомий фурменний рукав — із кільцевим повітропроводом. У передній частині фурменного приладу розташована гляделка для візуального спостереження за процесами в горні.

Якщо для посилення процесу плавлення застосовують природний газ або мазут, їх вводять у піч крізь сталеві трубки, що проходять через фурму.



1-механізм притиску фурменного пристрою до амбразури, 2-дивилка, 3-кріплення коліна; 4-кадушка; 5-сопло; 6-амбразура; 7-фурма

Рисунок 2.4 – Фурменний пристрій

Розпар та шахту виконують із шамотної цегли, а зовні облаштовують холодильники різних конструкцій, які забезпечують відведення тепла від стін та подовжують термін їхньої експлуатації.

Колошник та колошниковий пристрій. Колошник, розташований у верхній частині шахти, виготовляється зі сталевих плит. Між цими плитами та кожухом печі знаходиться шар вогнетривкої кладки із шамотної цегли.

Колошниковий пристрій складається з системи механізмів, які забезпечують завантаження шихти в піч, відведення газів і виконання монтажних робіт. Основним елементом цієї системи є засипний апарат (рис. 2.5), що включає приймальну лійку, куди шихта подається з транспортерної стрічки. Після цього матеріали переносяться у два проміжні бункери з герметичними затворами, а далі у розподільник шихти, що здійснює обертальні рухи. У цьому варіанті замість великого конуса використовується більш складна конструкція.

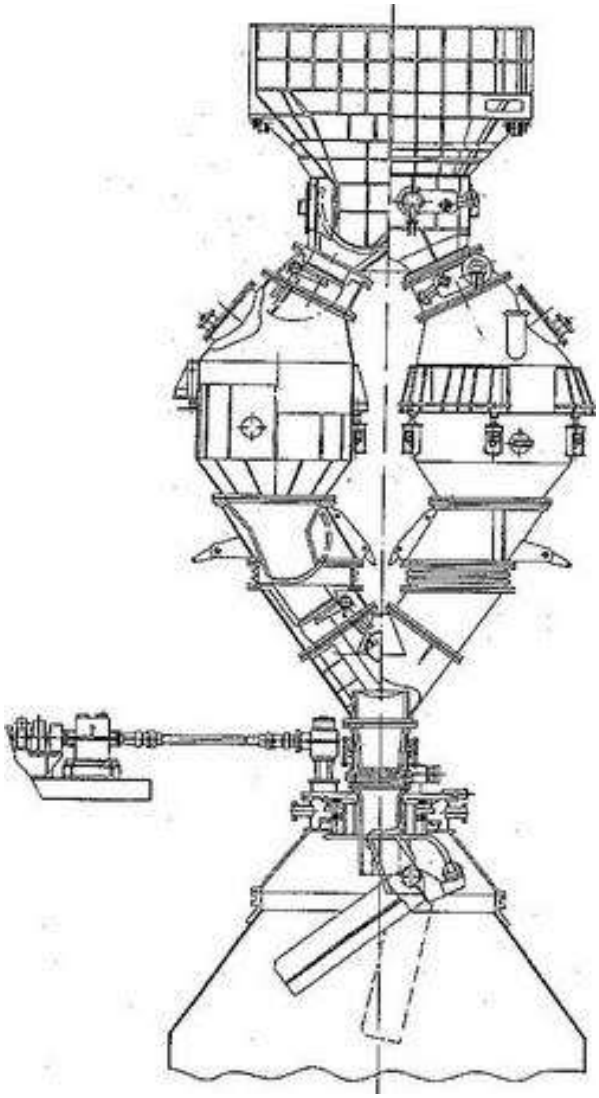


Рисунок 2.5 – Конструкція засипного апарату лоткового типу

Газ із купольної частини колошника відводиться через чотири газоходи, викладені вогнетривкою цеглою. Спочатку ці газоходи об'єднуються попарно, а згодом зливаються в один спільний газохід, який спрямовується до пиловловлювачів. У верхніх точках газовідводів розташовані атмосферні клапани, призначені для випуску газу в атмосферу під час зупинок печі. Відкриття цих клапанів здійснюється за допомогою електричної лебідки.

Охолодження печі. Система охолодження доменної печі покликана запобігти передчасному зношенню та пошкодженню цегляної кладки і деталей, що працюють у зонах з високою температурою. У разі використання водяного охолодження застосовують холодну технічну воду, тоді як для випарного охолодження використовують хімічно очищену воду, що дозволяє знизити ризики корозії труб і утворення накипу на їхніх внутрішніх стінках. У першому випадку вода подається до холодильників нижньої (заплечики, горн, ляща) і верхньої (розпар, шахта) зон під тиском 0,5 і 0,8 МПа відповідно. Фурми підтримуються в охолодженому стані за допомогою води, яка подається під тиском, що перевищує тиск газу печі на 0,5 МПа. При випарному охолодженні використовується прихована теплота пароутворення води у холодильниках лещаді та горна.

3 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

3.1 Обґрунтування реконструкції

На основі аналізу недоліків конструкції металоприймача доменної печі №5 попередньої кампанії пропонується розглянути такі основні технічні рішення для модернізації конструкції горна, лещаді та систем охолодження ДП №5 під час її реконструкції:

1. Використання циліндричної конструкції горна зі встановленням холодильників при охолодженні, а також конічної конструкції з нахилом у 2° із застосуванням зовнішнього поливу.

2. Впровадження двохкільцевої конструкції периферії горна та лещаді із застосуванням вогнетривів на основі вуглецю з різною теплопровідністю.

3. Збільшення глибини мертвого шару чавуну до 1500 мм.

4. Розширення відстані між віссю фурми та віссю чавунних льоток до 3900 мм.

5. Реалізація комбінованої центральної структури лещаді, яка передбачає використання:

- трьох рядів мулліту заввишки не менше 550 мм кожен;
- одного ряду вертикально укладених вуглецевих блоків заввишки 1100 мм;
- одного ряду горизонтально укладених вуглецевих блоків заввишки 550 мм;
- двох рядів горизонтально укладених графітованих блоків заввишки 800 мм.

Загальна висота лещаді становитиме 4100 мм.

6. Запровадження водяного охолодження нижньої частини лещаді.

7. Охолодження периферії горна та лещаді за допомогою системи зовнішнього поливу.

8. Впровадження систем автоматизованого контролю процесу розпалу футеровки горна й лещаді.

Збільшення висоти горна до зазначених параметрів забезпечує такі переваги:

- Підвищення ефективності знесірчення чавуну.

- Поліпшення умов відновлення оксидів (до 30–50% від загальної маси чавуну).

- Запобігання витісненню коксу з горна вгору у процесі накопичення чавуну й шлаку.

- Зростання накопичення теплової енергії у вигляді розпеченого коксу всередині горна.

- Виробництво чавуну зі зниженим вмістом кремнію.

- Оптимізація розподілу чавуну і шлаку в горні завдяки нахилу воронки під час видалення продуктів плавки через чавунну льотку.

- Стабілізація дуттєвого режиму завдяки зменшенню ймовірності деформації фурмених вузлів у результаті накопичення чавуну та шлаку.

- Зниження втрат тепла через лещадь завдяки відштовхуванню гарячих зон подалі від поверхонь високих температур.

Надмірне збільшення висоти горна призводить до низки негативних наслідків:

- зниження температури у горні,

- можливого зростання витрат коксу,

- підвищення вмісту вуглецю в чавуні,

- зростання нерівномірності у швидкості накопичення продуктів плавки та їхнього виходу через чавунну льотку.

Разом з тим, збільшення висоти горна дозволяє працювати при вищому рівні накопичення чавуну, що сприяє розширенню зони впливу льотки. Підвищене розташування повітряних фурм відносно осі льотки позитивно позначається на стабільності дуттєвого режиму. Зменшується ризик деформації фурмених осередків під час зростання рівня чавуну та шлаку у горні, а також посилюється процес насичення чавуну вуглецем до зони горна, що дозволяє мінімізувати вимивання вуглецю з футерування. Одним із ключових чинників, що впливають на руйнування футерування, є термомеханічні напруження у вогнетривах. З одного боку, вони піддаються впливу високих температур і їх коливань, а з іншого — через інтенсивне охолодження утворюється розтягнення і стискання, що збільшує ймовірність виникнення тріщин. Висока продуктивність доменної печі може також

значно підвищувати термічні та механічні навантаження на вогнетривке облицювання горна, особливо якщо турбулентний потік чавуну перешкоджає формуванню захисного шару гарнісажу на гарячій робочій поверхні.

Утворення тріщин сприяє зниженню теплопровідності до системи охолодження, що призводить до інтенсивнішого зношення стінок горна, особливо в його нижній частині. Для вирішення цих проблем необхідно забезпечити можливість теплового розширення матеріалів футерування та використовувати вогнетривкі матеріали з підвищеною стійкістю до термомеханічного навантаження.

У процесі проєктування конструкції горна й лещаді доменної печі №5 було детально розглянуто питання способу укладання нижньої частини лещаді: горизонтальними чи вертикальними рядами. У більшості сучасних доменних печей центральна частина лещаді футерується великогабаритними блоками, що укладаються горизонтально. Такий підхід вважається практично обґрунтованим. Ще у 1957 році дослідження температурного режиму лещаді за допомогою електричного інтегратора показали доцільність виготовлення вуглецевих вогнетривів із максимальною теплопровідністю у поздовжньому напрямку та мінімальною у поперечному.

Дослідження, проведені в УкрНДІ, продемонстрували, що в температурному діапазоні 340–480°С (а ця тенденція зберігається і для інших температурних умов) показники теплопровідності вуглецевих та графітованих блоків УкрГрафіта в поперечному і поздовжньому напрямках дорівнюють, відповідно, 4,5 і 6,1, а також 61,3 і 89,3 ккал/м·год·°С. Це свідчить про те, що відведення тепла в поздовжньому напрямку цими вогнетривкими матеріалами на 36-37% перевершує показники в поперечному. Водночас вертикальне укладання блоків істотно знижує теплопередачу в поздовжньому напрямку до елементів нижньої лещаді, які забезпечують охолодження. Основною причиною цього є шви в місцях контакту блоків. Навіть при ідеальному приляганні термічний опір стиків становить 0,003 м²·год·°С/ккал. Це призводить до того, що теплове навантаження на систему підлещадного охолодження у 3–5 разів перевищує навантаження на нижню лещадь, що може спричинити прорив денця. У запропонованих конструктивних

рішеннях цей чинник враховано: два нижні ряди лещаді виконані з графітованих блоків, а один – з вуглецевих і викладені горизонтально.

Останнім часом спостерігається тенденція до заміни мулітової вставки стакана лещаді на шамотну, однак це є неприйнятним. Використання шамота марки ШПД замість муліту у складі стакана лещаді недоцільне. Хоча ці матеріали мають схожі коефіцієнти теплопровідності та термічного розширення, їхні габарити суттєво різняться: висота шамоту становить 345 мм, тоді як висота муліту – 550 мм. Завдяки більшій висоті мулітова вставка забезпечує краще перекриття швів між цеглою, що дозволяє знижувати термодинамічну напругу, яка спричиняє розходження радіальних швів. Останнє є одним із ключових факторів руйнування лещаді. У дослідженні особливо підкреслюється, що шамотні вогнетриви схильні до механічного руйнування у верхніх рядах (так зване "спливання"), а це у свою чергу зумовлює їх подальше термічне руйнування. Зазвичай стабілізація робочого профілю лещаді після початкового руйнування верхніх шарів займає до 50 діб, причому відомо про випадки, коли за цей період спливало до семи рядів цегли.

Щоб знизити інтенсивність периферійних потоків чавуну і шлаку на ділянці стику між горном і лещаддю, рекомендується збільшувати глибину горна зі зростанням його діаметра. Для визначення мінімальної глибини горна необхідно враховувати, що залишкова товщина футерування периферії залежить саме від цієї величини.

З метою зменшення ерозії стінок горна, що виникає через рух чавуну під час його випуску, на багатьох доменних печах глибина горна (зумпф) встановлюється в межах 0,16–0,20 діаметра горна. Це рішення дозволяє запобігти розташуванню тотермана безпосередньо на лещаді, а також значно знизити швидкість руху чавуну біля стінок горна, зокрема в зоні чавунних льоток.

Однак невелика глибина зумпфа призводить до того, що ізотерма температури 1150°C доходить до основи одного-двох рядів мулітових блоків, викликаючи їх швидке руйнування. Лише після цього формується стабільний робочий профіль системи. У ситуаціях, коли відстань між льоткою та лещаддю є недостатньою, матеріал у центральній зоні горна (тотерман) осідає на лещаді. Це підсилює периферійний потік чавуну і шлаків, що своєю чергою підвищує ерозію і

знос у зоні стику стінок горна з лещаддю. З огляду на це, можна зробити висновок, що глибина горна повинна збільшуватися пропорційно до його діаметра (рис. 3.1; 3.2).

Як видно з рис. 3.1, у європейських доменних печах спостерігається тенденція до збільшення глибини зумпфа. Це позитивно впливає на ефективність роботи печей, особливо малого і середнього об’єму. Таке збільшення дозволяє утворювати плаваючий тотерман із зоною без коксу вздовж подини лещаді. Завдяки цьому, поряд із периферійними потоками, можливе поперечне переміщення чавуну по лещаді. Однак надмірне збільшення глибини зумпфа і надто тонка подина лещаді можуть викликати переохолодження останньої, утворення намерзань чавуну і погіршення дренажу в нижній частині тотермана.



Рисунок 3.1 – Взаємозв'язок між глибиною зумпфа з рідким чавуном і діаметром горна європейських доменних печей (зіставлення даних за 2005 і 2025 рр).

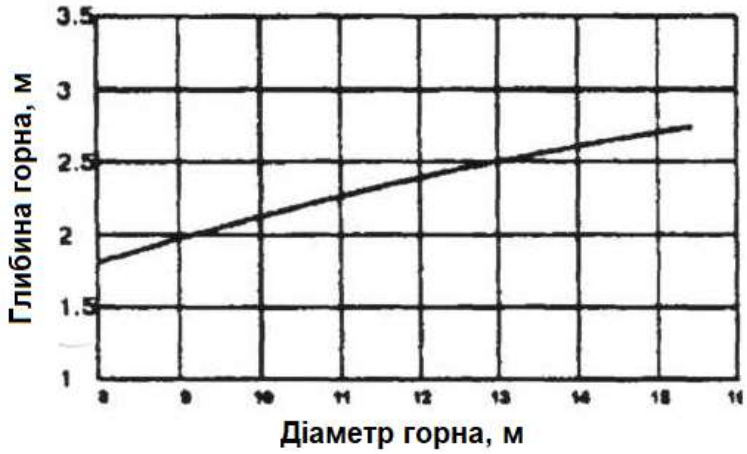


Рисунок 3.2 – Вплив діаметру горна на критичну глибину металоприймача: крива на рисунку – критична глибина зумпфа, нижче за криву – «тотерман» на лещаді, вище – плаваючий.

З урахуванням наведених даних, для доменної печі №5 висота зумпфа становить 1,5 м, що вважається оптимальною, незважаючи на те, що відповідно до рис. 2.2, для доменних печей із діаметром горна 9 м рекомендована глибина зумпфа варіюється в межах від 1,8 до 2 м.

Аналіз руйнувань вогнетривкої кладки свідчить, що однією з ключових причин виникнення дефектів є інфільтрація чавуну, цинку та лугів у пори вуглецевих вогнетривів, а також термічні напруги. Ці деструктивні чинники проявляються вже на початковому етапі експлуатації доменної печі; водночас перші конструктивні дефекти кладки також зазвичай виявляються на цьому етапі.

Загроза інфільтрації криється у збільшенні термічних напружень у вуглецевій футеровці під час фазових переходів чавуну та цинку, які проникають у структуру вогнетриву. Наприклад, якщо чавун інфільтрує у вуглецевий вогнетрив на 15% його довжини, термічна напруга матеріалу зростає у три рази порівняно з неінфільтрованим станом. Це, у свою чергу, спричиняє руйнування вогнетривкого матеріалу на межі шарів. Подібним чином діють і луги.

Періодичні глибокі охолодження та наступні прогрівання кладки (наприклад, під час переходу на «тихий хід» чи зупинок печі) провокують утворення тріщин, полегшуючи інфільтрацію цинку. Як наслідок, запускається інтенсивніший етап руйнування, що проявляється у швидкому зростанні товщини "окрихченого шару".

