Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота

на тему *«Розробка системи газоочищення та утилізація вторинних матеріалів доменного виробництва»*

Виконав: студентка ___групи *6.1833-с2*_____

спеціальності
183 Технології захисту навколишнього середовища
освітньої програми
*Технології захисту навколишнього середовища*_

*Бондаренко С.Г.*___

Керівник доц.*, к.фіз.-мат.н. Вагін А.В.*_____

Рецензент _*д.х.н., проф. Прутцьков Д.В.*_____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя
2026

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра _____*металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*_____

Рівень вищої освіти _____*перший бакалаврський рівень*_____
другий (магістерський) рівень

Спеціальність ___*183 Технології захисту навколишнього середовища*_____
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма ___*Технології захисту навколишнього середовища*
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри _____*МТЕТБ*_____
_____ *Ю.О. Бєлоконь*__

«____» _____2026 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Бондаренко Софії Геннадіївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи_«Розробка системи газоочищення та утилізація вторинних матеріалів доменного виробництва»_____
_____
керівник роботи_*Вагін Андрій Вікторович, к.фіз.-мат.н, доцент*_____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від *"__"*_____ 202_року *№* _____
2. Строк подання студентом роботи _____*08.06.2026*_____
3. Вихідні дані до роботи ____*розробити високоефективну систему очищення технологічного газу з утилізацією потенційної енергії доменного газу: температура попереду пиловловлювача 245 °С; витрата доменного газу за нормальних умов 248000 м^3/год; запиленість початкова – 20 г/м^3;тиск на колошнику180 кПа; щільність частинок пилу $\rho_ч$ = 3390 кг/м^3. Склад газу: CO_2 – 11,3% CO – 29%, CH_4 – 0,2%, H_2 – 4,3%, (O_2 + N_2)– 55,2%.*
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Вступ. Технологія виробництва отримання чавуну в доменних печах. Характеристика газових викидів від доменної печі. Декарбонізація доменного виробництва. Використання потенційної енергії доменного газу. Аналіз конструкцій існуючих ГУБТ. Розрахунок першої ступені очищення - радіального пиловловлювача. Розрахунок рукавного фільтра типу ФРО. Вибір та розрахунок ГУБТ. Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту. Проєктування основного та допоміжного обладнання технології утилізації вторинних енергоресурсів. Охорона праці та техногенна безпека*

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
презентаційний матеріал на 15 слайдах (на 15 сторінках)

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Загальна частина	*Вагін А.В., доцент*	
Спеціальна частина	*Вагін А.В., доцент*	
Проєктний розділ	*Вагін А.В., доцент*	
Охорона праці та техногенна безпека	*Вагін А.В., доцент*	

7. Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*		*виконано*
2	*Загальна частина*		*виконано*
3	*Спеціальна частина*		*виконано*
4	*Проєктний розділ*		*виконано*
5	*Охорона праці та техногенна безпека*		*виконано*
6	*Висновки*		*виконано*
7	*Презентація*		*виконано*

Студент _____ *Софія БОНДАРЕНКО*

Керівник роботи _____ *Андрій ВАГІН*

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ _____

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 77 с., 12 табл., 17 рис., 14 джерел

ДОМЕННЕ ВИРОБНИЦТВО, ДЕКАРБОНІЗАЦІЯ, ПАРНИКОВІ ГАЗИ, КОЛОШНИКОВИЙ ГАЗ, ПОТЕНЦІЙНА ЕНЕРГІЯ, РАДІАЛЬНИЙ ПИЛОВЛОВЛЮВАЧ, РУКАВНИЙ ФІЛЬТР, ДРОСЕЛЬНА ГРУПА

Об’єкт дослідження – виробництво чавуну в доменних печах

Предмет дослідження – система газоочищення технологічних газів доменного виробництва.

Мета кваліфікаційної роботи – розроблення системи очищення доменного газу з подальшою утилізацією його потенційної енергії.

Встановлено, що в процесі роботи доменної печі виділяються такі парникові гази: вуглекислий газ; метан; оксид азоту(I). Найбільшу частку викидів становить саме CO_2. Джерела утворення парникових газів у доменному виробництві наведені такі: спалювання коксу в горні печі; відновлення оксидів заліза монооксидом вуглецю з утворенням вуглекислого газу; розкладання флюсів при нагріванні з виділенням вуглекислого газу; спалювання доменного газу при використанні його як палива; допоміжні технологічні процеси.

Запропоновано використовувати для використання доменного газу для генерації електроенергії за рахунок його надлишкового тиску газоутилізаційну безкомпресорну турбіну. Використання ГУБТ дозволяє: зменшити споживання електроенергії з зовнішніх джерел; скоротити витрати палива на ТЕЦ; підвищити енергоефективність доменного виробництва; знизити питомі викиди CO_2.

ЗМІСТ

ВСТУП 6
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА 8
1.1Технологія виробництва отримання чавуну в доменних печах 8
1.2 Характеристика газових викидів від доменної печі 15
2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА 18
2.1 Декарбонізація доменного виробництва 18
2.2 Використання потенційної енергії доменного газу 21
2.3 Аналіз конструкцій існуючих ГУБТів 30
3 ПРОЄКТНИЙ РОЗДІЛ 40
3.1 Розрахунок першої ступені очищення - радіального пиловловлювача 40
3.2 Розрахунок рукавного фільтра типу ФРО 46
3.3 Вибір та розрахунок ГУБТ 50
3.4 Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту (зворотня продувка) 53
3.5 Проектування основного та допоміжного обладнання технології утилізації вторинних енергоресурсів 59
4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА 65
4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів 65
4.2 Виробнича санітарія. Заходи з поліпшення умов праці 67
4.3 Електробезпека 70
4.5 Пожежна безпека 72
ВИСНОВКИ 75
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ 76

ВСТУП

Україна є важливий учасник світового металургійного ринку, однак сьогодні галузь функціонує в умовах значних труднощів. Серед основних проблем – впровадження європейського механізму вуглецевого коригування імпорту CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism), а також нестабільне забезпечення електроенергією [1].