Цинк, проникаючи у структуру вуглецевих блоків, при зниженні температури вступає у реакцію з утворенням оксиду цинку та вуглецю за рівнянням (3.1).

$$Zn + CO \rightarrow ZnO_{тв} + C_{тв} \qquad (3.1).$$

Зі збільшенням об’єму на 20% через утворення твердого ZnOТВ і наявність вуглецю, відбувається значне розширення. Згубні наслідки такої реакції особливо помітні під час демонтажу кладки горна та лещаді доменної печі №1 Запоріжсталі. У ході робіт було виявлено моноліти ZnOТВ у вигляді масивних утворень товщиною до 300–400 мм та висотою понад 2 метри. Вони формували цілісний

пояс між льотками 2–3 і 4–1, пронизуючи вуглецеві блоки в межах "окрихченого шару". У результаті цього верхня робоча частина блоків горна фактично виштовхувалася в середину печі. При підвищенні температури, реакція (3.1) переходить у зворотний напрям.

Як випливає з наведених фактів, температурні коливання значно погіршують термомеханічні властивості вуглецевих вогнетривів. Ці властивості визначаються стійкістю матеріалу до розчавлювання за умов змін температури, а також модулем пружності при кімнатній температурі. Серед відомих марок вуглецевих вогнетривів найкращими характеристиками володіють супермікропористі (середній діаметр пор — 0,1 мкм) і мікропористі (середній діаметр пор — 0,3 мкм) матеріали, які значно перевершують традиційні вуглецеві вогнетриви з середнім діаметром пор 5 мкм. Варто зазначити, що інфільтрація чавуну може розпочатися вже за розміру пор понад 1 мкм. З огляду на це робочий шар футерування горна та лещаді рекомендується виготовляти із мікропористих вуглецевих вогнетривів.

Останнім часом зарубіжні виробники вуглеграфітових вогнетривів демонструють тенденцію до підвищення теплоємності своїх матеріалів, а також до розширення асортименту шляхом розроблення нових типів продуктів. Серед них — графіто-карбідо-кремнієві матеріали з різними типами зв’язок, напівграфітові та інші модифіковані вогнетриви. Останні мають кращі характеристики за деякими параметрами порівняно з традиційними вуглецевими матеріалами, зокрема теплопровідністю, зносостійкістю тощо.

Що стосується горна та лещаді доменної печі, основна увага приділяється теплопровідним властивостям вуглеграфітових вогнетривів. Головна мета використання таких вогнетривких матеріалів полягає у відведенні від охолоджуваної поверхні ізотерм початку хімічних реакцій, які спричиняють руйнування вогнетривких блоків. Це включає також ізотерми твердіння чавуну, які визначають залишкову товщину надійно функціонуючої вогнетривкої кладки.

Наприклад, для однокільцевої кладки завтовшки 1,5 м, виконаної зі звичайних вуглецевих вогнетривів із теплопровідністю блоків і набивної маси відповідно 6 і 2,5 Вт/м·К, ізотерма початку хімічних реакцій при температурі 550°С розташовується на глибині 294 мм від зовнішнього шару набивної маси, а питомий

тепловий потік складає 4700 Вт/м². Якщо замість звичайних вогнетривів використовувати матеріали з підвищеною теплопровідністю (блоки – 17 Вт/м·К, маса – 4 Вт/м·К), розміщення ізотерми зміниться на 177 мм, а тепловий потік зросте до 12 200 Вт/м², тобто теплові втрати збільшаться у 2,6 раза.

Підвищення теплопровідності маси до 15 Вт/м·К дає змогу значно покращити розташування ізотерм: для вітчизняних вуглецевих вогнетривів вони переміщуються всередину печі аж на 491 мм, а для високотеплопровідних японських матеріалів — на 399 мм. Оптимальним для однокільцевої кладки є теплопровідність набивної маси не менше 10 Вт/м·К, бажано максимально до 15 Вт/м·К і вище. При цьому теплопровідність блоків не повинна перевищувати 5–10 Вт/м·К (переважно ближче до нижньої межі).

Значно кращі показники розташування ізотерм забезпечує двохкільцева кладка. За оптимального співвідношення параметрів (теплопровідність блоків робочого кільця – 5–6 Вт/м·К, зовнішнього кільця – 20–26 Вт/м·К, а також теплопровідність маси між охолоджуваними елементами та кладкою – 15 Вт/м·К), ізотерма початку хімічних реакцій зміщується глибше — на відстань 773 мм від набивної маси. Це на 282 мм ближче до робочої поверхні блоків порівняно з однокільцевою кладкою навіть за використання високотеплопровідної набивної маси в останній.

Що стосується подальшого підвищення теплопровідності блоків зовнішнього кільця понад 25 Вт/м·К (наприклад, до 35 Вт/м·К), ефект стає незначним — ізотерма 550°С зміщується лише на 24 мм.

Одним із безсумнівних переваг двохкільцевої кладки є те, що ізотерма 550°С залишається у межах робочого кільця навіть за умови суттєвого зносу його значної частини — за умови дотримання оптимального співвідношення теплопровідностей кілець.

3.2 Опис технології доменної плавки з впровадженням пиловугільного палива

У металургії чавуну кінець XX століття позначився стрімким розвитком технології із використанням пиловугільного палива. Усього за 15-20 років ця

технологія пройшла шлях від теоретичних розробок та експериментальних плавок до повноцінного промислового впровадження у понад 30 найбільш розвинених країнах світу. Станом на 2000 рік у світі приблизно 400 млн тонн чавуну було виплавлено з витратою коксу менше 400 кг на тонну чавуну. При цьому доменні печі в таких країнах, як Німеччина, Бельгія, Нідерланди, Японія та Китай, досягли середньорічної витрати коксу на рівні 250-300 кг/т чавуну. Частка заміни коксу вугіллям сягнула 30-50%, а питома витрата вугілля становила понад 200 кг на тонну чавуну.

Перспективним є запровадження технологій, які передбачають одночасне вдування у горн двох або навіть трьох різних видів додаткового пального, що різняться металургійними властивостями, але сприяють досягненню максимального технологічного та економічного ефекту. Наприклад, у Німеччині успішно використовують комбінації пиловугільного палива (ПВП), виготовленого зі змішаного вугілля різних марок. У Сполучених Штатах застосування ПВП разом із мазутом дозволило досягти витрати коксу всього 270 кг/т чавуну при високій продуктивності.

Особливо багатообіцяючою є практика одночасного вдування у горн таких різнорідних палив, як ПВП і природний газ (ПГ). Використання високовуглецевого ПВП створює умови для мінімізації витрати коксу. Однак це супроводжується певними труднощами, зокрема зменшенням обсягу відновних газів, низьким вмістом водню, надмірно високими температурами горіння, що в результаті погіршує відновлення оксиду заліза та рівномірність сходження шихти. У таких умовах додавання природного газу сприяє оптимізації процесів і покращенню показників плавки.

Однак інтеграція додаткового пального та часткова заміна ним коксу негативно впливає на ключові параметри доменної технології. Зменшення частки коксу у шихті погіршує її порозність і газопроникність, знижує як теоретичну, так і реальну температуру у фурменій зоні, а також зменшує вміст кисню в доменному газі. Через це без додаткових компенсуючих заходів оптимальна витрата ПВП, як правило, не перевищує 30-50 кг на тонну чавуну.

Враховуючи можливість розрахунку наслідків вдування ПВП, паралельно зі збільшенням його витрати варто впроваджувати відповідні зміни, які б дозволили нейтралізувати негативний вплив ПВП. Це сприятиме як підвищенню його оптимальної витрати, так і збереженню чи навіть покращенню показників базового технологічного режиму.

При аналізі комплексу технологічних параметрів, що впливають на ефективність використання ПВП, для оцінки теплового режиму горна було застосовано рівняння теплового балансу для нижньої зони теплообміну. Це рівняння визначає необхідну теоретичну температуру горіння (де індекс «0» відповідає вихідним умовам, а індекс «1» — новим технологічним параметрам).

$$t_1 = t_н + \left(1 - 0{,}7 * \frac{r_{d0} - r_{d1}}{r_{d0}}\right) * \frac{K_0}{K_1} * \frac{V_0}{V_1} * (t_0 - t_н), \tag{3.2}$$

где: t_0 і t_1 – необхідна теоретична температура горіння, при якій забезпечується збереження базової температури продуктів плавки, ^{0}C;

r_{d0}, r_{d1} – ступінь прямого відновлення, в частках одиниці;

V_0,V_1 – вихід горнових газів, м^3/т коксу;

K_0,K_1 – витрата коксу, кг/т чавуну;

$t_н$ – температура в зоні сповільненого теплообміну, ^{0}C.

З аналізу наведених рівнянь, а також результатів дослідних і промислових плавок, виконаних як в Україні, так і за кордоном, видно, що за сумарного коефіцієнта заміни ($\Sigma K_З$), рівного 1,0 або більше, збільшення витрати ПВП не призводить до зниження ефективності його використання та не погіршує базових показників основних техніко-економічних параметрів доменної плавки (рис. 3.3).

Досвід європейських країн свідчить, що впровадження технологій із високим рівнем споживання пиловугільного палива (150-200 кг/т чавуну і більше) зазвичай здійснювалося в умовах надкомпенсації ($\Sigma Кз>1$). Це, разом зі збереженням високого базового коефіцієнта заміщення коксу пиловугільним паливом, сприяло помітному зростанню продуктивності доменних печей і зменшенню питомої витрати умовного палива.

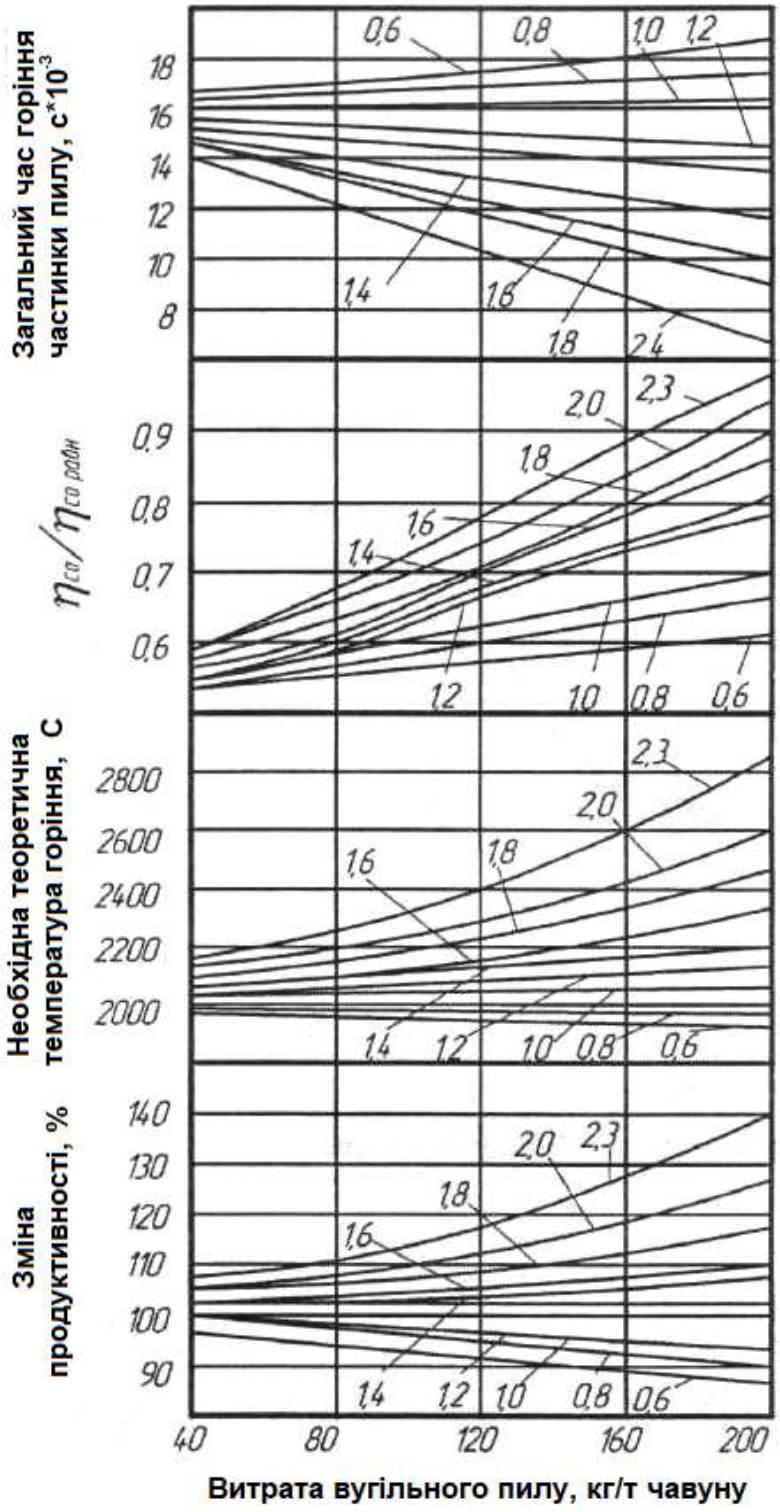


Рисунок 3.3 – Залежність основних технологічних показників від витрати пиловугільного палива (цифри біля кривих – сумарний коефіцієнт заміни, кг/кг)

3.2.1 Горіння вугільного пилу в горні доменної печі

Для забезпечення ефективного використання вугільного пилу в доменній печі важливо досягти повної газифікації в зоні горіння у горні. Практика експлуатації

доменних печей свідчить, що перевищення оптимального рівня витрат вугільного пилу для конкретних умов спричиняє масове займання фурм.

Розглянемо вплив різних факторів на механізм та кінетику процесу згоряння вугільного пилу в горні доменної печі. Через складність протікання процесів горіння оцінити їх з високою точністю досить важко. Дотепер не існує надійного методу розрахунку характеристик згоряння пиловугільного факела як для фурмової зони доменної печі, так і для інших паливних установок.

Час згоряння окремої частки вугілля є важливою характеристикою процесу. Розрахунки часу займання та вигорання часток тощого вугілля в кисневій зоні доменної печі проводились на основі емпіричних формул, отриманих під час досліджень процесу згоряння частинок вугілля різних марок.

Результати досліджень свідчать, що для часток антрациту та тощого вугілля процес горіння проходить у дві основні стадії: займання і горіння коксового залишку. Отримані розрахункові залежності, валідні для температур газового середовища до 1600 К, були екстрапольовані на температурний діапазон до 2100 К.

Формули, які використовувалися для визначення часу займання та згоряння часток вугілля, наведені нижче:

$$\tau_{в.к} = k_{в.к} \cdot 1{,}12 \cdot 10^6 \rho_{уг} \frac{d}{T_г^3};$$

$$\tau_{г.к} = k_{г.к} \cdot 2{,}21 \cdot 10^6 \rho_к \frac{100 - A_к^c}{100} \cdot \frac{d^2}{T_г^{0,9} O_2};$$

$$\tau_{о.б} = \tau_{в.к} + \tau_{г.к},$$

де $\gamma_{в.к}$ — час займання коксового залишку вугілля, сік;

$\tau_{г.к}$ — час вигорання коксового залишку, сік;

$к_{в.к}$, $к_{г.к}$ — коефіцієнти, залежні від марки вугілля; для худого вугілля $к_{в.к}$ =1,22, $к_{г.к}$ = 0,91;

$\rho_{уг}$ — щільність вугілля, що здається, г/м^3; значення визначається експериментально і для худого вугілля приблизно рівний 1,4 г/м^3;

$\rho_к$ — щільність коксового залишку, що здається, г/м^3, підраховується по формулі:

$$\rho_к = \rho_{уг} \frac{100 - W^р - V^р}{100} \qquad (3.6)$$

$W^р$, $V^р$ — вологість і вміст летких в робочій масі %;

d — початковий розмір часток, м;

T — температура газової середи, К;

O_2 — об'ємна концентрація кисню, в долях одиниці;

$A_{\hat{E}}^{\tilde{N}}$ — вміст золи в сухій масі, %.

Результати розрахунків для тощого вугілля розміром від 25 до 300 мкм при температурах газової фази в діапазоні 1200–2100 К наведено на рисунку 3.4.

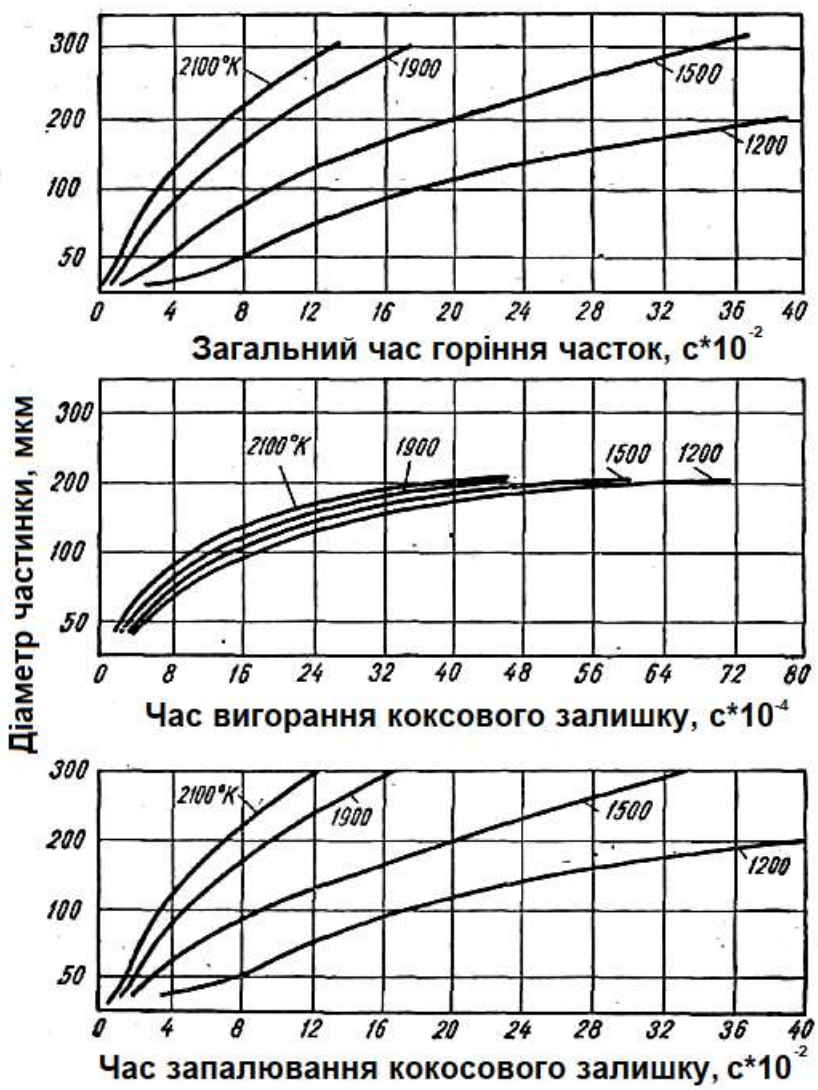


Рисунок 3.4 – Графіки залежності часу займання і вигорання коксового залишку, спільного часу горіння часток худого вугілля від їх діаметру для різних температур газової фази

З аналізу рівнянь (3.3, 3.4) випливає, що ключовими факторами, які впливають на час горіння частинок вугілля, є температура газової фази та розмір

частинок. Зростання температури від 1200 до 1500 К дозволяє скоротити тривалість горіння частинок майже вдвічі. У той же час збільшення діаметра частинок у 2 рази призводить до понад дворазового збільшення часу їх горіння. Це вказує на те, що процес горіння частинок антрациту та тощого вугілля відбувається у проміжній області між дифузійним і кінетичним режимами.

Помітно менший вплив має вміст золи у вугіллі: при подвоєнні її кількості тривалість горіння зростає лише на 20%.

3.2.2 Кількість вугільного пилу, що згорає в кисневій зоні

Повнота згоряння вугілля у фурменій зоні залежить від тривалості перебування його часток у зоні з достатнім вмістом кисню. Якщо процес горіння відбувається в кінетичній області за умови достатньої кількості кисню для повного окиснення кожної частки вугілля, можна розрахувати частку незгорілого вуглецю (q_4) за допомогою відповідного рівняння.

$$q_4 = \exp\left[-\left(k_1 z_1\right)^{n^1}\right] \tag{3.7}$$

Тут

$$z_1 = \int_0^{\tau} kCd\tau = kC_0 \frac{T_0}{T_{ñð}} \tau_{ñð}; \tag{3.8}$$

$$k_1 = k_1 \frac{1+\varepsilon}{\rho_{óä}} \left[\ln \frac{1}{R_{88}}\right], \tag{3.9}$$

причому

$$k_1 = \left(499 - 67n\right); \tag{3.10}$$

$$n_1 = n\left(0.98 - 0.29n\right), \tag{3.11}$$

де k — константа швидкості реакції горіння вуглецю, підраховується по формулі:

$$k = k_0 \exp\left[-\frac{E}{RT_{ñð}}\right], \tag{3.12}$$

для антрациту $k_0 = 4{,}5 \cdot 10^6$ см/сек;

E = 33500 ккал/моль;

T_o; C_o — початкові температура, К, і концентрація кисню, кг/м^3;

$T_{ср}$ $\tau_{ср}$ — середні температура газової середи і час перебування вугільних часток у факелі;

n = (0,8 ÷ 1,2) — показник полідисперсності, залежний від рівномірності фракційного складу;

ε — частка кисню, витраченого на утворення CO, в нашому випадку ε = 0,33, що має місце, коли об'єми тих, що утворюються CO і CO_2 однакові;

R_{88} — залишок на ситі з отворами 88мкм;

k_1 — узагальнений показник, що характеризує розмір і дисперсність часток;

z_1 — узагальнений показник, що характеризує швидкість процесу окислення вугільного пилу. Враховуючи залежність розміру часток x від помелу R_x

$$\ln R_x = \left(\frac{x}{88}\right)^n \ln R_{88}, \tag{3.13}$$

де R_x — залишок на ситі з розміром отворів x, після спільного вирішення рівнянь (3.7), (3.8) і (3.9) отримаємо залежність оптимального ($x_{опт}$) розміру вдуваних часток від температури газів і початкової концентрації кисню:

$$x_{опт} = A \frac{C_0 T_{ср} \exp\left[-\frac{E}{RT_{ср}}\right]}{T_{ср}}, \tag{3.14}$$

де

$$A = \frac{k_1' \frac{1-\varepsilon}{\rho_{уг}} \left[\ln \frac{1}{R_x}\right]^{\frac{1}{n}}}{\left[\ln \frac{1}{q_4}\right]^{\frac{1}{n_1}}} 88 k_0 T_0$$

При значеннях n = 1; $\rho_{уг}$ = 1,4 г/см^3; ε = 0,33; R_x = 0,01; $k_0 = 4{,}5 \cdot 10^6$ см/сек; T_o = 1300 К (температура дуття), в разі відсутності недопалювання q_4 = 0,01 і

$$x_{опт} = 92 \cdot 10^9 \frac{C_0 \tau_{ср} \exp\left[-\frac{E}{RT_{ср}}\right]}{T_{ср}} \text{ мкм}. \tag{3.16}$$

Для умов горіння в доменній печі, що працює на атмосферному дутті (з концентрацією кисню C_0 = 0,3 кг/м³), при середній температурі газового середовища $T_{ср}$ = 2000 К та часі перебування часток у зоні окислення τ = 0,01 с, оптимальний розмір часток вугілля становить 31,6 мкм. У випадку збільшення часу перебування до τ = 0,05 с цей параметр зростає до 158 мкм.

Слід зазначити, що отримані результати мають наближений характер через наявність певних припущень у розрахунках. Для досягнення більшої точності необхідно знати розподіл концентрації кисню та температури вздовж довжини факела. Однак ці дані добре корелюються з результатами, отриманими за емпіричними формулами В. Н. Бабія, І. П. Іванової та К. Хеддена. Таким чином, для ефективного повного згорання вугільного пилу його гранулометричний склад повинен максимально наближатися до монодисперсного з середнім розміром часток менше 30 мкм.

Незгорілі частки вугільного пилу можуть вступати в реакцію газифікації Будуара ($CO_2 + C \rightarrow 2CO$). Завдяки значній поверхні часток та вищій температурі газової фази порівняно з тією, що спостерігається до вдування пилу, ці частки активно беруть участь у відновленні вуглекислого газу, ймовірно навіть активніше за кокс. Однак, як показують дослідження, швидкість реакції відновлення CO_2 у 5–10 разів нижча за швидкість окислення вуглецю. З огляду на це, необхідно створити умови для максимально повного спалювання вугілля в зоні з високою концентрацією кисню.

3.2.3 Зміна довжини окислювальної зони

Процес згоряння вугільного пилу в доменній печі можна, за певних припущень, розглядати як процес горіння пилу в потоці. У такому випадку швидкість споживання кисню визначається температурою газового середовища.

$$C = C_0 e^{-\frac{\alpha z}{u}},$$

де C і C_0 — початкова і поточна концентрації кисню;

α — коефіцієнт реакційного газообміну реакції; при високих температурах він дорівнює константі швидкості реакції до;

z — довжина зони витрачання кисню;

u — швидкість руху газів.

Оскільки кінетична енергія потоку при вдуванні вугільного пилу фактично залишається незмінною, а діаметр каналу через це не зазнає змін, швидкість руху газів також не змінюється. Для кінцевої частини кисневої зони можна сформулювати рівняння.

$$e^{-\frac{kz}{u}} = e^{-\frac{k_1 z_1}{u_1}} \tag{3.18}$$

(З індексом 1 позначені параметри роботи печі з вдуванням вугільного пилу). Підставивши значення константи швидкості реакції, отримаємо формулу для розрахунку відносної зміни довжини кисневої зони під час вдування вугільного пилу.

$$\ln \frac{z_1}{z} = \frac{E_1 + E_2}{2R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right) = \frac{E_c}{2R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_1}\right) \tag{3.19}$$

де E_1, E_2 і E_c — енергія активації реакцій $2C + O_2 \rightarrow 2CO$; $C + O_2 \rightarrow CO_2$ і сумарною відповідно. Приймаємо E_c = 58000 ккал/моль;

T — температура газової фази, К;

R — газова постійна.

Таким чином, довжина кисневої зони під час вдування вугільного пилу залежить від змін температури газового середовища за інших однакових умов (розмір шматків коксу, його реакційна здатність тощо). Оскільки вугільний пил починає горіти вже у фурменому приладі до його потрапляння у вуглецевий канал, температура газової фази підвищується, що призводить до скорочення протяжності кисневої зони. Результати розрахунків відносного змінення довжини кисневої зони при вдуванні вугільного пилу порівняно з періодом без вдування подано на рис. 3.5.

Схожий підхід можна застосувати й для аналізу змін довжини вуглецевої зони.

$$\ln \frac{z_1^{CO_2}}{z^{CO_2}} = \frac{E_4 - E_c}{R}\left(\frac{1}{T'} - \frac{1}{T_1'}\right)$$

де $z_1^{CO_2}, z^{CO_2}$ — довжини вуглекислотних зон при вдуванні (з індексом 1) і без вдування вугільного пилу;

E_4 = 85000 ккал/міль — енергія активації реакції $C + CO_2$;

T_1 T'_1 — температури газової середи на вході в вуглекислотну зону.

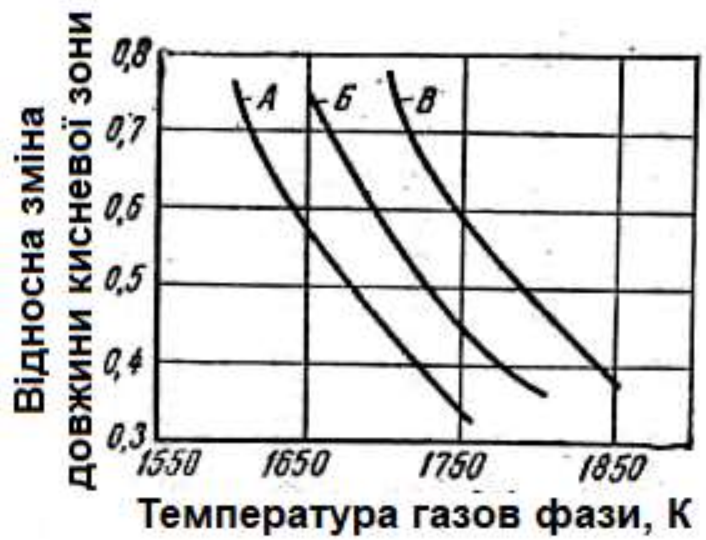


Рисунок 3.5 – Графіки залежності довжини кисневої зони від температури газової фази (початкова температура газової фази: А – 1550 К, Б – 1600 К, В – 1650 К).

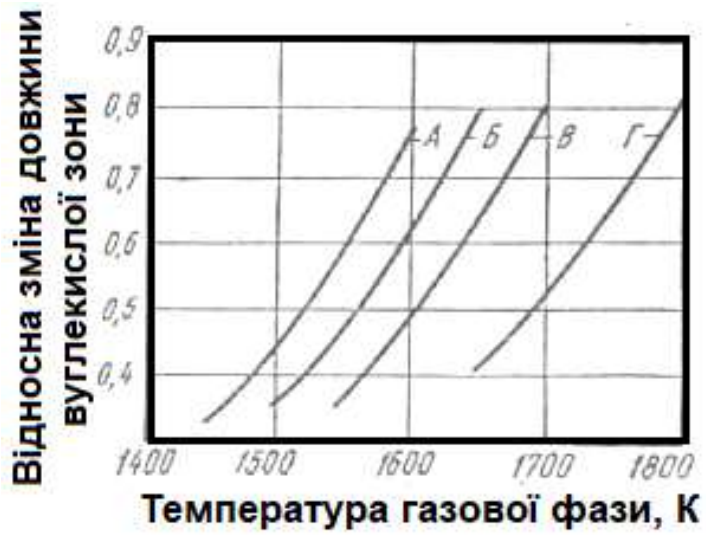


Рисунок 3.6 – Графіки залежності довжини вуглекислотної зони від температури газової фази (початкова температура газової фази: А – 1650 К, Б – 1700 К, В – 1750 К, Г – 1850 К)

Унаслідок підвищення середньої температури в кисневій зоні при подачі вугільного пилу і водночас невеликого зниження середньої температури в фурменій зоні через охолоджувальну дію аеросуміші пилу, температура у вуглекислотній зоні має бути нижчою, ніж у період без вдування пилу. Розрахунки демонструють, що процес подачі вугільного пилу призводить до скорочення довжини кисневої та вуглекислотної зон, що, своєю чергою, спричиняє загальне зменшення довжини окислювальної області (рис. 3.5).

Дослідження складу газової фази в горні доменних печей (рис. 3.6) при умовах із подачею пилу та без неї підтверджують відповідність теоретичних розрахунків і отриманих висновків.

3.2.4 Аналіз виробничих результатів по вивченню горіння вугільних часток в горні доменної печі

Як свідчить практика експлуатації доменних печей, концентрація вугільних частинок у 1 м³ дуття становить 35–58 г при використанні атмосферного дуття. Частинки вугілля розміром 20–22 мкм згоряють в окислювальній зоні протягом 0,01 с. Ці дані добре узгоджуються з обчисленими показниками часу горіння вугільних частинок.

Склад газу на зрізі фурми залежить від місця введення та розміру вугільних частинок. Наприклад, під час вдування природного газу та вугільного пилу марки АШ розміром 0,08 мм через фланець на відстані 400–450 мм від зрізу фурми вміст CO у газі досягає до 20%. Натомість, якщо подавати енергетичне вугілля з розміром частинок до 0,16 мм через водоохолоджувану порожнину повітряної фурми на відстані 250 мм від зрізу, вміст CO у газі становитиме близько 1% (див. рис. 3.6).

Характер кривих умісту CO_2 і CO на рис. 3.7 демонструє, що реакції окислення вуглецю й відновлення утвореної вуглекислоти при вдуванні вугільного пилу мають значно вищу швидкість. Збільшення інтенсивності окислення вуглецю напряму пов’язане зі зростанням швидкості утворення оксиду вуглецю. Це підтверджує, що згоряння вугільних частинок у горні доменної печі відбувається переважно з утворенням оксиду вуглецю.

Тривалість перебування частинки вугілля в зоні окислення залежить від особливостей конструкції вузла введення. За швидкості дуття близько 150 м/с і швидкості подачі аеросуміші 20-30 м/с цей час становить приблизно: при подачі вугільного пилу через фурму — близько 0,008 сек, а через сопло — у межах 0,011-0,012 сек.