CBAM, або механізм прикордонного вуглецевого регулювання, є інструментом Європейського Союзу, який передбачає запровадження вуглецевих платежів для продукції, що імпортується до країн ЄС із держав, де екологічні вимоги до скорочення викидів є менш жорсткими. Основне призначення цього механізму полягає у запобіганні так званому «вуглецевому витоку», коли підприємства переносять виробництво в країни з м’якшими природоохоронними нормами задля зниження витрат. Крім того, CBAM має забезпечити рівні конкурентні умови між європейськими виробниками, які сплачують за викиди CO_2 відповідно до екологічної політики ЄС, та імпортерами продукції. Для окремих видів товарів, насамперед продукції з високою вуглецевою інтенсивністю, буде введено додаткові платежі, величина яких визначатиметься обсягом парникових газів, що утворилися під час їх виробництва [2].

У 2025 році в Україні зафіксовано зростання виробництва чавуну на 11,2 %, до рівня 7,88 млн т, що стало одним із найкращих результатів металургійної галузі від початку повномасштабної війни. Збільшення обсягів доменного виробництва було зумовлене активізацією попиту на сировинну продукцію на зовнішніх ринках, насамперед експортних. Водночас рівень виплавки все ще суттєво поступається показникам довоєнного періоду [1].

Декарбонізація доменного виробництва полягає у суттєвому зниженні викидів вуглекислого газу під час виплавки чавуну. Цей напрям є одним із ключових у процесі екологічної модернізації металургії та протидії глобальним кліматичним змінам.

Реалізація декарбонізації передбачає впровадження енергоефективних технологій, використання альтернативних джерел енергії та поступовий перехід до більш екологічно безпечних виробничих процесів.

Запровадження технологій очищення доменного газу із залученням його потенційної енергії є важливим напрямом підвищення енергоефективності металургійного виробництва та зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище.

Метою кваліфікаційної роботи є розроблення системи очищення доменного газу з подальшою утилізацією його потенційної енергії.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Дослідити процеси утворення та формування компонентного складу доменного газу в умовах доменної плавки;

2. Провести аналіз методів декарбонізації доменного виробництва та обґрунтувати найбільш ефективні напрями їх застосування;

3. Проаналізувати існуючі способи очищення доменного газу та обґрунтувати вибір найбільш ефективного методу з урахуванням вимог декарбонізації доменного виробництва;

4. Розробити проєкт системи очищення доменного газу з утилізацією його потенційної енергії;

5. Дослідити можливості переробки пилу, вловленого під час очищення доменного газу.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1Технологія виробництва отримання чавуну в доменних печах

Виплавка чавуну в доменних печах металургійних підприємств здійснюється із залізорудної сировини, до якої належать аглоруда, агломерат, окатки та інші матеріали. Видобуток цієї сировини проводиться відкритим і підземним способами у кар'єрах та шахтах, після чого вона проходить підготовку й збагачення на гірничо-збагачувальних комбінатах та агломераційних фабриках.

Загальний вигляд доменного цеху наведено на рис. 1.1.

Доменна піч є одним із найбільших агрегатів металургійного виробництва, висота якого може сягати більш ніж 70 м. Її робота базується на принципі протитечійного руху матеріалів і газів. Через верхню частину печі – колошник – у шахту завантажують шихту, що складається із залізорудних матеріалів, коксу та флюсів, зокрема вапняку. Одночасно через фурми, розташовані в нижній частині печі, подається гаряче дуття – нагріте повітря, збагачене киснем і паливними добавками, такими як природний газ або пиловугільне паливо (ПВП).

У верхніх зонах печі відбувається нагрівання шихтових матеріалів, нижче – їх розм'якшення та плавлення, а в нижній частині, яка називається горном, накопичуються продукти плавки. Рідкий чавун збирається на дні горна й періодично випускається через льотки у чавуновози для подальшого транспортування до сталеплавильного виробництва. Одночасно з протилежного боку печі здійснюється випуск шлаку у спеціальні шлакові чаші.

Ефективність доменного процесу значною мірою визначається якістю підготовки сировинних матеріалів. Саме тому підготовці шихти приділяють особливу увагу, оскільки порушення вимог до її складу може призвести до погіршення перебігу плавки та зниження якості отриманого чавуну. Для

забезпечення стабільних характеристик готової продукції сировина та паливо повинні мати максимально однорідний хімічний склад і містити мінімальну кількість шкідливих домішок, що можуть негативно впливати на властивості металу під час подальшої переробки [6].



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд доменного цеху[6]

Доменний процес є складною сукупністю механічних, теплофізичних, газодинамічних, гідродинамічних і фізико-хімічних явищ, що відбуваються в доменній печі під час перероблення залізорудної сировини у чавун і шлак. Виплавка чавуну в доменній печі характеризується низкою особливостей [7].

1. Доменна плавка належить до відновлювальних процесів, оскільки її основою є відновлення оксидів заліза до металевого стану. Для цього в робочому просторі печі створюється відновлювальне газове середовище. Утворення основних відновників – оксиду вуглецю та водню – відбувається внаслідок неповного згоряння коксу та додаткових палив у потоці нагрітого стисненого дуття.

2. Робота доменної печі побудована за принципом протитечії. Шихтові матеріали, що завантажуються через колошник, поступово опускаються вниз,

одночасно нагріваючись і відновлюючись під дією гарячих газів, які рухаються назустріч угору із зони горіння палива. Завдяки цьому верхня частина печі виконує роль ефективного теплообмінного та реакційного простору.

3. Доменний процес є безперервним. Піч функціонує тривалий період без зупинки – від одного капітального ремонту до іншого. Через фурми в горн постійно подається нагріте до 1000-1200 °С дуття, а через колошник безперервно відводиться доменний газ. Завантаження шихти й коксу здійснюється періодично за допомогою спеціальних завантажувальних систем. У процесі руху вниз шихта проходить стадії нагрівання, відновлення та плавлення, утворюючи рідкі продукти – чавун і шлак. Їх випуск із печі проводять кілька разів на добу, а на потужних агрегатах цей процес практично безперервний.