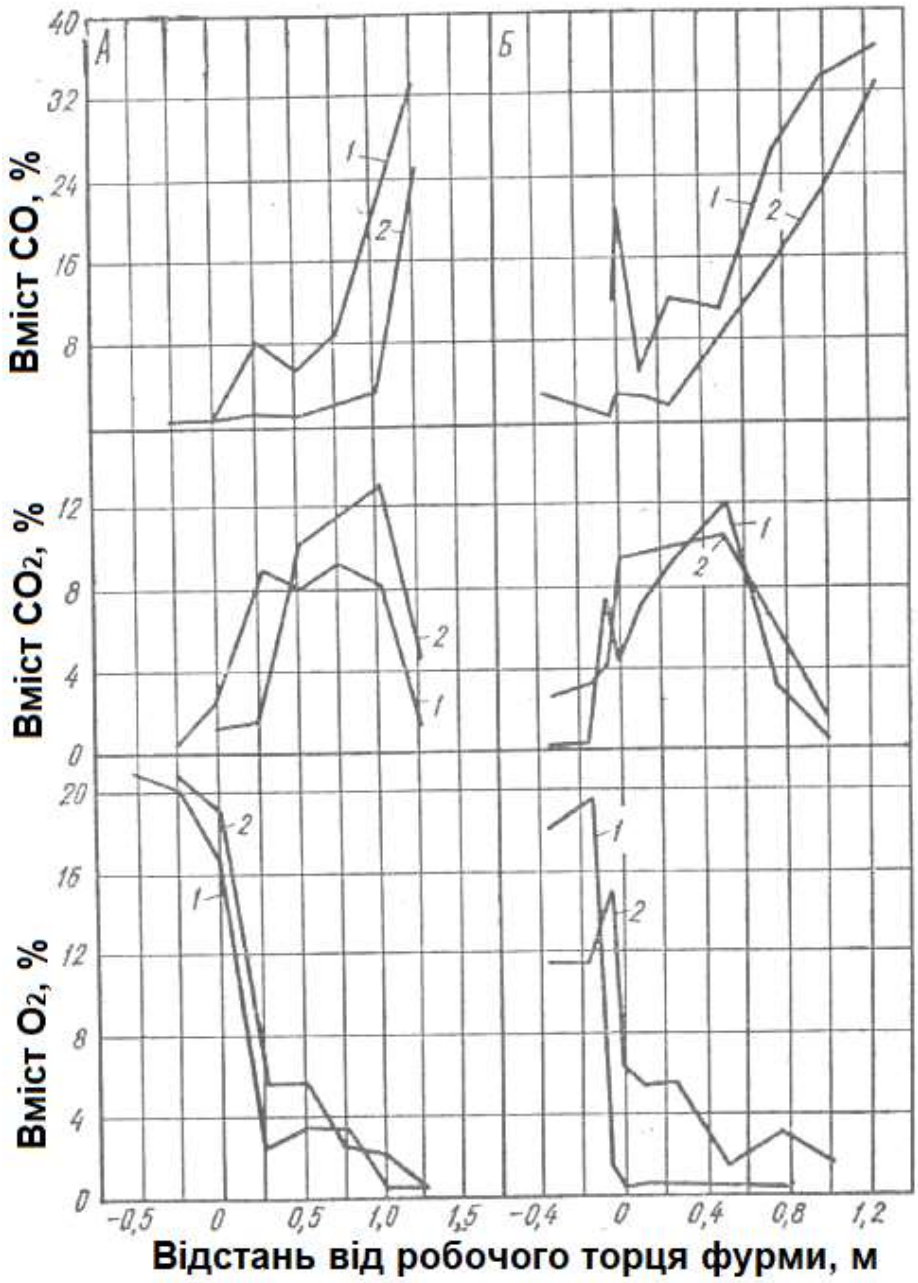


Рисунок 3.7 – Зміна складу газу по радіусу горна доменної печі № 2 Карагандинського металургійного заводу (А) і доменної печі № 12 ПрАТ «Каметсталь» (Б): 1 — при вдуванні вугільного пилу; 2 — без вдування.

На більшості заводів вугільний пил вводять у сопло на відстані 500–700 мм від робочого зрізу фурми. Такий підхід забезпечує якісне змішування вугільних часток із дуттям, їх попередній нагрів, займання та часткове згоряння вугільного пилу у фурмовій зоні. Якщо ця відстань буде більша, значна частина пилу встигне повністю згоріти у фурмовому пристрої. Це призведе до підвищення температури газів, плавлення і розм'якшення золи, що спричинить налипання її на стінки

фурменого пристрою. Тому місце введення вугільного пилу повинно обиратися відповідно до розміру часток, марки вугілля та температурно-дуттєвого режиму, щоб забезпечити повне вигоряння коксового залишку саме у межах фурменої зони.

Оптимальним варіантом є введення вугільного пилу через сопло або фланець фурми перпендикулярно потоку дуття або з протилежного боку від його напрямку. Це рішення збільшує різницю між відносними швидкостями потоків дуття та вугілля, подовжує час перебування часток у зоні окислення та сприяє кращому змішуванню. Завдяки цьому процес горіння значно пришвидшується.

Сьогодні широко застосовується технологія одночасного вдування природного газу та пиловугільного палива в горн доменної печі. При цьому місце введення природного газу розташоване на рівній або більшій відстані від робочого зрізу фурми порівняно з точкою введення вугільного пилу. Оскільки метан загорається швидше, ніж вуглець, природний газ згоряє у фурмовому пристрої швидше за пил. Це може уповільнити процеси згоряння вугілля через недостатню кількість кисню у газовій фазі. Тому розумніше забезпечити більшу відстань для введення пиловугільного палива порівняно з природним газом.

Для досягнення повного згоряння вугільних часток у горні і забезпечення високої продуктивності доменної печі необхідно також забезпечити рівномірний розподіл вугільного пилу між фурмами. Якщо розподіл буде нерівномірним, процес горіння сповільнюватиметься в тих зонах, де пилу потрапляє більше. Це викликано підвищенням концентрації вугільних часток у потоці дуття, зменшенням коефіцієнта надлишку повітря та незадовільним змішуванням повітря і пилових часток.

Спостерігається також суттєве погіршення стабільності температурного режиму горна. У фурмених зонах, куди надходить значна кількість вугільного пилу, температура газів і шихти помітно перевищує оптимальні значення, тоді як в інших зонах вона залишається значно нижчою. Це призводить до нерівномірного розподілу температури та газових потоків не лише по колу, а й по висоті печі. Водночас збільшується висота зони первинного шлакоутворення, підвищується опір стовпа шихтових матеріалів, що спричиняє зниження ефективності використання відновної й теплової енергії газів. Усі ці фактори можуть викликати

серйозні проблеми в роботі печі та негативно вплинути на техніко-економічні показники доменної плавки.

Отже, для забезпечення оптимальних умов горіння вугільного пилу у фурмених зонах доменної печі необхідно виконати такі заходи: дрібнити тоще вугілля й антрацит, максимально підвищувати температуру газів у фурмених зонах за рахунок підвищення температури дуття, збагачення його киснем і оптимізації витрати природного газу. Рекомендується вводити вугільний пил через сопло фурменого агрегату перпендикулярно або в напрямку, протилежному потоку дуття, на відстані 600–700 мм від робочого зрізу фурми. Також важливо забезпечити рівномірний розподіл вугільного пилу по фурмених зонах з точністю ±3–5%.

Теоретичний аналіз і проведені промислові випробування дозволяють стверджувати, що дотримання зазначених рекомендацій дасть змогу створити умови для повного згоряння значних обсягів пиловугільного палива у фурмених зонах — до 200 кг на тонну чавуну.

3.2.5 Зміна газодинамічного режиму плавки і продуктивності доменної печі

Використання пиловугільного палива за умови збереження початкових технологічних параметрів плавки може призводити до погіршення газодинамічного режиму, що своєю чергою знижує продуктивність доменної печі.

Існують різні методи теоретичного аналізу впливу технологічних умов на ефективність роботи печі. У багатьох дослідженнях зміну продуктивності печі в умовах вдування додаткового палива в горн визначали, базуючись на припущенні стабільності інтенсивності плавлення за обсягом вихідних горнових газів. Проте ключовим недоліком такого підходу є ігнорування фактора газопроникності шихтової маси. Цей параметр залежить від відносної витрати коксу та кількості шлаку, що утворюється на одиницю виплавленого чавуну. Значні коливання у споживанні коксу можуть суттєво вплинути на продуктивність печі саме через зміну газопроникності.

У цій роботі пропонується альтернативний підхід до розрахунку продуктивності печі, який заснований на аналізі швидкості руху газів у найважливішій для газодинаміки зоні печі — так званому розпаренні.

$$W_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}}}{(\varepsilon_{\text{к}} - V_{\Sigma})\, F_{\text{р}}}, \tag{3.21}$$

де $V_{пр}$ — приведена до умов розпарення кількість горнових газів, м^3/сек;

V_Σ — об'єм, займаний чавуном і шлаком, м^3/м^3 коксу;

$\varepsilon_к$ — об'єм порожнеч між шматками коксу, м^3/м^3 коксу;

$F_р$ — площа розпарення, м^3.

Розрахунки, виконані для різних умов плавлення на Череповецькому металургійному комбінаті із зменшенням витрати коксу з 750 до 450 кг на тонну чавуну, демонструють, що швидкість газів у зоні розпарення за цих умов суттєво не змінюється. Її значення, ймовірно, відповідає гранично допустимому рівню, який необхідний для забезпечення рівномірного сходу шихти та коливається в межах 8–12 м/с. У міру збільшення витрати вугілля швидкість газів у розпаренні помітно зростає, що обумовлено збільшенням вироблення шлаку та горнових газів на одиницю витраченого коксу.

Практичний досвід використання пиловугільного палива на Донецькому металургійному заводі показав, що при заміні до 15% коксу пиловугільним паливом загальна продуктивність доменної печі залишається майже незмінною, навіть попри зростання швидкості газів у розпаренні. Це можна пояснити невеликою зміною швидкості газового потоку, наявністю в доменній печі певних резервів щодо газодинамічного режиму, а також позитивним впливом перших порцій вугільного пилу на схід шихти. Зокрема, це сприяє оптимізації та стабілізації фізичних умов у зоні фурм, збільшує активну вагу шихти та знижує вироблення горнових газів на одиницю чавуну.

Проте вважається, що подальше збільшення витрати вугілля може призвести до погіршення газопроникності шихти, яке стане визначальним негативним

фактором. Виходячи з цього припущення, було проведено розрахунок продуктивності доменної печі за умови збереження швидкості газів у зоні розпарення на гранично допустимому рівні (тобто на рівні, що досягається при вдуванні 60 кг вугільного пилу на 1 тонну чавуну). Згідно з розрахунками, подальше підвищення витрати пиловугільного палива призведе до суттєвого зниження продуктивності печі.

Однак запропонований метод розрахунку не враховує позитивного ефекту від підвищення активної ваги шихти, зумовленого зниженням витрати коксу. Тож втрата продуктивності, отримана в результаті цих розрахунків, може бути дещо перебільшеною. Це припущення підтверджується результатами інших досліджень.

Отже, А. Ріст та Н. Мейсон у своєму графічному дослідженні процесу функціонування доменної печі із застосуванням зволоженого дуття й додаванням палива проводили розрахунок змін продуктивності печі за умов збереження стабільного опору газового потоку в ключовій зоні роботи доменної печі. Згідно з отриманими даними, використання пиловугільного палива спричиняє найменше, у порівнянні з вдуванням природного чи коксового газів, зниження продуктивності. Це зниження становить близько 6-8% на кожні 100 кг палива, витраченого на виробництво 1 тонни чавуну.

Найбільш досконалий, на нашу думку, підхід до розрахунку продуктивності печі за змінних технологічних умов плавки був розроблений А. А. Похвіснєвим і В. М. Клемпертом. У своїй роботі автори запропонували рівняння для розрахунку насипної ваги шару шихти в зоні розпарювання ($\gamma_{т.ж}$) та підіймальної сили газового потоку (ΔP). Баланс цих протилежно спрямованих сил визначає граничний, критичний рівень продуктивності:

$$\gamma_{т.ж} = (0{,}5 - \varepsilon)\,\gamma_{шл} + 0{,}5,$$

де ε — порозность коксу в зоні плавлення шихти, $м^3/м^3$;

$\gamma_{шл}$ — питома вага шлаку, $т/м^3$;

0,5 — насипна вага коксу.

Величина ΔР підраховується по формулі

$$\Delta P = 1{,}75 \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \cdot \frac{3H}{d} \cdot \frac{\omega^2 \gamma_г}{g},$$

де d — діаметр шматка коксу, м;

g — прискорення сили тяжіння, м/сек^2;

ω — швидкість газу, віднесена до всього майдану поперечного перетину печі, м/сек;

Н — висота шару шихти, м.

Для визначення величини є використовуються такі початкові параметри, як вихід шлаку, питома вага коксу та шлаку, вміст вуглецю у коксі тощо. На основі рівнянь (3.22) та (3.23) були виконані розрахунки для умов роботи доменної печі №3 Донецького металургійного заводу. За результатами розрахунків побудовано графіки (рис. 3.8), які свідчать, що при зниженні пористості шихти насипна маса шматків коксу (або активна вага шихти) збільшується за лінійним законом, у той час як підйомна сила газів зростає за параболічною залежністю. Це призводить до перетину двох кривих при пористості коксу приблизно 0,35 м³/м³ коксу, що досягається при вдуванні 100 кг вугільного пилу на 1 т чавуну в горн. Подальше зниження витрати коксу завдяки використанню пиловугільного палива супроводжується зменшенням інтенсивності плавки за кількістю горнових газів, що, своєю чергою, призводить до зниження продуктивності печі.

Збереження робочої продуктивності печі на початковому рівні при вдуванні 150 кг вугільного пилу на 1 т чавуну можливе лише за умови зменшення виходу шлаку з 470 до 310 кг/т чавуну. Водночас, як теоретичні дослідження, так і результати експериментальних плавок показують, що заміна коксу пиловугільним паливом не створює необхідних передумов для збільшення продуктивності доменних печей. При вдуванні в горн 60–80 кг вугільного пилу на 1 т чавуну та заміні до 15 % коксу вугіллям продуктивність печі може залишитися практично незмінною або навіть незначно зрости за сприятливих технологічних умов. Однак суттєве збільшення споживання пиловугільного палива, наприклад до 200 кг/т чавуну, та скорочення витрати коксу на 30–40 % здатне викликати суттєве зниження продуктивності печі.

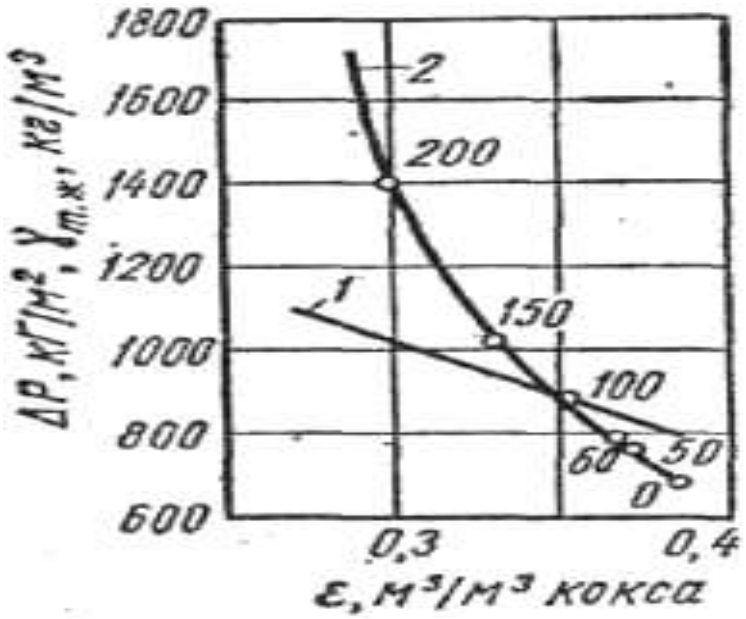


Рисунок 3.8 – Графіки залежності насипної ваги шару шихти $\gamma_{т.ж}$ (1) і підіймальної сили газу ΔР (2) від порозності шару ε. (Цифри біля кривої 2 – витрата вугільного пилу, кг/т чавуну)

Отже, використання пиловугільного палива, зокрема в кількостях понад 100 кг/т чавуну, доцільно супроводжувати заходами, спрямованими на покращення газодинамічного режиму доменної плавки. До таких заходів належать підвищення температури дуття, зменшення кількості шлаку, збагачення дуття киснем, вдосконалення фракційного складу шихти (особливо щодо великих часток) та її однорідності, оптимізація технологічного режиму плавки, а також покращення якості коксу.

Дослідження показали, що при впровадженні сухого дрібнодисперсного вугілля у кількості до 200 кг/т чавуну теоретична температура горіння знижується незначно — на 20-40 градусів на кожні 100 кг використаного вугілля на 1 т чавуну. Це зниження можна компенсувати шляхом регулювання температурно-дуттєвого режиму або ж зменшенням ступеня прямого відновлення заліза.

Підвищення температур горіння можливе завдяки дрібнішому помелу вугілля (до 25-50 мкм), а також зміщенню місця подачі палива на 600-800 мм від торця фурми. Це створює умови для повного згоряння великих обсягів пиловугільного палива в зоні фурм. У свою чергу, покращуються умови використання відновлювальної енергії горнових газів за рахунок тривалішого

контакту відновлювальних газів із оксидами заліза. Зазначені фактори не є серйозним обмеженням для використання значних обсягів пиловугільного палива.

Основною лімітуючою умовою під час процесу доменної плавки залишаються газодинамічні характеристики. Результати розрахунків за різними методиками, а також практичний досвід експлуатації доменних печей із впровадженням пиловугільного палива свідчать про те, що збільшення його витрати до 80-100 кг/т чавуну практично не впливає на продуктивність печі. Проте при використанні пиловугільного палива в кількості понад 100 кг/т чавуну забезпечити стабільну чи навіть підвищену продуктивність можна завдяки низці заходів: збагачення шихти, зменшення кількості шлаку, покращення крупності та однорідності коксу, а також скорочення виходу горнових газів шляхом зниження витрат коксу або збагачення дуття киснем.

Пропонується вдосконалена принципова схема компоновки устаткування, яка орієнтована на індивідуальний і контрольований підведення пиловугільного палива до кожної фурми доменної печі (див. рисунок 3.9).

3.2.6 Особливості установки вдування пилоподібного вугілля

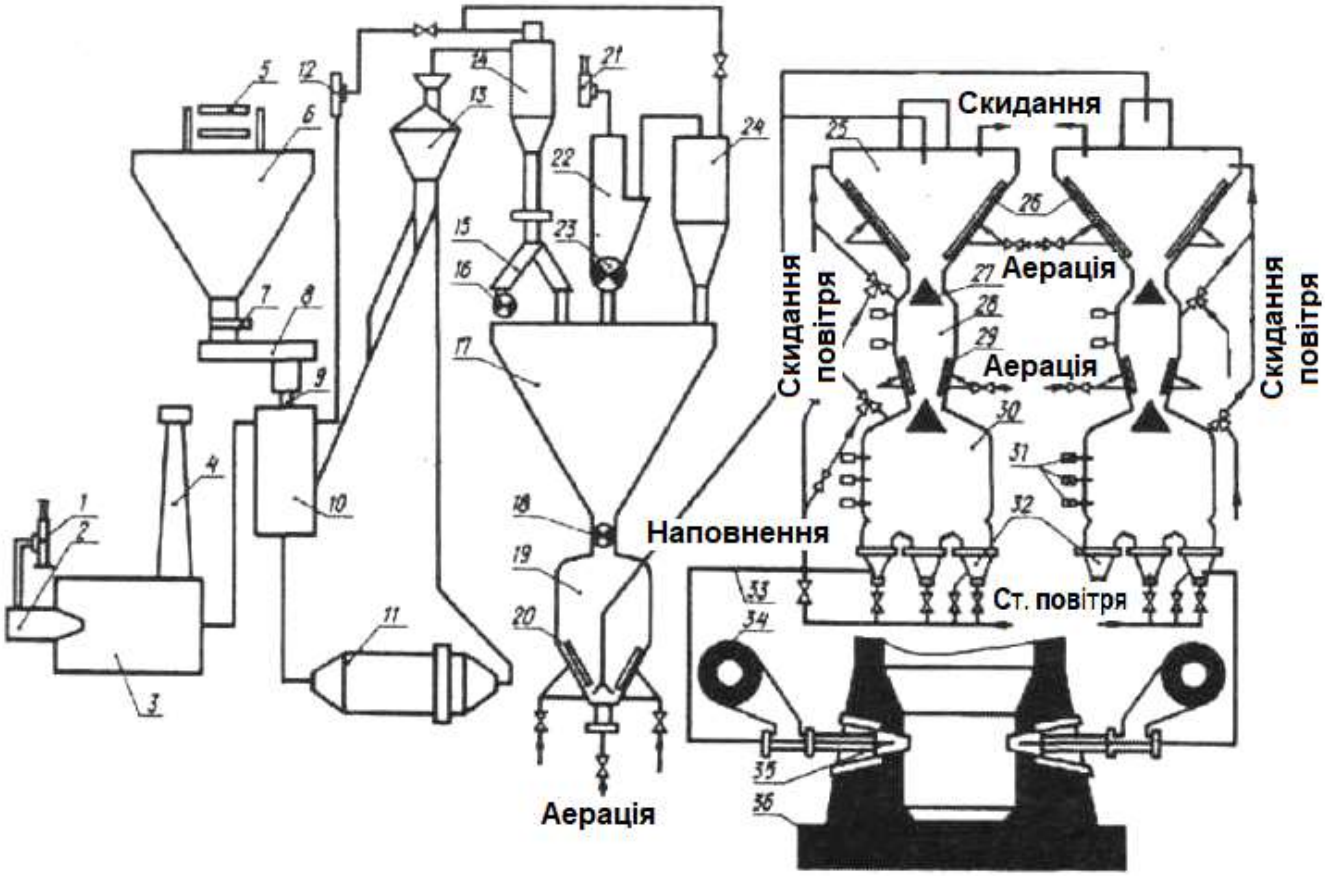
Пилоподібне вугілля, що надходить із установки сушки та помелу, спочатку накопичується, а потім подається у дуттєві фурми доменної печі №5 через установки впорскування пиловугільного палива (ВПУ). Конструкція та принцип роботи цих установок мають такі ключові особливості:

- Пилоподібне вугілля, яке подається з рукавного фільтра установки сушки та помелу, завантажується у спеціальні силоси, тоді як газ, забруднений вугільним пилом, відводиться через верхній фільтр силосу.

- Для запобігання закупорці сопел у лініях вдування з вугільного пилу видаляється крупна фракція шляхом просіювання.

- Установки ВПУ оснащені трьома бункерами вдування для обслуговування доменної печі №5. Ці бункери виконують функції вагових та дуттєвих ємностей і працюють в середовищі, заповненому азотом.

- Бункери вдування з'єднані зі статичними розподільними пристроями, встановленими біля кожної доменної печі, за допомогою єдиного магістрального трубопроводу, через який пилоподібне вугілля транспортується пневматичним способом.



1 - вентилятор дутт'євий; 2 - пальник; 3 – топка; 4 – труба; 5 - конвеєр стрічковий; 6 – бункер сирого палива; 7 – шибер; 8 - живильник скребковий; 9 – тракт сирого вугілля; 10 - сушило; 11 - кульовий млин; 12 - димосос; 13 – сепаратор; 14 – циклон; 15 - клапан перекидний; 16 - гвинтовий конвеєр (шнек); 17 - бункер пилу; 18 - живильник шлюзової; 19 – пневмо-камерний насос; 20-аератор; 21-димосос; 22-рукавний фільтр; 23 - конвеєр гвинтовий; 24 - циклон; 25 – бункер запасу; 26 та 29 - аератори; 27 - клапан конічний; 28 - проміжний резервуар; 30 – поживний резервуар; 31 - рівнеміри; 32 - живильник аераційний; 33 - пилопровід; 34 - фурмений прилад; 35 - влаштування введення палива в доменну піч; 36 - горн доменної печі.

Рисунок 3.9 – Схема промислової установки для приготування і вдування ПВП в горн доменної печі

- Кожна фурма з'єднана зі статичним розподільним пристроєм через окрему лінію.

- Запропонована система подачі пилоподібного вугілля забезпечує транспорт вугільного пилу зі швидкістю 2-4 м/сек, при цьому коефіцієнт навантаження транспортуючого газу становить 40-60 кг вугільного пилу на кг газу, що залежить від рівня тиску в резервуарах дуття.

- Запропонована установка подачі пилоподібного вугілля підходить для роботи з вугільним пилом, у якого 80% часток мають розмір менш ніж 90 мікрон, а залишкова вологість не перевищує 1,5%.

За високих швидкостей вдування та залежно від типу вугілля температура полум'я знижується. Для підтримання теоретичної температури, наприклад, на постійному рівні 2150°C, необхідно додавати кисень. Як правило, кисень подається разом із холодним дуттям. Для кращого займання та ефективнішого вигорання частина O_2 постачається через коаксіальну систему сопел. Кисень, що подається через кільцевий зазор коаксіальних сопел, дозволяє зменшити збагачення O_2 у холодному дутті без збільшення загального споживання кисню. Таким чином, загальна потреба в збагаченні киснем залишається на попередньому рівні при використанні киснево-вугільної технології.

Завдяки застосуванню киснево-вугільної технології з коаксіальними соплами швидкість вдування може бути збільшена щонайменше на 20 кг пиловугільного палива на тонну чавуну порівняно зі збагаченням киснем лише холодного дуття.

3.2.7 Компоненти установки ВПУ: складування вугілля і вдування пилоподібного вугілля

Складування вугілля

Пиловидне вугілля подається в систему вдування із бункера-силосу. Його ефективний об’єм становить 1,4 від необхідної кількості пиловидного вугілля для переходу доменної печі на режим роботи виключно на коксі у разі зупинки подачі вугілля з установки помелу та сушки. Це дозволяє забезпечити 8-годинну роботу при продуктивності 150 кг пилу на тонну чавуну.

Силос являє собою зварну конструкцію, що складається з циліндричної та конусоподібної секцій, плоского даху та трьох асиметричних вихідних отворів. Конус має кут нахилу 70°. Три виходи обладнані плоскими механізмами затвора з ручним керуванням. Розвантаження вугілля здійснюється через три поворотні клапани. Цей процес супроводжується періодичним продуванням інертного газу через флюїдизаційні пластини, які встановлені в конічній частині силосу.

Плоский верхній дах одночасно слугує обслуговувальною платформою та основою для встановлення рукавного фільтра, засувок, трубопроводів, вимірювальних приладів та іншого обладнання.

Силос обладнаний двома низькоточними манометрами, що дозволяють контролювати рівень заповнення і спустошення. Система контролю і безпеки включає два індикатори максимального заповнення для запобігання переповненню, пристрої для вимірювання рівнів кисню та чадного газу для моніторингу інертності середовища, а також засоби вимірювання тиску.

Експлуатація силосу здійснюється в інертному середовищі. У разі перевищення гранично допустимих параметрів в силос подається азот до стабілізації показників у рамках норми. Надлишковий тиск, який виникає під час скидання тиску з камер вдування, стравлюється через фільтр, розташований у верхній частині силосу. Крім того, механічний запобіжний клапан захищає конструкцію від перевищення тиску або появи вакууму, що може виникати, наприклад, унаслідок температурних коливань. Захисні функції продовжують діяти без зупинки роботи навіть у разі перевищення встановлених меж.

Для запобігання утворенню конденсату залишкової водяної пари, яка виділяється з пиловидного вугілля, і як захист від термічних впливів рекомендується додатково підігрівати конічну частину конструкції.

Параметри стану флюїдизації пиловидного вугілля під час його розвантаження через фільтр зазвичай становлять від 0,2 до 0,3 кг/м³. У процесі роботи разом із пиловидним вугіллям у силос потрапляє деяка частина "вологого сушильного газу" з установки помелу і сушки. Оскільки сушильний газ містить водяну пару, то у випадку зниження температури силосу нижче точки роси може відбутися утворення конденсату. Це може призвести до формування мокрого

"вугільного грануляту" через осідання водяних крапель з внутрішньої поверхні даху. Щоб цього уникнути, у силос подається певна кількість гарячого сушильного газу. Це очищує атмосферу всередині силосу, зменшує вологість, підвищує температуру стінок і внутрішньої частини незаповненого силосу, запобігаючи процесам конденсації.

Вдування пилоподібного вугілля

Кількість ємностей для вдування, ліній подачі та розподільних пристроїв залежить від продуктивності доменної печі. Якщо продуктивність становить до 5500 ± т гарячого металу, використовуються дві ємності для вдування; при вищій продуктивності – три ємності з двома магістральними лініями.

Пилоподібне вугілля, яке використовується для вдування в доменну піч, завантажується партіями з силосу. Між силосом і трьома ємкостями для вдування встановлені три механічні сита. Вони відокремлюють великі частки, сторонні включення та агломерати, які можуть перешкоджати подачі вугільного пилу через лінії вдування. Непридатний матеріал скидається по жолобу у змінний контейнер, розташований на рівні підлоги, що дозволяє уникнути блокування ліній.

Після клапанів зниження тиску в магістралі встановлено вентилятор, що підтримує і збільшує подачу вугілля, яке проходить через сито на шляху до ємностей для вдування. Вугілля потрапляє до трьох ємностей почергово. У кожній із них воно зважується за умов атмосферного тиску, герметизується азотом, а потім безперервно флюїдизується і подається в лінії транспортування до розподільного пристрою та далі в доменну піч.

Вага вимірюється для різних цілей. Зважування при атмосферному тиску слугує для визначення кількості завантаженого вугілля, тоді як сигнал про вагу під час роботи використовується для забезпечення контролю процесу вдування.

Ємність для вдування має зварну конструкцію з циліндричним і конічним сегментами, герметичну верхню кришку та флюїдизаційну камеру знизу. Вона обладнана оглядовим люком та фланцями для підключення до подаючих ліній, клапанів і вимірювальних пристроїв. Є також елементи герметизації із спеченого металу, що виконують роль псевдозріджувача й ущільнювального вузла.

Кожна ємність оснащена високоточними приладами вимірювання, включаючи систему зважування, перемикач максимального рівня наповнення, прилади для вимірювання тиску та швидкості потоку псевдозрідженого газу.

Дві магістральні лінії однакового діаметра, що йдуть від кожної ємності для вдування, об'єднуються на території будівлі. Звідти вони спрямовуються до двох статичних розподільних пристроїв, які знаходяться безпосередньо біля доменної печі.

Піч завантажується пилоподібним вугіллям симетрично в будь-якому випадку, оскільки другий розподільний пристрій з'єднаний з кожною другою фурмою. Швидкість потоку пиловугілля в магістральних трубопроводах попередньо вимірюється за допомогою системи контролю потоку матеріалу та регулюється керамічними засувками відповідно до встановлених параметрів. Отримані дані щодо швидкості потоку вугілля коригуються ваговою системою ємностей для вдування. Транспортування матеріалу через магістральну лінію пневматичним способом відстежується як за допомогою системи виміру потоку, так і пристроїв контролю тиску, розташованих безпосередньо перед розподільними пристроями.

Конструктивно розподільний пристрій є статичним, забезпечуючи низький опір потоку та однакові параметри на кожному з виходів. У ньому відсутні швидкозношувані деталі. Від розподільного пристрою труби ведуть до сопел фурм, а рівномірний потік матеріалу на кожне сопло досягається завдяки встановленню статичних дросельних заслінок після розподільного пристрою. Дані заслінки компенсують різницю у втраті тиску, спричинену різною довжиною трубопроводів між розподільником і фурмами.

Система дозволяє припиняти подачу вугілля на кожній окремій лінії без впливу на загальний процес. У разі зупинки лінія автоматично промивається азотом для охолодження сопла вдування, змонтованого на фурменому рукаві. Загальний обсяг подачі при цьому не змінюється, а потік рівномірно перерозподіляється між іншими лініями.

Контроль потоку вугілля на кожній лінії здійснюється за допомогою індикаторів, розташованих після дросельних засувок. Якщо на якійсь ділянці потік

відсутній, система автоматично перекриває трубу й очищає її охолоджувальним газом від точки вдування до сопла.

У випадках перебоїв чи повного припинення подачі матеріалу по магістральних трубах, відповідна ділянка виводиться з роботи та очищається азотом у напрямку до доменної печі. Якщо очищення не можливе в цьому напрямку, труба промивається азотом у протилежному напрямку — від статичного розподільного пристрою в зворотний бік. Усі процеси продувки виконуються автоматично.

За необхідності аварійного припинення вдування весь процес зупиняється на рівні розподільного пристрою. Усі трубопроводи до фурм очищаються азотом у напрямку до печі, тоді як магістральні лінії продуваються у зворотному напрямку.

Якщо подача дуття в доменну піч знижується нижче заданого значення (наприклад, під час проведення перевірки), подача пилоподібного вугілля негайно припиняється. Це необхідно для повного звільнення системи дуття та фурм від залишків пального. У разі тимчасового зниження потоку дуття (10–20 хвилин), після стабілізації параметрів подачу відновлюють за попередніми значеннями швидкості. Якщо зниження триває довше, магістраль очищається азотом у напрямку до силосу.

У таблиці нижче наведені показники подачі пилоподібного вугілля в доменну піч №5.

3.2.8 Розмольно - сушильна установка

Дрібне вугілля для вдування виготовляється в розмольно-сушильній установці, яка включає в себе розмольно-сушильну лінію з камерою згоряння для генерування теплової енергії. До її складу входять млини для помелу вугілля, фільтр для відокремлення вугільного пилу, а також система управління технологічним процесом із вимірювальними та регуляторними приладами. Якщо у ролі горючого газу використовується доменний газ, доцільно передбачити встановлення конденсатора для підвищення ефективності сушіння. Як альтернатива, можна використовувати куперні відхідні гази як джерело

сушильного газу, що дозволяє задіяти теплові ресурси куперного процесу та уникати викидів у навколишнє середовище. Для запобігання вибухам розмольно-сушильні установки проєктують як інертні.