4. Кокс у доменному виробництві виконує декілька важливих функцій. Він є джерелом тепла, матеріалом для утворення відновлювальних газів, а також забезпечує механічну міцність шару шихти й необхідну газопроникність у високотемпературних зонах печі. Крім того, вуглець коксу переходить у метал і є одним із головних компонентів чавуну, сприяючи зниженню температури його плавлення.

5. Доменна піч являє собою складну металургійну систему, у якій одночасно існують значні перепади температур, тиску та концентрацій компонентів. Через це ефективне керування процесом неможливе без використання сучасних засобів контролю, автоматизації, вимірювальної техніки та програмного забезпечення.

6. Чавун і шлак випускаються з печі у рідкому стані та легко розділяються завдяки різниці густини. Втрати металу разом зі шлаком є незначними й зазвичай становлять лише 2–4 %. Металеві включення, що потрапляють у шлак, надалі вилучаються під час його переробки та повертаються у виробництво.

7. Доменне виробництво характеризується значними масштабами. У різних країнах світу експлуатуються доменні печі об’ємом 5000–5800 м³. Найпотужніші агрегати здатні виробляти до 14 тис. т чавуну на добу, що потребує щоденного використання десятків тисяч тонн залізорудної сировини та кількох тисяч тонн коксу.

Сутність доменного процесу полягає у відновленні заліза з рудних матеріалів і подальшому отриманні рідкого чавуну. Для створення температур 1700-1900 °С, необхідних для плавлення шихти, використовується кокс, а пусту породу переводять у шлак за допомогою флюсів. Основою роботи доменної печі є взаємодія низхідного потоку шихтових матеріалів і висхідного потоку гарячих газів (рис.1.2).

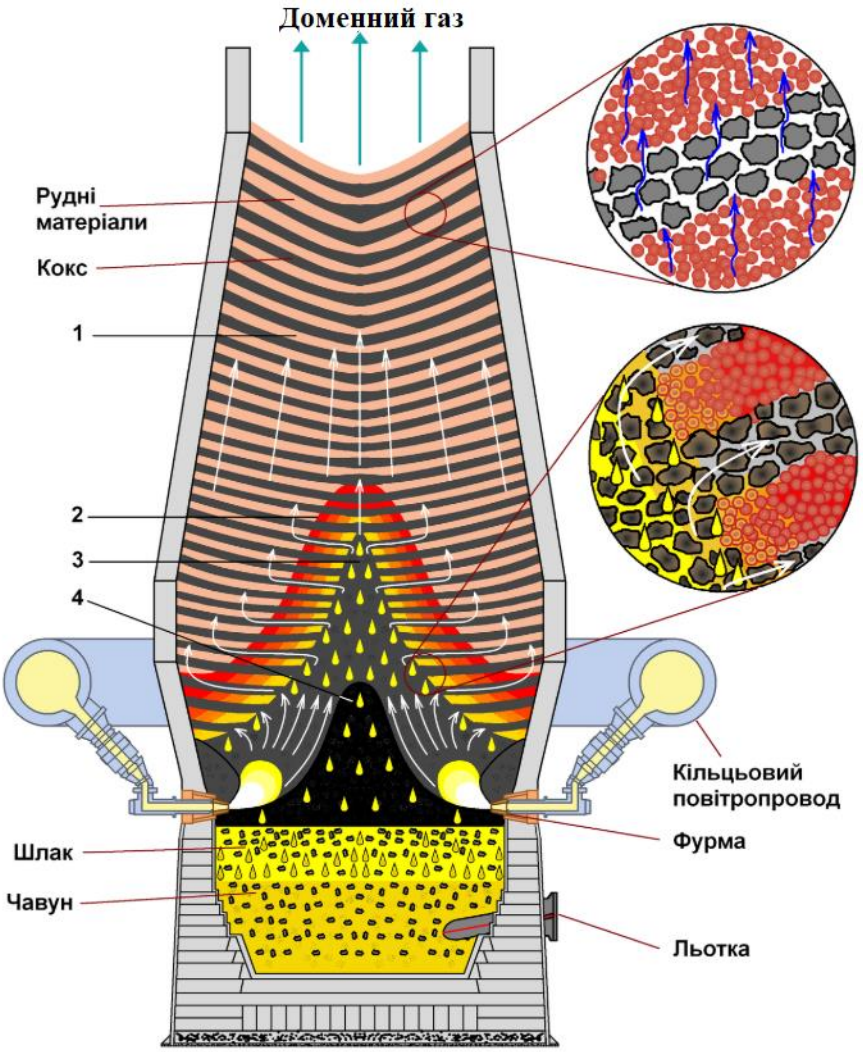


Рисунок 1.2 – Загальний вигляд доменної печі [8]

Шихтові матеріали, які подаються у піч через колошник, під дією сили тяжіння поступово переміщуються до нижньої частини домни – горна. У цій зоні внаслідок згоряння палива постійно звільняється об’єм, який безперервно заповнюється новими порціями шихти, що опускається зверху. Одночасно через повітряні фурми під тиском подається нагріте дуття. Під час контакту гарячого повітря з розпеченим коксом відбувається утворення оксиду вуглецю CO, який із великою швидкістю рухається вгору до колошникової частини печі.

Процес формування оксиду вуглецю супроводжується виділенням значної кількості теплоти внаслідок перебігу відповідних хімічних реакцій [10]:

$$C_{кокс}+O_{2\ повітря}=CO_2 \quad (1.1)$$

далі

$$C_{кокс} + CO_2 = 2CO \quad (1.2)$$

Доменні гази перебувають у робочому просторі печі відносно короткий проміжок часу, проте за цей період виконують важливі технологічні функції. Вони забезпечують нагрівання всієї шихти, що знаходиться в печі, а також взаємодіють із її компонентами, створюючи умови для утворення чавуну та шлаку. У різних зонах доменної печі, за відповідних температурних умов, між гарячими газами та шихтовими матеріалами послідовно проходять складні фізико-хімічні процеси, серед яких - розкладання компонентів шихти, відновлення оксидів заліза, навуглецювання металу, плавлення чавуну та формування шлаку.

Розкладання шихтових матеріалів починається одразу після їх надходження до доменної печі. У верхній частині агрегату температура газів, що виходять, становить приблизно 150–300 °C. Під впливом цього тепла з коксу видаляється волога та леткі органічні сполуки, а залізорудні матеріали втрачають вміщену в них воду. Таким чином, у верхній зоні печі відбувається

попередня теплова підготовка шихти до подальшого процесу плавлення — її сушіння та прогрівання.

У міру опускання шихтових матеріалів у нижні зони печі та за температури висхідного газового потоку близько 400-450 °С розпочинається процес відновлення залізовмісних оксидів. Його сутність полягає у вилученні кисню із сполук заліза під дією відновників – насамперед вуглецю коксу, а також оксиду вуглецю й частково водню. Головним відновлювальним агентом у доменному процесі виступає вуглець. Відновлення проходить у дві послідовні стадії: на першій кисень зв'язується оксидом вуглецю, тоді як на другій у реакціях бере участь твердий вуглець коксу.

Початковий етап реалізується у шахтній частині доменної печі в температурному діапазоні 400-950 °С. У цей період із рудних матеріалів поступово видаляється кисень унаслідок його взаємодії з оксидом вуглецю. Перебіг процесу описується такими хімічними реакціями [10]:

$$3Fe_2O_3 + CO \rightarrow 2Fe_3O_4 + CO_2; \quad (1.3)$$

$$Fe_3O_4 + CO \rightarrow 3FeO + CO_2; \quad (1.4)$$

$$FeO + CO \rightarrow Fe + CO_2. \quad (1.5)$$

Проте оксид вуглецю забезпечує відновлення лише приблизно половини оксиду заліза FeO. Решта цієї сполуки переходить у металеве залізо під дією твердого вуглецю коксу на другому етапі процесу. Таке відновлення відбувається за температур 950-1100 °С: початок реакцій спостерігається в зоні розпару, а завершення – у ділянці заплечиків доменної печі.

$$FeO + C \rightarrow Fe + CO. \quad (1.6)$$

У процесі відновлення рудної сировини формується тверде губчасте залізо з температурою плавлення близько 1140 °С. Під час подальшого переміщення матеріалів униз по печі залізо насичується вуглецем унаслідок

взаємодії з вуглецем коксу та газової фази, що відбувається за такою реакцією:

$$3Fe + C \rightarrow Fe_3C. \quad (1.7)$$

У ході навуглецювання та подальшого переміщення карбіду заліза Fe_3C у зони з підвищеними температурами, що перевищують температуру його плавлення, металеві частинки починають розм'якшуватися й плавитися, унаслідок чого утворюються перші краплі рідкого металу. Такий процес відбувається за температур 1250-1300 °C у зоні розпару та у верхній частині заплечиків доменної печі [10].

Одночасно з відновленням заліза проходять реакції відновлення інших компонентів шихтових матеріалів. Значна частина марганцю та фосфору відновлюється під дією оксиду вуглецю або твердого вуглецю коксу й переходить у чавун. Водночас більш стійкі оксиди кремнію та сірки відновлюються лише частково. Особливо високою хімічною стійкістю характеризуються оксиди кальцію, магнію та алюмінію, що входять до складу пустої породи. Через високу тугоплавкість ці сполуки практично не взаємодіють із вуглецем або оксидом вуглецю навіть за максимальних температур у печі. Наприклад, температура плавлення оксиду алюмінію становить близько 2050 °C, тоді як у доменній печі температура зазвичай не перевищує 1900 °C.

Для зниження температури плавлення таких тугоплавких компонентів, їх розкладання та переведення у шлакову фазу до складу шихти вводять основні або кислі флюси.

Формування рідкого шлаку в доменній печі є складним комплексом фізико-хімічних перетворень.

Як флюс найчастіше використовують вапняк, який у верхніх зонах печі піддається випалу та розкладається з утворенням оксиду кальцію відповідно до реакції:

$$CaCO_3 \rightarrow CaO + CO_2, \quad (1.8)$$

Утворений оксид кальцію взаємодіє з глиноземом, а також частково з оксидами кремнію та сірки, унаслідок чого ці компоненти переходять до складу шлаку. Доменний шлак складається з пустої породи шихтових матеріалів, флюсів, залишків невідновлених оксидів заліза та продуктів зношування футеровки печі.

Шлаки суттєво впливають на хімічний склад чавуну, його температуру й вміст небажаних домішок. Процес шлакоутворення починається в нижніх зонах шахти доменної печі та завершується в області заплечиків за температур понад 1400 °С [10].

Краплі навуглецьованого заліза, які стікають у горн, ще не можна вважати готовим чавуном. Під час перебування в горні сплав заліза з вуглецем зазнає подальших хімічних перетворень: до його складу переходять відновлені елементи, що не були зв’язані шлаком. У результаті чавун, який випускають із печі, містить приблизно 4 % вуглецю, значну частину марганцю, увесь фосфор, а також певну кількість кремнію та сірки.

У горні печі формуються два рідкі шари: нижній – чавун, верхній – шлак. Їх періодично випускають через спеціальні льотки для чавуну та шлаку.

1.2 Характеристика газових викидів від доменної печі

Основними результатами доменної плавки є утворення чавуну, шлаку та доменного газу. Чавун і шлак виводяться з печі у рідкому високотемпературному стані, тоді як доменний газ відводиться через колошникову частину агрегату. При цьому чавун виступає головною продукцією доменного виробництва, а шлак і доменний газ належать до побічних продуктів процесу.