Висушене і подрібнене вугілля безпосередньо транспортується із силосу до установки для вдування. Щоб запобігти конденсації водяної пари в силосному резервуарі та ланцюговому конвеєрі, туди постачається сушильний газ. У разі, якщо розмольно-сушильна установка та установка для вдування вугілля розташовані в різних будівлях, міжцехове транспортування організовується або пневматичним способом, або за допомогою автоцистерн.

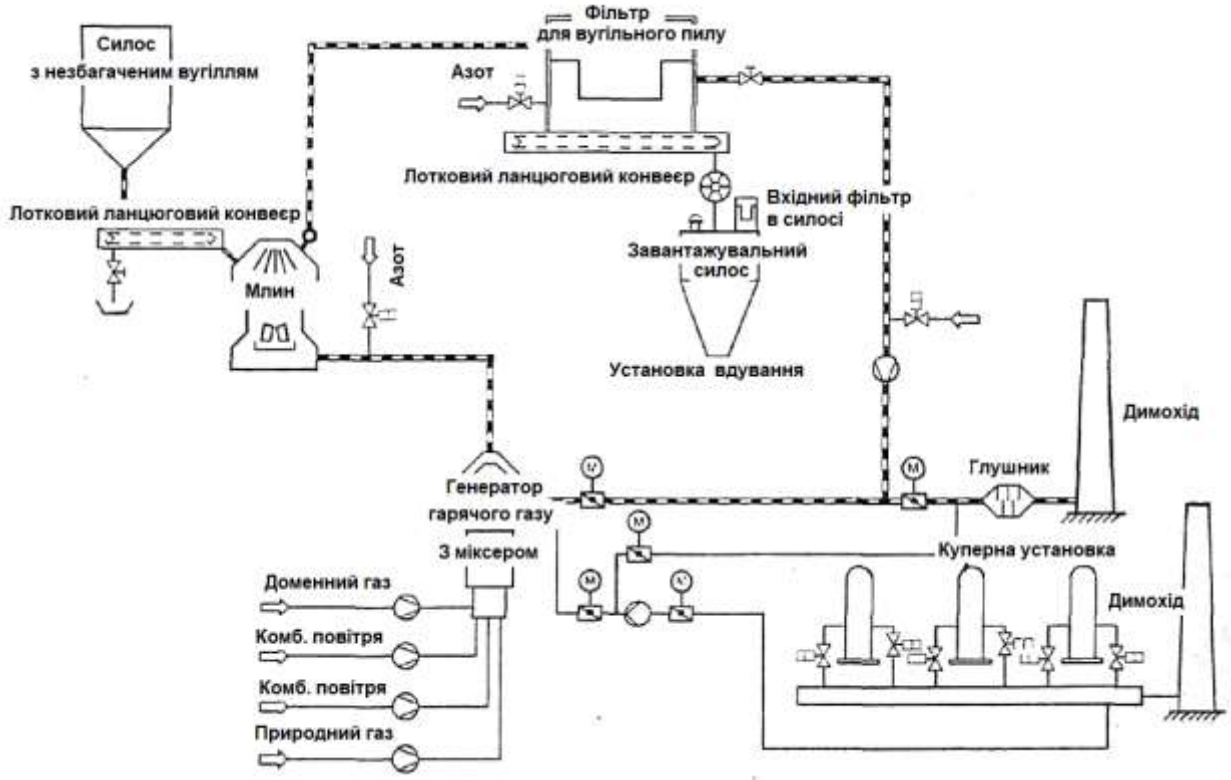


Рисунок 3.10 – Схема розмольно-сушильної установки

Вугілля, що надходить через систему транспортування, переробляється у вугільний пил за допомогою двох установок для помелу і сушки.

Конструкція цих установок і принципи їхнього управління передбачають наступне: вугільна сировина вивантажується з бункера та транспортується до млина по газонепроникному ланцюговому конвеєру, швидкість якого можна регулювати. Зміна швидкості подачі конвеєра дозволяє відповідно коригувати продуктивність процесу помелу та сушки.

Таблиця 3.1 - Показники вдування пиловугільного палива в ДП №5

Показники	Значення	Одиниці виміру
Мінімальна швидкість вдування	50	кг/т чавуну
Нормальна швидкість вдування	≥150	кг/т чавуну
Проектна швидкість вдування	200	кг/т чавуну
Мінімальна кількість вдуваного вугілля	154	т/добу
Нормальна кількість вдуваного вугілля	≥462	т/добу
Планована кількість вдуваного вугілля	≥616	т/добу
Об'єм силосу пилоподібного вугілля	1000	$м^3$
Ємкість по вазі	650	т
Подача при 180 кг/т чавуну рівень заповнення 75%	≈8	год
Кількість ємностей вдування	3	-
Кожна ємкість вдування по	30	$м^3$
Кількість магістральних ліній і розподіляючих пристроїв	1	-
Довжина магістральної лінії	250	м
Об'ємна щільність використовуваного вугілля	0,5	$т/м^3$
Поверхнева вологість вугілля	1,0	%
Гранулометричний склад вугілля	80%<90	мікрон
Приблизне споживання азоту:	55	$нм^3$/т вугілля
для транспортування вугілля (у ДП №5)	25	$нм^3$/т вугілля
Для інших цілей ВПУ	30	$нм^3$/т вугілля
Проектна швидкість потоку №2 при швидкості вдування 200 кг/т чавуну, прибл.	3300	$нм^3$/год

3.2.9 Вертикальний млин

Вугільна сировина надходить у верхню частину млина, де спочатку проходить через вбудований статично-динамічний сортувальний пристрій, а потім спрямовується на центральну частину дробильної тарілки. Ця тарілка являє собою горизонтальний диск, що постійно обертається. Під впливом відцентрових сил вугілля переміщується до краю тарілки, де воно подрібнюється між дробильною тарілкою та вертикальними валками. Обертання тарілки забезпечується основним двигуном через головний привід. Валки встановлені у корпусі млина і приводяться

до обертання взаємодією з шаром вугілля, яке проходить між ними і тарілкою. Самі валки обертаються вільно.

Подрібнене вугілля падає з краю дробильної тарілки, підхоплюється гарячим сушильним газом у зоні соплового кільця й переноситься до статичного сортувального пристрою, розташованого вгорі млина. Крупні частинки вилучаються з газового потоку й повертаються на центральну частину тари. При цьому сушильний газ разом із дрібними вугільними частинками виводяться через сортувальний пристрій.

Валки притискаються до шару вугілля за допомогою гідропневматичних механізмів, які отримують силу з гідравлічної станції. Тиск, що передається через валки на шар вугілля, може регулюватися залежно від необхідної пропускної спроможності млина.

Гранулометричний склад отриманого вугільного пилу визначається положенням лопаток сортувального пристрою та швидкістю потоку сушильного газу, що проходить через них. Регулювання положення лопаток дозволяє змінювати гранулометричний склад кінцевого продукту. Максимальна пропускна здатність млина залишається стабільною для визначеного індексу Хардгрова (характеристика розмелюваності вугілля) за умови досягнення необхідного рівня гранулометрії (наприклад, 80% < 90 мікрон) та вологозмісту. При вищому індексі Хардгрова (кращій розмелюваності) і менш вимогливому гранулометричному складі можливе збільшення пропускної здатності млина.

Для захисту від зносу дробильна тарілка, валки та частково корпус млина оснащені футеровкою. У шахту головного приводу дробильної тарілки подається ізолюючий газ, який також подається до валків за допомогою нагнітача, що забезпечує їхню додаткову безпеку.

Після виходу з сортувального пристрою сушильний газ транспортує утворений пилоподібний вугільний продукт через трубопровід до рукавного фільтра. Там вугільний пил відділяється від газового потоку та осідає в нижній частині корпусу фільтра, звідки він видаляється за допомогою скребкового конвеєра або шнека і спускається на лопатеві затвори. Згодом вугілля

безпосередньо подається у вугільні силоси. Лопатеві затвори також компенсують різницю тиску між рукавним фільтром і силосами для зберігання вугілля.

Рукавний фільтр складається з ряду рукавних камер, у яких рукави періодично очищають нагрітим під тиском азотом. Завдяки підвищенню температури газу вдається запобігти проблемі конденсації, що могла б виникнути через охолодження газу під час розширення і вміст пари в сушильному газі. Корпус рукавного фільтра ретельно ізольований, а його конічна секція додатково обігрівається за допомогою електричної теплотраси. Така теплова ізоляція разом із локальним нагріванням унеможливлює утворення конденсату водяної пари з сушильного газу, запобігаючи тим самим корозії.

Разом із подрібненим пилоподібним вугіллям з фільтра виділяється певна кількість вологого сушильного газу, який надходить до силосу для зберігання вугільного пилу. Через вміст водяної пари в сушильному газі можливе утворення конденсату, якщо температура в силосі опускається нижче точки роси. Для уникнення цього до силосу подається необхідна кількість гарячого газу, забраного безпосередньо з печі. Це дозволяє знизити вміст водяної пари, підвищити температуру стінок силосу та підтримувати достатню температуру газу у верхній частині силосу, яка залишається незаповненою вугільним пилом.

Подача тепла в млин

Швидкість потоку сушильного газу, який подається до млина, і його температура визначаються необхідною кількістю теплової енергії для випаровування вологи з вугільної сировини. Температура газу на вході в млин обмежується вимогами безпеки, щоб запобігти небажаним реакціям вугілля та пошкодженню обладнання.

Сушильний газ, переважно, формується із гарячого газу, що виходить з печі. У випадках, коли температура цього газу є нижчою, ніж потрібна, враховуючи реальну продуктивність млина та вологість сировини, проводиться її підвищення. Це досягається шляхом автоматичного змішування гарячого пічного газу з гарячими димовими газами, які утворюються в процесі роботи доменної печі. Як наслідок, відновлюється необхідний температурний баланс.

Якщо ж рівень температури гарячого пічного газу є вищим за необхідний з огляду на продуктивність і вологість сировини, температуру газу регулюють шляхом змішування його з рециркуляційним «холодним» вихідним газом. Таким чином забезпечується відповідність вимогам щодо температурного режиму.

Процес змішування здійснюється у спеціальній камері змішувача, яка розташована на виході з газогенератора. Газогенератор включає систему комбінованих пальників для спалювання природного газу, коксового газу та колошникового газу, камеру згоряння і згадану камеру змішувача. Конструкція пальників передбачає наявність клапанів та труб для подачі спалюваного газу й повітря, запалювального пристрою, системи моніторингу полум’я та приладів контролю. Повітря для горіння подається нагнітачем. Природний або коксовий газ використовується для розпалювання і стабілізації полум'я в ситуаціях, коли теплотворна здатність колошникового газу є недостатньою.

Генератор гарячого газу розроблений із врахуванням максимальної продуктивності процесів помелу та сушки вугілля за умови температури вихідного газу 150°C. Якщо гарячий пічний газ недоступний або вміст кисню у ньому перевищує допустимі значення, генерація гарячого газу перемикається виключно на колошниковий газ. У такому випадку температура регулюється шляхом змішування із холодним рециркуляційним газом. Однак цей режим має часові обмеження до кількох годин через ризик конденсації та корозії, пов’язаних із високою точкою роси сушильних газів у поєднанні з їхнім вмістом сірки.

Температура газу на виході з млина може відрізнятися від заданої залежно від фактичної швидкості подачі вугілля у млин та його вологості. Водночас граничне значення температури на виході обмежується лише технічними можливостями обладнання витримувати теплове навантаження.

Головний нагнітач установки помелу та сушки, розташований після рукавного фільтра (зазвичай на першому поверсі), забезпечує перекачування сушильного газу через млин, статичний сортувальний пристрій і рукавний фільтр. Регулювання швидкості потоку сушильного газу, який проходить через головний вентилятор, виконується за допомогою зміни положення напрямних лопатей вхідного пневморозподільника.

Відпрацьований сушильний газ після проходження рукавного фільтра всмоктується головним вентилятором і або випускається в димар, або частково повертається в камеру змішувача, розташовану перед млином, якщо температура гарячого газу, що подається в млин, перевищує допустиму.

Гарячий відпрацьований газ подається до установки для помелу та сушки головним вентилятором відпрацьованого газу, який засмоктує гарячий потік з пічних установок і спрямовує його в камеру змішувача. Швидкість потоку такого газу можна регулювати через зміну положення напрямних лопатей пневморозподільника, встановленого перед вентилятором. Зазвичай швидкість потоку дещо перевищує необхідну норму, тому зайвий об'єм газу випускається в димар.

Контроль за вмістом CO та O_2 у гарячому газі здійснюється за допомогою вимірювань біля печей і після нагнітача гарячого газу. Якщо рівень CO чи O_2 перевищує допустимі межі, газ автоматично випускається в димар, доки показники не повернуться до допустимого рівня. У цей період теплова енергія для сушіння генерується виключно за рахунок колошникового газу, а температура регулюється шляхом змішування з рециркуляційним холодним сушильним газом. У таких умовах швидкість подрібнення автоматично зменшується відповідно до максимальної швидкості потоку колошникового газу. Тривалість цього режиму роботи регламентована.

Трубопроводи, через які транспортується гарячий газ, оснащені теплоізоляцією для зменшення тепловтрат, уникнення конденсації водяної пари та забезпечення безпечних умов експлуатації, особливо на ділянках, де проходить сушильний газ після млина.

3.2.10 Особливості роботи установки ВПУ

Проектна потужність установки для помелу та сушки вугілля розраховується з урахуванням розмелюваності вугільної сировини, її вологості та гранулометричного складу пилоподібного вугілля. Фактична продуктивність може перевищувати проектну, якщо вугільна сировина має кращу розмелюваність або

більш грубозернистий склад пилу за умови дотримання проектних характеристик вологості сировини.

Перед початком роботи установки контур сушильного газу інертізується шляхом подачі азоту в кілька точок при ввімкненому головному нагнітачі. Вдування азоту триває, доки рівень кисню в контурі не знизиться до встановленого мінімального значення. Після цього газовий контур поступово нагрівають, використовуючи гарячий газ із печей, який подається зі зниженою швидкістю потоку. Процес підігріву триває до досягнення мінімальної температури, яка вимірюється після фільтра газового контуру. Установку підтримують у цьому стані до початку процесу помелу, що називається "режим підтримки теплої роботи".

Коли стартує помел, вугільна сировина подається з мінімальною швидкістю, а всі контрольні системи працюють у повному обсязі. Якщо температура після млина стабілізується на потрібному рівні, швидкість подачі вугільної сировини поступово збільшується до встановленого значення. Це значення може варіюватися в межах заданого діапазону продуктивності, а швидкість конвеєра регулюється відповідно до встановлених параметрів. У випадку зниження тиску в млині та розподільних пристроях нижче критичної позначки система автоматично зменшує швидкість подачі сировини, коригуючи роботу конвеєра. Відновлення збільшеної швидкості подачі після нормалізації тиску здійснюється вручну оператором.

Якщо теплотворність пічного газу перевищує необхідний рівень для процесу сушки, частина охолодженого газу повертається в систему для регулювання температури на виході з млина. У разі недостатньої теплотворності пічного газу і зниження температури на виході з печі до недопустимого рівня активується пальник колошникового газу доменної печі, що забезпечує додаткове тепло шляхом спалювання цього газу. Швидкість потоку газу за млином підтримується постійною. Якщо до газового контуру додаються гази від спалювання колошникового газу, то швидкість гарячого пічного газу автоматично зменшується. Завдяки даній системі забезпечується підтримання максимально можливого потоку гарячого пічного газу, що відходить.

Елементи регулювання замкнутого циклу в контурі сушильного газу передбачають виконання таких завдань:

- забезпечення постійної швидкості потоку сушильного газу відповідно до заданих параметрів шляхом коригування положення вхідних напрямних лопатей контрольної засувки;

- підтримання тиску сушильного газу на вході до млина на потрібному рівні через коригування контрольної засувки перед димарем;

- регулювання температури на виході з млина згідно із заданим значенням шляхом зміни кількості гарячого пічного газу, що подається у систему, і перерозподілу між ним та охолодженим рециркуляційним газом;

- стабілізація температури на виході з млина через регулювання обсягу доменного газу, що спалюється, для його змішування з «холодним» або «надто холодним» відведеним гарячим газом. Це необхідно, якщо температура в системі перевищує необхідний рівень та задіяна рециркуляція сушильного газу;

- контроль вмісту кисню в димовому газі, який утворюється під час спалювання колошникового газу доменних печей, з урахуванням змін його теплотворної здатності. Це досягається шляхом регулювання швидкості потоку повітря, що використовується для горіння.