Одним із найцінніших вторинних енергетичних ресурсів металургійних підприємств вважається колошниковий газ доменних печей. Частка його

хімічної енергії в загальному тепловому балансі доменного процесу може досягати близько 45 %.

Склад доменного газу наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Склад доменного газу

Компонент	CO_2	CO	CH_4	H_2	O_2+N_2
Об’ємна частка, %	11,2	31,2	0,2	2,41	55,19

Температура доменного газу на виході з печі зазвичай становить 300–350 °С, хоча в окремих випадках, наприклад під час обвалення шихти, може підвищуватися до 600 °С [10]. Надлишковий тиск газу під колошником досягає 0,25 МПа, тоді як на ПАТ «Запоріжсталь» його значення не перевищує 0,13 МПа.

У зв’язку з цим очищення доменного газу та його подальше використання як енергетичного палива має важливе значення для скорочення споживання енергоресурсів і зниження собівартості металопродукції.

Кількість колошникового газу визначається багатьма технологічними параметрами, серед яких склад шихтових матеріалів, температура й тиск дуття, використання природного газу, інтенсивність процесів відновлення заліза та інші чинники. Основний вплив на обсяг утворення газу мають питомі витрати коксу. Відповідно, зі збільшенням витрат коксу пропорційно зростає і вихід доменного газу.

У сучасному доменному виробництві середній вихід колошникового газу становить приблизно 1500–2000 м³ на 1 т чавуну. Такі показники пов’язані з постійним удосконаленням технології та прагненням зменшити витрати коксу, які нині зазвичай знаходяться в межах 400–450 кг на тонну чавуну [5].

Температура газу, що виходить із колошника, також залежить від режиму ведення плавки та тиску під колошником. Під час використання

«холодної» шихти – окатків, кускового вапняку та інших матеріалів – температура газу зазвичай перебуває в межах 120-200 °С залежно від рівня завалки печі. Якщо ж доменна піч працює на гарячому агломераті, то за стабільного перебігу процесу температура газу може підвищуватися до 250-300 °С.

У разі порушення нормального режиму плавки, наприклад при виникненні «канального» ходу газів, температура колошникового газу короткочасно здатна досягати 380-400 °С.

Запиленість доменного газу характеризується значною мінливістю та визначається якістю шихтових матеріалів і величиною тиску під колошником. У середньому концентрація пилу на виході з печі становить 15–20 г/м³. Водночас допустимий рівень залишкової запиленості після очищення не повинен перевищувати 4 мг/м³, оскільки доменний газ надалі використовується як паливо, а енергетичне обладнання потребує високого ступеня його очищення.

Слід також враховувати, що пил, який міститься в доменному газі, переважно має крупнодисперсний характер (табл. 1.2). Частка пилових частинок розміром понад 6 мкм становить близько 56 % [6].

Таблиця 1.2 – Фракційний склад пилу доменного газу

Середній розмір часток пилу, мкм	Масова частка, %
> 60	5
60-20	25
20-6	26
< 6	44

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Декарбонізація доменного виробництва

Розподіл викидів парникових газів за основними джерелами утворення в гірничо-металургійному комплексі України [4].

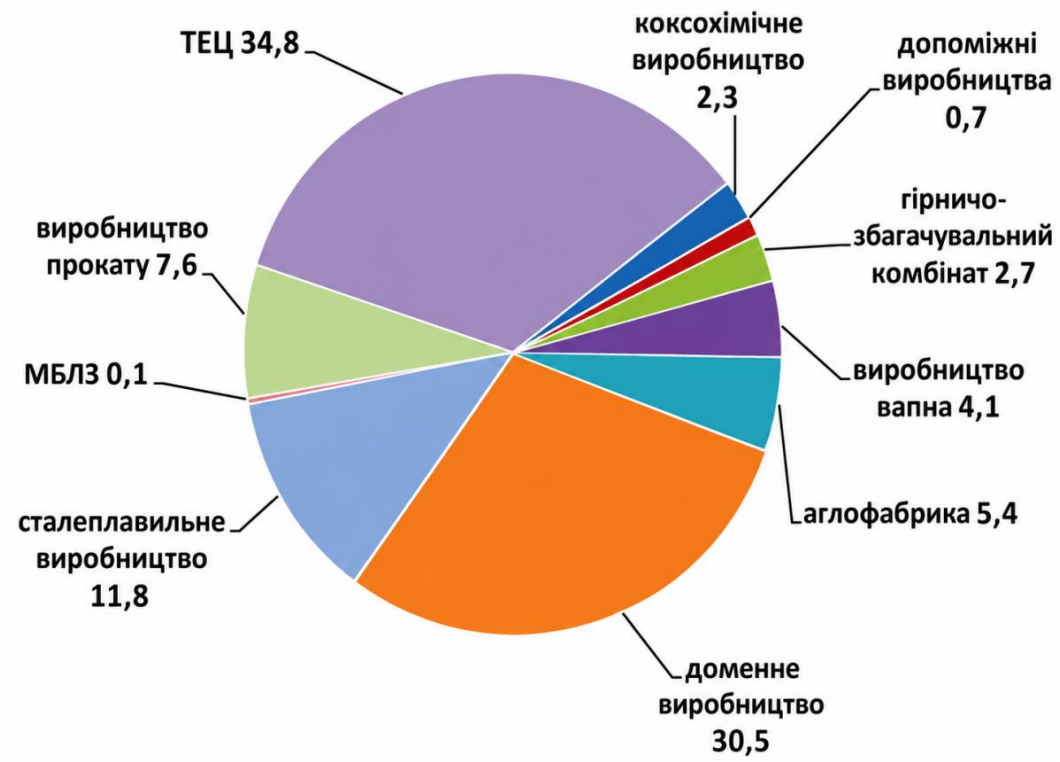


Рисунок 2.1 – Розподіл викидів парникових газів в гірничо-металургійному комплексі України

У процесі роботи доменної печі виділяються такі парникові гази:

- вуглекислий газ (CO_2) – основний парниковий газ;
- метан (CH_4) – утворюється у невеликих кількостях;
- оксид азоту(I) (N_2O) – присутній у незначних концентраціях.

Найбільшу частку викидів становить саме CO_2.

Джерела утворення парникових газів (рис.2.2):

1. Спалювання коксу: головним джерелом CO_2 у доменному виробництві є спалювання коксу в горні печі.

2. Відновлення оксидів заліза: у доменній печі оксиди заліза відновлюються монооксидом вуглецю з утворенням вуглекислого газу.

3. Розкладання флюсів: при нагріванні вапняку та доломіту відбувається їх термічний розклад з виділенням вуглекислого газу.

4. Спалювання доменного газу: колошниковий (доменний) газ після очищення використовується як паливо, в результаті спалювання якого виділяється вуглекислий газ.

5. Допоміжні технологічні процеси: коксохімічне виробництво; агломераційні машини; транспортні операції; енергетичне обладнання; пиловугільне вдування.



Рисунок 2.2 – Джерела утворення парникових газів

Основні напрямки декарбонізації доменного виробництва:

1. Використання водню.
2. Використання вторинних газів.
3. Модернізація виробництва.

Введення водню в доменні печі (як відновника замість коксу) може знизити викиди CO_2 на 10-70%.

Використання відхідних газів металургійного виробництва для генерації електроенергії або палива.

Одним із перспективних напрямів зниження викидів парникових газів у металургії є впровадження сучасних технологій виробництва чавуну, зокрема процесу HIsarna. Ця інноваційна технологія рідкофазного відновлення заліза була розроблена компанією Tata Steel спільно з партнерами в межах програми ULCOS. Її застосування дає можливість отримувати чавун із меншими енергетичними витратами та суттєво скороченими викидами CO_2 порівняно з традиційною доменною технологією.

До основних переваг технології HIsarna належать:

1. відсутність необхідності у виробництві коксу;
2. можливість використання дрібнодисперсної залізорудної сировини;
3. зменшення негативного впливу на довкілля;
4. поєднання процесів відновлення та плавлення в одному агрегаті.

Технологія передбачає безпосереднє використання вугілля без стадії коксування, що дозволяє знизити обсяги шкідливих викидів. Крім того, у процесі можуть застосовуватись дрібні фракції руди та пилоподібні матеріали без попереднього агломерування або виробництва окатків. Важливою перевагою є також спрощення процесу уловлювання CO_2, оскільки відхідні гази мають високу концентрацію та відносно чистий склад, що створює сприятливі умови для технологій CCS і CCU.

Сутність процесу HIsarna полягає у відновленні та плавленні залізорудної сировини в одному реакційному агрегаті — циклонному конвертері. Завдяки цьому технологія розглядається як один із найбільш перспективних напрямів розвитку «зеленої» металургії та скорочення вуглецевого сліду сталеливарного виробництва.

HIsarna – це метод, при якому залізна руда відновлюється та плавиться в одному реакторі (циклонному конвертері).Ця технологія вважається одним із перспективних напрямків «зеленої» металургії для зменшення вуглецевого сліду в сталеливарній промисловості.

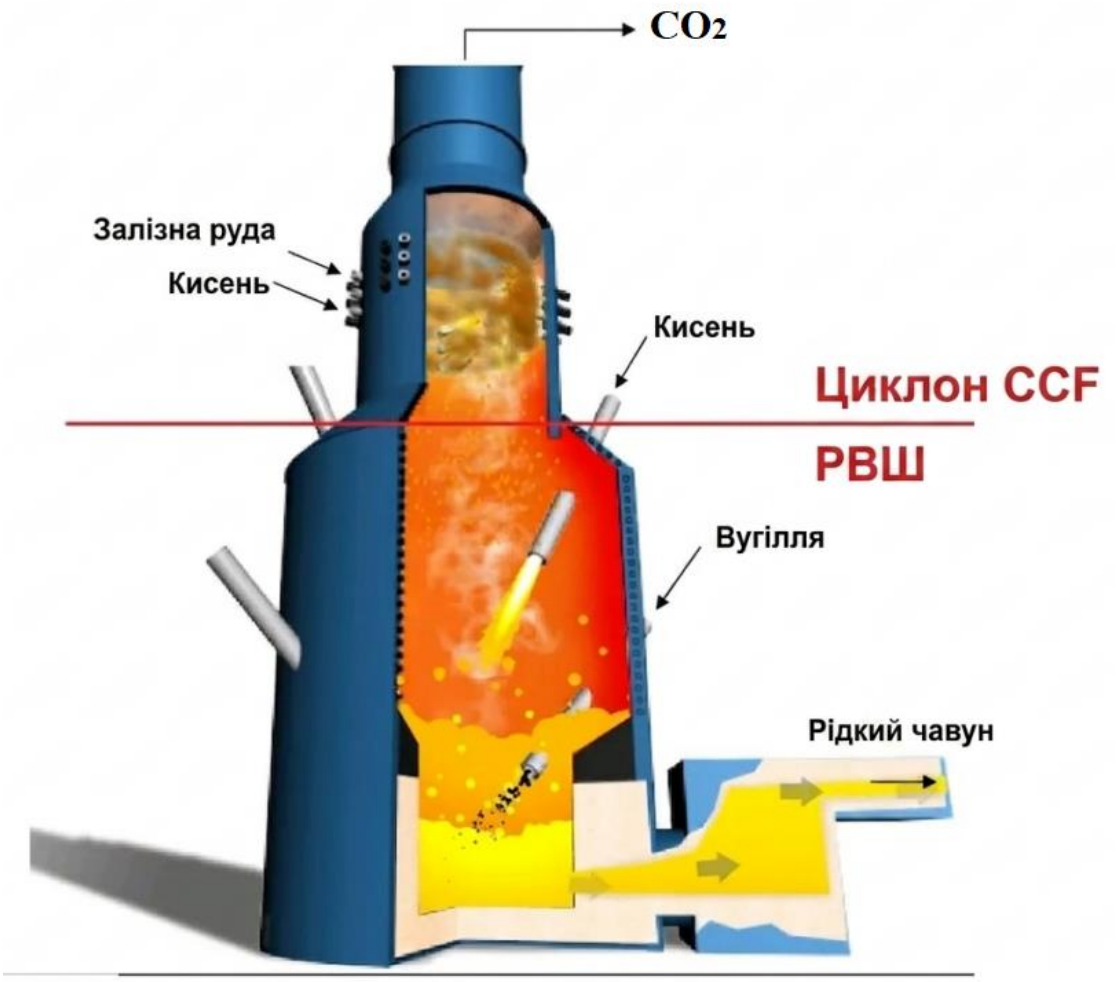


Рисунок 2.2 – Циклонний конвертер [5]