Рівень залишкової вологості пилоподібного вугілля визначається температурою сушильного газу після млина. Для забезпечення стабільності параметрів температура цього газу підтримується на стабільному заданому рівні. Вміст водяної пари в сушильному газі після млина є безпосередньо пов'язаний із залишковою вологістю пилоподібного вугілля. Максимальне зменшення концентрації водяної пари можливе за умови низької температури точки роси сушильного газу.

Однією з фундаментальних умов досягнення стабільного рівня залишкової вологості вугілля є підтримання стабільної температури після млина. Обсяги тепла, необхідного для сушіння, визначаються як кількістю, так і початковою вологістю вугільної сировини. Оскільки ці параметри змінюються, система потребує забезпечення адекватного теплового балансу. Завдяки технологічному контролю температура після млина підтримується на постійному рівні, що дозволяє своєчасно подавати необхідну кількість тепла для сушіння.

Температура газу на вході в млин залежить від фактичної продуктивності, вологості вугільної сировини та заданого рівня температури на виході за умови сталої швидкості потоку газу. Це значення є динамічним. Основний обсяг процесу сушки відбувається безпосередньо всередині млина.

Гранулометричний склад пиловидного вугілля визначається швидкістю потоку сушильного газу через сортувальний пристрій та позицією лопаток. Для збереження сталості гранулометричного складу не допускається зміна умов проходження газу через статичний сортувальний пристрій. Через змінне теплове навантаження утворюються різні обсяги пари, що переходять у сушильний газ. Завдяки регулюванню швидкості потоку відпрацьованого сушильного газу після фільтра забезпечується стабільність умов потоку.

Для підтримання сталих характеристик пиловидного вугілля температура сушильного газу, виміряна після млина, а також температура газу після фільтра повинні залишатися постійними. Щоб запобігти надмірному надходженню повітря до контуру, рівень тиску сушильного газу утримується близьким до атмосферного на вході до млина.

Запуск установки для помелу та сушки вугілля можливий лише за умови, що рівень заповнення бункера вугільною сировиною перевищує мінімальний допустимий рівень. Для безпечного зупинення роботи установки спочатку припиняють подачу вугільної сировини, спорожняють млин і рукавні фільтри, при цьому контур сушильного газу залишається працюючим. Гарячий газ подається до контуру з контрольованою зменшеною швидкістю потоку, аби уникнути різкого охолодження установки та наступного конденсування водяної пари.

Підтримання теплого стану має тривати до повного завершення розмелювання вугілля. Режим "теплої роботи" слід зберігати, якщо немає необхідності його завершення. Кожен цикл нагрівання або охолодження перетинає точку роси, що може спричинити корозію через наявність агресивних сполук сірки або хлору в нагрітому газі. Тому варто уникати охолодження системи без важливої на те потреби.

Наведені дані щодо найкращих установок для вдування пиловугільного палива:

- період окупності — 48 місяців;

- дисконтований період окупності (BPB) — 55 місяців;

- середня норма рентабельності (ARR) — 36,6%;

- внутрішня норма рентабельності (IRR) — 33,8%; - чистий приведений дохід (NPV) — 564,4 млн грн.

За досвідом ДП №2 ПрАТ «ДМЗ» застосування пиловугільного палива з витратою до 200 кг/т дозволяє знизити собівартість виробництва чавуну на 42 грн/т.

Впровадження технології вдування пиловугільного палива забезпечує:

- економію природного газу в обсязі 336 млн м³ на рік;

- зниження витрат металургійного коксу на 331 тис. тонн на рік;

- загальне зменшення собівартості вироблюваної продукції.

Простий та дисконтований терміни окупності проєкту розраховані від початку періоду планування і охоплюють 19 місяців будівництва.

Комплекс для вдування пиловугільного палива на доменні печі №2–5 включатиме будівництво таких об'єктів:

- установку для підготовки та вдування пиловугільного палива через повітряні фурми в горн доменних печей;

- розподільні пристрої;

- компресорну станцію;

- майданчик ресиверів азоту;

- приймальний пристрій для вугілля;

- вузол грохочення вугілля;

- конвеєрний транспорт для подачі вугілля до установки підготовки та вдування пиловугільного палива;

- систему пневмотранспорту для доставки пиловугільного палива від установки до розподільної системи;

- трасу підведення кауперного газу до пиловугільного відділення;

- базисний склад вугілля;

- склади для піску, який буде використовуватися замість зношеного;

- експрес-лабораторію для контролю якості пиловугільного палива;

- побутові приміщення залізничного цеху доменного району.

Вдування пиловугільного палива в обсязі 150 кг на тонну чавуну дозволяє усунути необхідність використання технологічного природного газу та заощадити 365 тисяч тонн скіпового коксу на рік.

Вугільний пил вводиться у чотири доменні печі (№2–5), які мають корисний об’єм по 1513 м³ кожна.

За існуючих умов доменної плавки вдування вугільного пилу при стабільних параметрах дуття призводить до зниження температури у фурмених вогнищах горіння. Це, у свою чергу, може мати як позитивні, так і негативні наслідки: з одного боку, погіршення якості чавуну, а з іншого — зниження ступеня згоряння часток вугілля. Зважаючи на світовий досвід експлуатації доменних печей із застосуванням подібної технології, рекомендується забезпечувати підтримку теоретичної температури горіння на певному рівні, визначеному практикою під час тривалої роботи доменних печей за допомогою комбінованого дуття.

Для підтримання теоретичної температури горіння в межах оптимальних значень за чинних умов роботи доменного цеху можуть бути застосовані такі заходи:

- підвищення температури дуття;

- збагачення дуття киснем;

- регулювання рівня вологості дуття (зменшення або збільшення).

Технічний стан повітронагрівачів доменних печей дозволяє, за умови проведення відповідних ремонтів, забезпечувати температуру дуття у межах 1150–1200°C.

Результати роботи доменних печей до реконструкції та після впровадження технології вдування пиловугільного палива наведені у таблиці 3.2.

Використання пиловугільного палива у доменних печах № 2-5 в обсязі 150–200 кг на тонну чавуну дасть змогу повністю відмовитися від природного газу, що застосовувався у технологічних процесах. Це, своєю чергою, забезпечить економію 365–554 тисяч тонн скіпового коксу щороку.

Таблиця 3.2 - Показники роботи доменних печей № 2-5

Показники одиниця виміру	База з природним газом	Проєкт із застосуванням ПВП, кг/т·год	
		150	200
Сумарний об'єм печей, м.^{3}	6052	6052	6052
Продуктивність (гранична), тис.т/год	4500	4500	4500
тис.т/доб	12605	12605	12605
КВКО, м^3/т·доб	0,480	0,480	0,480
Витрата дуття з втратами (розрахунковий), м^3/т	1410	1280	1280
Витрата кисню, м^3/т	65	50	65
Вміст кисню в дутті, %	25	24	25
Температура дуття, ºС	1150-1200	1150-1200	1150-1200
Вміст вологи в дутті, %	1	2,5	3,0
Витрата коксу (сухого, скіпового), т/т	0470	0,389	0,384
Витрата коксу вологого бункерного	0,516	0,431	0,394
Витрата вугільного пилу, т/т	-	150	200
тис.т/рік	-	675	900
т/год	-	79	105
Витрата природного газу, м^3/т	120	-	-
тис.м^3/год	63	-	-
млн.м^3/рік	540	-	-

3.3 Рекомендації по впровадженню ПВП

Застосування пиловугільного палива потребує реалізації комплексу технологічних і організаційних заходів для нейтралізації негативного впливу на газопроникність шихти, зменшення змін температурно-окислювального потенціалу горна і збільшення тривалості перебування коксу в печі.

Основними заходами для досягнення цих цілей є:

1. Поліпшення якості коксу:

- підвищення гарячої міцності CSR до не менше 62%;

- зниження реакційної здатності CRI до максимум 23%;

- зменшення кількості золи до 8%;

- зниження вмісту сірки до 0,9%;

- зменшення концентрації лугів до 0,2%.

2. Підвищення характеристик агломерату:

- зменшення вмісту дрібних фракцій в агломераті до 5%;

- розширення площі спікання агломашин, оснащення їх обладнанням для охолодження, дроблення та сортування агломерату;

- встановлення пристроїв для відсіву дрібних частинок агломерату перед завантаженням у скіп доменної печі;

- обладнання аглоцеху механізованими засобами для відбору, обробки та аналізу проб агломерату;

- мінімізація коливань вмісту заліза в агломераті до ±0,2% та основності до ±0,05 одиниць за допомогою технічних і організаційних заходів.

3. Модернізація повітронагрівачів для забезпечення підвищення температури дуття до 1200°C.

4. Збільшення рівня кисню в дутті до 27%.

5. Зменшення виходу шлаку на тонну чавуну до 350–370 кг/т шляхом використання в аглошихті аглоруди високої якості та концентратів.

6. Додавання в залізорудну шихту коксового горішка у кількості 30–50 кг/т чавуну.

7. Введення кускового залізняку розміром 10–32 мм у кількості 50–100 кг/т чавуну.

8. Зниження основності шлаку (CaO/SiO_2) до 1,20±0,05 при мінімізації надходження сірки із шихтою до 5–6 кг/т чавуну.

9. Реалізація комплексу заходів для оптимізації та стабілізації технологічного процесу, що забезпечить його ефективність і передбачуваність.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

Значного підвищення безпеки виробничих процесів та експлуатації обладнання в чорній металургії можливо досягти через впровадження комплексних заходів. Ці заходи передбачають не лише застосування нових, більш безпечних технологій, але й автоматизацію й механізацію процесів, а також оснащення обладнання засобами захисту працівників від впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів.

Конституція України визначає людину, її життя, здоров’я і безпеку як найвищу соціальну цінність (стаття 3). У статті 43 гарантується не лише право на працю, а й право на безпечні умови праці. Крім того, стаття 49 підтверджує право кожного громадянина України на охорону здоров’я, медичну допомогу та страхування. Ці положення Конституції формують основу для розгляду охорони праці як інтегрованої державної системи, що охоплює взаємодію "людина – виробництво – трудова діяльність – зовнішнє середовище". Для реалізації цих принципів уряд України впроваджує низку організаційних заходів: у 1993 і 1998 роках Кабінет Міністрів України видав постанови, які стосуються охорони праці.

У цьому розділі роботи проаналізовано основні шкідливі й небезпечні виробничі чинники на етапі підготовки пиловугільного палива. Розроблено заходи з їх усунення, обрано засоби індивідуального захисту для обслуговуючого персоналу даної ділянки, а також забезпечено необхідні побутові та допоміжні приміщення. Визначено ширину санітарно-захисної зони для ПАТ «Запоріжсталь», розроблені заходи пожежної профілактики для зазначеного приміщення. Окрім того, здійснено розрахунки захисного заземлення та аналіз рівня шуму.

4.1 Вибір і характеристика майданчика ділянки підготовки пиловугільного палива ПАТ «Запоріжсталь»

Ділянка підготовки пиловугільного палива призначена для розмелювання та сушіння сирого вугілля, а також його транспортування до доменної печі, де здійснюється подача паливного матеріалу. Ця ділянка розташована на території

доменного цеху, що є ключовим підрозділом металургійного комбінату ПАТ «Запоріжсталь».

Відповідно до санітарно-гігієнічних норм СН 245-71, підприємство ПАТ «Запоріжсталь» належить до першого класу за ступенем впливу на навколишнє середовище. Через це встановлено, що ширина санітарно-захисної зони для даного підприємства має складати 1000 метрів.

4.2 Основні шкідливі і небезпечні фактори на ділянці підготовки пиловугільного палива

Шкідливі виробничі чинники — це ті фактори, вплив яких у певних умовах на працюючих може призводити до професійних захворювань або зниження працездатності.

Вони класифікуються за характером впливу на організм людини наступним чином:

- хімічні (токсичні речовини, подразнюючі агенти, які впливають через дихальну систему, шкіру чи травний тракт);
- фізичні (шум, вібрація);
- психофізичні (перевантаження та напруга в процесі праці).

На ділянках підготовки пиловугільного палива виділяють такі небезпечні шкідливі чинники: тепловиділення під час сушіння сирого вугілля; підвищена запиленість і шум у допоміжних приміщеннях базисного складу та приймального відділення вугілля; вібрація обладнання, зокрема віброгрохотів; ризик ураження електричним струмом.

Для покращення умов праці, зменшення ймовірності травматизму, а також дотримання вимог техніки безпеки та гігієнічних стандартів, передбачено такі заходи:

- встановлення систем опалення, аспірації та загальнообмінної припливно-витяжної вентиляції для підтримання належного мікроклімату й допустимого складу повітря в робочих зонах;
- використання технологічного обладнання з мінімальним рівнем шуму;

- забезпечення природного та штучного освітлення робочих місць відповідно до нормативів (СНіП II-4-79);

- застосування електроустаткування зі ступенем захисту оболонки, який відповідає категорії приміщень і зон (ОНТП 24-86 та ДНАОП 0.00-1.32-01);

- оснащення лабораторних приміщень системами автоматичної охоронної сигналізації.

Для забезпечення відповідних параметрів повітря робочої зони в допоміжних приміщеннях базисного складу та приймального відділення вугілля заплановано використання загальнообмінної приточно-витяжної вентиляції з механічним і природним впливом:

- Загальнообмінна механічна приточна та природно витяжна вентиляція, що працює за принципом підпору повітря — для електроприміщень базисного складу та приймального відділення вугілля.

- Для досягнення оптимальних параметрів повітря в приміщеннях із постійним перебуванням людей, таких як пости управління базисного складу та приймального відділення вугілля, а також у лабораторіях, передбачено кондиціонування повітря через спліт-системи кондиціонерів.

- Загальнообмінна механічна витяжна вентиляція та природна приточна вентиляція — для насосної станції системи гідрозмиву просипу.

- Загальнообмінна приточно-витяжна вентиляція з природним впливом — для допоміжних приміщень базисного складу і приймального відділення вугілля.

Рівень шуму на ділянці підготовки пиловугільного палива становить 83 дБ, що перевищує допустиму норму в 80 дБ згідно з ГОСТ 12.1.003-83. Для зменшення рівня шуму передбачені заходи:

- Монтаж шумоглушників.

- Установка відцентрових вентиляторів на спеціальних віброізоляторах.

- Під'єднання повітроводів до вентиляторів через гнучкі вставки.

- Розташування вентиляційного обладнання в ізольованих приміщеннях або за межами будівель.

На ділянці підготовки пиловугільного палива існує ризик ураження електричним струмом від електроустановок змінного струму частотою 50 Гц. Основні небезпечні виробничі фактори на об’єктах електропостачання включають:

- Наявність обладнання і установок, що перебувають під високою напругою і потребують спеціальних заходів безпеки під час експлуатації.

- Ризики пожежної небезпеки в електрокабельних спорудах і приміщеннях.

Заходи з захисту працівників від впливу небезпечних факторів передбачають такі дії:

- Розташування електроустановок у спеціальних приміщеннях і спорудах, доступ до яких мають лише кваліфіковані фахівці електротехнічного профілю.

- Установлення відкритих струмопровідних частин електрообладнання на недосяжній висоті або їх відгородження для виключення випадкового контакту.

- Застосування систем захисного заземлення та занулення електрообладнання відповідно до вимог стандарту ГОСТ 9323-79.

- Вирівнювання електричних потенціалів через підключення до заземлювальних магістралей металевих корпусів обладнання, трубопроводів і будівельних конструкцій.

- Використання як заземлювачів природних об'єктів, таких як фундаменти будівель, підкранові балки, металоконструкції споруд, каркаси щитків і розподільчих пристроїв, а також заздалегідь прокладених металевих смуг та кутової сталі.

- Організація пожежно-охоронної сигналізації та систем пожежогасіння.

- Упровадження швидкодіючих систем захисту, які забезпечують мінімальний час відключення пошкоджених електроустановок і мережевих ділянок.

- Обладнання електроустановок усіма необхідними засобами захисту.

- Проведення заходів із грозозахисту споруд згідно з чинними нормативними документами (РД 34.21.122-8).

У виробничій діяльності важливу роль відіграє мікроклімат, який складається з таких параметрів, як вологість, температура та швидкість руху повітря, що впливають на стан організму працівника. Основні показники

мікроклімату визначаються відповідно до норм, зазначених у ГОСТ 12.1.005-88. У таблиці 4.1 наведено рекомендації щодо параметрів мікроклімату для ділянки підготовки пиловугільного палива.