2.2 Використання потенційної енергії доменного газу

Доменна плавка являє собою багатостадійний комплекс фізико-хімічних процесів, у ході яких прихована енергія палива – коксу, природного та доменного газу й інших енергоносіїв - перетворюється на теплову, хімічну (відновлювальну) та механічну енергію, пов’язану з рухом дуття крізь шар шихтових матеріалів. Для підвищення інтенсивності горіння коксу та ефективності відновлення заліза додатково використовують теплову енергію нагрітого дуття та електроенергію, необхідну для виробництва кисню й забезпечення роботи повітродувних установок [1].

Нижче наведено один із найбільш поширених варіантів теплового балансу доменної печі, запропонований А. Н. Раммом для умов виплавки чавуну із застосуванням природного газу та дуття, збагаченого киснем [2].

Надходження тепла (%):

- кокс – 65,2;
- природний газ – 25,6;
- нагріте дуття – 9,2.

Витрати тепла (%):

корисне використання - 49,8, зокрема:

- дисоціація оксидів та інших сполук – 4,0;
- випаровування вологи – 38,8;
- ентальпія чавуну –7,0;

невикористане тепло – 50,2, у тому числі:

- тепло колошникового газу – 39,1;
- перехід вуглецю до складу чавуну – 8,4;
- втрати тепла в навколишнє середовище – 2,7.

Наведений баланс свідчить про те, що лише близько половини підведеної теплоти безпосередньо витрачається на виплавку чавуну. Основна частина енергетичних втрат пов’язана з утворенням значних об’ємів газоподібних продуктів згоряння коксу, природного газу та компонентів дуття.

Водночас такий тепловий баланс дає лише узагальнену характеристику процесів, що перебігають у доменній печі, і не дозволяє повною мірою визначити роль окремих енергоносіїв у формуванні теплового потенціалу агрегату. Це пояснюється тим, що ті самі види енергоресурсів, зокрема природний газ, можуть використовуватися в доменному виробництві для різних цілей – як технологічне паливо, джерело тепла або елемент енергозабезпечення виробництва.

Жоден із видів енергії, що беруть участь у доменному процесі, не використовується повністю. Саме тому доменний газ, який відводиться через

колошник, містить значний запас теплової, хімічної та механічної енергії. Надалі цей енергетичний потенціал застосовують у межах технологічного циклу – для нагрівання доменного дуття, у системах енергозабезпечення підприємства – для отримання теплової енергії, а також для забезпечення роботи інших виробничих підрозділів, зокрема прокатних цехів, термічних відділень і господарсько-побутових об’єктів.

За даними різних досліджень, із доменним газом втрачається близько 32–39 % загальних енергетичних витрат доменного виробництва. Тому під час складання енергетичного балансу підприємства енергію доменного газу, що повторно використовується, необхідно враховувати як складову, що зменшує сумарні витрати енергоресурсів.

Одним із ефективних способів інтенсифікації доменної плавки є підвищення тиску газу в робочому просторі печі. Це дає змогу збільшити витрату дуття та одночасно знизити питомі витрати коксу. Крім того, зміна швидкості руху та піднімальної сили газового потоку у верхній частині печі сприяє істотному зменшенню винесення пилу. Найбільш помітний ефект досягається при підвищенні тиску під колошником до 0,16-0,18 МПа: продуктивність доменних печей зростає на 5-10 %, витрати коксу скорочуються на 2-5 %, а пиловинос зменшується на 35-50 %. Подальше збільшення тиску вже не забезпечує такого значного покращення показників.

Для виробництва електроенергії за рахунок надлишкового тиску доменного газу застосовують газоутилізаційні безкомпресорні турбіни (ГУБТ). Їхня потужність визначається режимом роботи доменної печі, а також витратою і тиском газу, який проходить через турбіну.

Ефективність експлуатації раніше встановлених ГУБТ часто обмежувалася недостатньою якістю залізорудної сировини, недосконалістю конусних завантажувальних пристроїв і роботою печей при зниженому тиску газу під колошником – менше 0,15 МПа (надлишкового). Важливу роль у підвищенні ефективності роботи турбін відіграє використання безконусних завантажувальних пристроїв (БЗП), які забезпечують стабільне підтримання

тиску газу на рівні до 0,2 МПа. Перехід доменних печей на режим роботи з підвищеним тиском під колошником також дозволяє скоротити винесення пилу на 35-50 %.

Практика використання газоутилізаційних безкомпресорних турбін (ГУБТ) у країнах пострадянського простору свідчить, що зниження ефективності їх роботи обумовлене не лише недостатнім тиском газу під колошником, але й рядом інших чинників. До них належать пропуск значної частини доменного газу – до 40 % – через дросельну групу, а також недосконаліть систем очищення газу.

Відомо коли на доменній печі були встановлені швидкодіючі повноконусні клапани, завдяки яким увесь потік доменного газу спрямовується на ГУБТ без проходження через дросельну систему. Це дозволило повністю усунути втрати газу через дросельну групу. Крім того, на підприємстві успішно експлуатується газоутилізаційна турбіна радіального типу потужністю 25 МВт виробництва НЗЛ, яка працює на вологому доменному газі.

Досвід роботи цієї установки показав, що температуру вологого доменного газу перед турбіною можна підвищити з проєктних 40 °С до 55–65 °С. Унаслідок цього вироблювана потужність збільшується на 10–18 %, що пояснюється зростанням масової витрати та вологості газу, а також використанням прихованої теплоти, яка виділяється під час конденсації водяної пари в турбіні.

За умови стабільної роботи доменних печей і підтримання тиску доменного газу на колошнику в межах 0,18-0,22 МПа (надлишкового) економічна доцільність застосування ГУБТ визначається витратами на її встановлення та обсягом виробництва електроенергії.

Розрахунки потужності ГУБТ для доменних печей об’ємом від 1386 до 5000 м³ виконувалися за таких умов: тиск газу під колошником - не нижче 0,18 МПа (надлишкового), температура газу перед турбіною - 60 °С, втрати

тиску в системі газоочищення – 0,022 МПа, а надлишковий тиск очищеного доменного газу – 0,011 МПа.

Узагальнений розрахунок потужності турбін здійснювали для політропного процесу з урахуванням конденсації водяної пари. При цьому були прийняті такі значення коефіцієнтів корисної дії: ККД турбіни – 0,86, ККД турбогенератора – 0,975.

Для оцінювання потужності газоутилізаційної безкомпресорної турбіни (ГУБТ), яка працює на енергії надлишкового тиску доменного газу, застосовують рівняння політропного розширення газу з урахуванням ККД турбіни та генератора:

$$N = \dot{m}\,\eta_т\,\eta_г\,\frac{n}{n-1}\,R\,T_1\left[1-\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right],$$

де N– електрична потужність ГУБТ, Вт;

$\dot{m}$– масова витрата доменного газу, кг/с;

$\eta_т$– коефіцієнт корисної дії турбіни ($\eta_т = 0{,}86$);

$\eta_г$– коефіцієнт корисної дії турбогенератора ($\eta_г = 0{,}975$);

n– показник політропи;

R– газова стала доменного газу, Дж/(кг·К);

T_1– абсолютна температура газу перед турбіною, К;

P_1– абсолютний тиск газу перед турбіною, Па;

P_2– абсолютний тиск газу після турбіни, Па.

З урахуванням наведених умов:

$$P_1 = P_{кол} + P_{атм} - \Delta P_{го},$$

де $P_{кол} = 0{,}18$МПа – надлишковий тиск під колошником;

$\Delta P_{го} = 0{,}022$МПа – втрати тиску в системі газоочищення;

$P_{атм} = 0{,}1013$МПа – атмосферний тиск.

Тоді

$$P_1 = 0{,}18 + 0{,}1013 - 0{,}022 = 0{,}2593 \text{ МПа}.$$

Тиск після турбіни:

$$P_2 = P_{атм} + P_{зал},$$

$P_{зал} = 0{,}011$ МПа,

Звідки

$P_2 = 0{,}1013 + 0{,}011 = 0{,}1123$ МПа.

Температура газу перед турбіною:

$T_1 = 60 + 273 = 333$ К.

Загальний коефіцієнт корисної дії установки:

$\eta = \eta_т \cdot \eta_г = 0{,}86 \cdot 0{,}975 = 0{,}839.$

Отже, математична залежність для визначення потужності ГУБТ з урахуванням політропного розширення доменного газу набуває вигляду:

$$N = 0{,}839\, \dot{m}\, \frac{n}{n-1}\, R\, 333 \left[1 - \left(\frac{0{,}1123}{0{,}2593}\right)^{\frac{n-1}{n}}\right].$$

Результати розрахунків заносимо до таблиці 2.1

Таблиця 2.1 – Значення потужності, яку виробляє ГУБТ

Параметр	Режими роботи печей					
Об'єм печі, $м^3$	1386	1513	1719	2000	2700	5000
Витрата газу, за норм. умов, тис. $м^3$/год	220	240	270	310	370	800
Тиск газу на колошнику (надл.), МПа	0,18	0,18	0,2	0,2	0,22	0,22
Потужність, МВт	5,1	5,6	6,8	7,8	9,4	21,6
Річне виробництво електроенергії , млн кВт	43,7	48,0	58,3	66,8	83,1	187,7

Для стабільної та ефективної експлуатації газоутилізаційних безкомпресорних турбін (ГУБТ) необхідно забезпечити високий ступінь очищення доменного газу. Залишковий вміст пилу після газоочищення не повинен перевищувати 4 мг/м³. Водночас на очисні споруди від доменних печей надходить колошниковий газ із концентрацією пилу в межах 10–20 г/м³ та температурою від 150 до 350 °С.

Дослідження, проведені фахівцями УкрДНТЦ «Енергосталь» на низці металургійних підприємств України, засвідчили, що кількість пилу, винесеного з доменної печі, становить у середньому 35–45 кг на кожну тонну виплавленого чавуну. Такий показник більш ніж удвічі перевищує середній рівень, характерний для металургійних підприємств країн Європи, де він становить близько 17,5 кг/т. За складом колошниковий пил подібний до шихтових компонентів і містить значну кількість заліза — орієнтовно 35–45 %.

На сучасних доменних агрегатах для очищення газу застосовуються багатоступеневі системи, до складу яких входять сухі пиловловлювачі радіального типу та мокрі газоочисні апарати (скрубери), що забезпечують ефективне видалення твердих частинок із газового потоку.

Екологічний ефект від використання ГУБТ визначається насамперед зниженням обсягів викидів парникових газів. Оскільки основним джерелом таких викидів у металургійному виробництві є процеси спалювання палива, утилізація енергетичного потенціалу доменного газу для виробництва електричної енергії дає можливість скоротити витрати природного газу, який в іншому випадку був би використаний для отримання аналогічної кількості електроенергії.

Оцінювання скорочення викидів парникових газів у перерахунку на CO_2-еквівалент здійснюється на основі обсягів електроенергії, виробленої газоутилізаційними турбінами