Таблиця 4.1 - Основні параметри мікроклімату на ділянці підготовки пиловугільного палива

Найменування приміщень	**Період року**					
	холодний			**теплий**		
	температура, ^{0}C	відносна вологість %	швидкість руху повітря, м/с	температура, ^{0}C	відносна вологість %	швидкість руху повітря, м/с
Електротехнічні приміщення, насосна (відсутність робочих	10	50-75	0,3	31	55	0,5
Пости управління базисного складу і приймального відділення вугілля	20±2	40-60	0,1	22+2	40-60	0,3
Санвузли, підсобні	16-18	50-75	0,1	31	50	0,2
Хімічна лабораторія	18	50-70	0,1	26	50	0,2

Належні метеорологічні умови та чисте повітря є важливою складовою для забезпечення високопродуктивної праці. У робочій зоні цеху під час виробничих процесів викидається значна кількість пилу, шкідливих парів і газів. Інформація про вміст цих шкідливих елементів у повітрі та їх гранично допустимі концентрації подана в таблиці 4.2.

Як свідчить аналіз, рівень концентрації пилу та шкідливих газів на ділянці підготовки пиловугільного палива перевищує допустимі норми і не відповідає чинним санітарним стандартам.

На цій ділянці використовують як природне, так і штучне освітлення, причому останнє реалізоване за допомогою ламп розжарювання. Нормування рівня освітленості здійснюється відповідно до положень СНиП II-4-79. Мінімальна величина освітленості визначається, враховуючи параметри зорової роботи, такі як

найменший розмір об’єкта для спостереження, контраст об’єкта з фоном та характеристика самого фону.

Таблиця 4.2 - Фактичні і гранично-допустимі концентрації шкідливих речовин на ділянці підготовки пиловугільного палива

Шкідлива речовина	Фактична концентрація мг/м^3	ГДК, мг/м^3	Клас небезпеки
Окисел вуглецю CO	12-16	20	IV
Сірчистий ангідрид SO_2	5,9	10	III
Оксиди азоту NO_X	1,5	5	III
Пил, що містить від 5 % до 10 % SO_2	3,1	4	III

На ділянці підготовки пиловугільного палива виконуються роботи V–VI розрядів, які передбачають грубу обробку з об’єктами розрізнення розміром понад 10 мм, а також загальне спостереження за ходом процесу. У таких умовах при використанні комбінованого освітлення рівень найменшої освітленості на робочих поверхнях повинен становити не менше 100 лк (відповідно до вимог для V розряду робіт). Фактична освітленість у цьому випадку знаходиться в межах 100–110 лк.

Для запобігання ураженню електричним струмом при можливому контакті з елементами обладнання, що опинилися під напругою, передбачено кілька заходів безпеки. Зокрема, установки захисного заземлення (розрахунки наведені нижче), використання захисних пристроїв, ізолюючих матеріалів та покриттів. Під час роботи з переносним електроінструментом і ручними лампами рекомендовано забезпечувати напругу не більше 12 В. Також необхідно своєчасно здійснювати ремонт усього електроустаткування.

4.3 Розрахунок захисного заземлення

Визначимо, чи може трубопровід, прокладений у землі, слугувати одиночним заземлювачем для установки, підключеної до мережі з напругою 380/220 В.

Початкові дані:

- довжина трубопроводу: 450 м;
- зовнішній діаметр трубопроводу: 0,5 м;
- глибина закладання трубопроводу: 2 м;
- тип ґрунту: змішаний.

Опір одиночного металевого трубопроводу довжиною до одного кілометра, прокладеного в землі, розраховується за відповідною формулою.

$$R = \frac{\rho}{2\pi l} \lg \frac{l}{dt}, \text{ Ом}, \tag{4.1}$$

де ρ - питомий опір, Ом·см; (решта позначень відповідає вказаним в вихідних даних).

Середні значення питомого опору для ґрунтів з вологістю 10–20% наведені в методичних матеріалах "Захисне заземлення". Для змішаного типу ґрунту визначено, що питомий опір становить ρ = 110 Ом·см. Використовуючи це значення в формулі (4.1), можна розрахувати опір металевого трубопроводу.

$$R = \frac{1 \cdot 10^{2}}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 4{,}5 \cdot 10^{4}} \lg\left(\frac{(4{,}5 \cdot 10^{2})^{2}}{50 \cdot 200}\right) = 0{,}19 \text{ Ом}.$$

Відповідно до Правил улаштування електроустановок, допустимий опір заземлювального пристрою для електроустановок із напругою до 1000 В не повинен перевищувати 4 Ом. Таким чином, згідно з розрахунками, трубопровід може виконувати функцію заземлення для мереж із напругою не більше ніж 1000 В.

Розрахунок рівня шуму: Спробуймо визначити ступінь зниження рівня шуму між виробничим обладнанням та сусіднім приміщенням, у якому виконуються різні види робіт.

Вихідні дані:

- Рівень шуму обладнання L становить 128 дБ
- Матеріал огороджувальної конструкції — цегляна кладка (у 2 цеглини)
- Площа огороджувальної стіни S дорівнює 135 м²
- Звукоізолювальна здатність матеріалу конструкції на частоті f = 1000 Гц, R=56 дБ
- Звукопоглинальна площа в сусідньому приміщенні Ас дорівнює 28 м²
- Призначення сусіднього приміщення — слюсарна майстерня

Рівень зменшення шуму в дБ або звукоізоляційна здатність перешкод розраховується за такою формулою:

$$D = L_1 - L_2 = R - 10 * \lg \frac{S}{A_c}, \quad (4.2)$$

де: L_1 - рівень шуму до перешкоди (приміщення з джерелом шуму), Дб;

L_2 - рівень шуму в суміжному приміщенні;

R - звукоізолююча здатність обгороджування;

S - майдан перешкоди між приміщеннями, м^2;

A_c - звукопоглинання в ізольованому приміщенні, рівна сумі добутків майдану кожної поверхні на її коефіцієнт звукопоглинання, м.

$$D = L_1 - L_2 = R - 10 * \lg \frac{135}{28} = 49.2 Дб$$

Рівень шуму в суміжному приміщенні:

$$L_2 = L_1 - D = 128 - 49.2 = 78.2 < L_{ДОП}=80Дб(А), \quad (4.3)$$

Таким чином, рівень шуму в сусідньому приміщенні відповідає вимогам, встановленим для виробничих приміщень згідно з ГОСТ 12.1.003-83, де здійснюються стандартні види робіт.

4.4 Засоби індивідуального захисту

Засоби індивідуального захисту призначені для забезпечення безпеки обслуговуючого персоналу, запобігання травмам та виникненню професійних захворювань.

Відповідно до штатного розкладу, працівники ділянки підготовки пиловугільного палива отримують засоби індивідуального захисту безкоштовно. Надання здійснюється згідно з «Типовими галузевими нормами видачі спецодягу, спецвзуття та інших захисних засобів».

У таблиці 4.3 представлено розрахунок річної потреби в засобах індивідуального захисту для працівників цієї ділянки.

Таблиця 4.3 - Спецодяг для штату тих, що працюють на ділянці сушки піску

Найменування професій, посада	Кількість тих, що працюють по штату	Спецодяг і засоби індивідуального захисту	Термін астосув ання, місяць	Річна потреба, од.
Майстер	4	костюм х/б; черевики шкіряні; рукавиці робітничі, респіратор	12 12 2 до зносу	4 1 пара 6 пар
Апаратник сушильного барабана	8	костюм х/б; черевики шкіряні; рукавиці робітничі респіратор окуляри захисні	12 12 2 до зносу до зносу	8 8 пар 48 пар
Транспортувальник	8	костюм х/б черевики шкіряні, рукавиці робітничі, чоботи гумові, респіратор окуляри захисні	12 12 2 12 до зносу до зносу	8 8 пар 48 пар 8
Дробильник	8	костюм х/б черевики шкіряні, рукавиці робітничі, чоботи гумові, респіратор окуляри захисні	12 12 2 12 до зносу до зносу	8 8 пар 48 пар 8
Всього	28			

4.5 Санітарно-побутові і допоміжні приміщення

Загальна кількість працівників, задіяних на ділянці підготовки пиловугільного палива, становить 28 осіб. У зміні з найбільшою чисельністю працює 7 осіб, із них 6 є робітниками.

До побутових приміщень відносяться гардеробні, душові, умивальні, туалети, кімнати для куріння, пристрої для питної води, приміщення для громадського харчування та медичної допомоги.

Таблиця 4.4 – Норми вибору санітарно-гігієнічних пристроїв в залежності від характеристики виробничих процесів.

Група виробничих процесів	Розрахункова кількість людей на одну душеву	Розрахункова кількість людей на один кран	Тип гардеробних, кількість відділень шафи на 1 людину	Спеціальні побутові приміщення і пристрої
IIб	3	20	Загальні, два відділення	Приміщення для охолодження

Гардеробні призначені для зберігання вуличного, домашнього та спеціального одягу. Вуличний одяг розміщується відкритим способом на спеціально обладнаних гачках або плечиках. Кількість гачків розраховується відповідно до кількості працівників у двох суміжних змінах, враховуючи 5% резерву для практикантів. Для кожного працівника передбачена шафа з двома відділеннями для домашнього та спеціального одягу, яка замикається. При максимальній кількості працівників у двох змінах у 14 осіб кількість гачків у гардеробній становить 15 одиниць ($14 \cdot (1 + 0{,}05) = 15$ шт).

Найчисленнішою є денна зміна, яка нараховує 12 працівників. Відповідно до вимог, одна душова сітка має забезпечувати трьох осіб, а один кран у вмивальній

кімнаті — двадцятьох. На ділянці підготовки пиловугільного палива встановлено 5 душових сіток (15/3 = 5) і 1 кран у вмивальній кімнаті (15/20 = 1). Душові і вмивальні кімнати інтегровані з гардеробними.

Для харчування працівників протягом доби функціонує їдальня, де кожне посадкове місце розраховане на обслуговування чотирьох осіб. Ємність їдальні становить 5 посадкових місць (15/4 = 5).

Для компенсації втрат вологи та мінеральних солей у цеху встановлено питні фонтанчики і автомати з підсоленою газованою водою. Джерела питної води розташовані не далі, ніж за 75 метрів від робочих місць. Їх кількість визначається із розрахунку один пристрій на 100 осіб у зміну. У виробничому цеху розміщено один автомат з газованою водою та один питний фонтанчик; найбільша відстань від робочих місць до них становить 55 метрів. Туалети також розташовані на відстані, що не перевищує 75 метрів від робочих місць. Кількість санітарних пристроїв визначається наступним чином: один пристрій для 18 чоловіків і два пристрої для 12 жінок у відповідних туалетах.

4.6 Пожежна безпека

Відповідно до СНіП 2.01.02-85, виробничий процес на ділянці підготовки пиловугільного палива за критеріями вибухової, вибухопожежної та пожежної безпеки відноситься до категорії «Г» і характеризується II ступенем вогнестійкості.

Основними причинами виникнення пожеж і вибухів можуть бути: недбалість працівників при використанні відкритого вогню, несправність електрообладнання, накопичення статичного заряду, відмова контрольно-вимірювальних приладів, самозаймання промасленого ганчір'я, порушення правил пожежної безпеки тощо.

Щоб мінімізувати ризики виникнення пожеж на ділянці підготовки пиловугільного палива, система управління електрообладнанням оснащена максимальним струмовим захистом та плавкими запобіжниками. Персонал постійно контролює технічний стан електропроводки та струмопровідних елементів обладнання, а також дотримується вимог техніки безпеки під час виконання ремонтних робіт. Промаслене ганчір’я збирається у металеві

контейнери, а після завершення зміни спалюється за межами цеху. Для зниження ризику ураження будівлі блискавкою встановлено систему захисту другої категорії.

Для оперативного реагування на можливі пожежі у цеху розміщено первинні засоби пожежогасіння. Розрахунок необхідної кількості таких засобів для ділянки підготовки пиловугільного палива наведено у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5 – Первинні засоби пожежогасіння для ділянки підготовки пиловугільного палива

Приміщення, споруди, устаткування	Одинці виміру	Хімічні пінні вогнегасники ОХП-10	Вуглекислотні вогнегасники ОУ-2	Вуглекислотні вогнегасники ОУ-5 або ОУ-8	Ящик з піском, ємністю 0,5м^3 з лопатами
виробниче приміщення	5400	6	2	2	4
приміщення КІП	1 кімната	2	4	-	-
пульт керування	1 пульт	-	-	2	2

ВИСНОВКИ

1. На основі аналізу технічного стану доменної печі №5 ПАТ «Запоріжсталь» у роботі розроблено низку заходів, спрямованих на підвищення технічного та технологічного рівня її експлуатації.
2. Проведено оцінювання ефективності використання пило-вугільного палива (ПВП) на доменній печі №5. Встановлено, що застосування ПВП дозволяє не лише замінити витрати на дорогий природний газ, але й знизити питомі витрати коксу.
3. На основі аналізу літературних даних і виконаних розрахунків запропоновано впровадження вдування 150 кг/т чавуну ПВП марки Т із розміром часток менше 90 мкм.
4. Розроблено та обґрунтовано конструкцію установки для підготовки та вдування ПВП у доменну піч, а також конструкцію фурми для подачі ПВП у потік гарячого дуття.
5. Проведений розрахунок впливу використання ПВП на рівень безпеки праці. У зв’язку з цим визначено перелік заходів для забезпечення належного рівня безпеки в процесі експлуатації.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Теорія і технологія доменного процесу» для студентів напряму 6.050401 Металургія /Укл.: Крячко Г.Ю. Дніпродзержинськ; ДДТУ. 2014р.

2. Смирнов В.О., Білецький В.С. Фізичні та хімічні основи виробництва. Навчальний посібник. Донецьк : Східний видавничий дім, 2005. 148 с.

3. Конспект лекцій з дисципліни «Споруди та обладнання доменних цехів» для студентів денної форми навчання напряму 6.050401 – Металургія / Укл.: Крячко Г.Ю., Сафіна-Валуєва Л.О. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2016. 87 с.

4. Смірнов О. М., Семенко А. Ю., Скоробагатько Ю. П., Горюк М. С. Основи металургії: виробництво чавуну : підручник. Одеса : Олді+, 2023. 192 с.

5. Плискановский С.Т., Полтавец В.В. Оборудование и эксплуатация доменных печей. Днепропетровск : Пороги, 2004. 495 с.

6. Ярошевский С.Л. Применение пылеугольного топлива для выплавки чугуна. Киев : Техника, 1976. 252 с.

7. Ярошевский С.Л., Терещенко В.П., Либерова З.И. Оценка коэффициента замены кокса пылеугольным топливом. *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 1981, №2. С. 10-14.

8. Ноздрачев В.А., Ярошевский С.Л., Терещенко В.П. Перспективные технологии доменнной плавки с применением кислорода и пылеугольного топлива. Донецк : Нолидж, 1996. 170 с.

9. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник для металург. спец. вищ. навч. закл. / Д. Ф. Чернега, В. С. Богушевський, Ю. Я. Готвянський [та ін.] ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.

10. Смирнов В. О., Білецький В. С. Фізичні та хімічні основи виробництва. Київ : Наука, 2005. С. 45−48.

11. Пеккер О. М., Мінаєв В. І. Модернізація промислових печей. Київ : Техніка, 1987. 182с.

12. Комов І. Г. Охорона праці чорної металургії. Київ : Техніка, 1986. 192с.

13. Гапоненко О. Д., Савостін Д. З. Правила безпеки для підприємств та організацій металургійної промисловості. Дніпропетровськ : Промінь, 1970. 352с.

14. Краснов Л. М. Охорона праці. Дніпропетровськ : Промінь 1981. 190с.

15. Державні санітарні правила "Підприємства чорної металургії" ДСП 3.3.1.038-99.

16. Наказ МОЗ від 14.07.2020 № 1596 «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони».

17. Наказ МОЗ України «Про затвердження гігієнічних регламентів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони» 14.07.2020 № 1596.

18. ДСТУ 2867-94 Шум. Методи оцінювання виробничого шумового навантаження. Загальні вимоги.

19. ГОСТ 12.1.012-90. ССБТ. Вібраційна безпека. Загальні вимоги.

20. ДСТУ 3038-95 Гігієна. Терміни та визначення основних понять.

21. ДСТУ ГОСТ 12.4.221:2004 Система стандартов безопасности труда. Одежда специальная для защиты от повышенных температур теплового излучения, конвективной теплоты. Общие технические требования (ГОСТ 12.4.221-2002, IDT).

22. НПАОП 40.1-1.01-97 Правила безопасной эксплуатации электроустановок (ДНАОП 1.1.10-1.01-97).

23. СНиП 2.01.02-85*. Протипожежні норми (Діє ДБН В 1.1-7-2002) (2.01.02-85*).

24. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення.

25. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування.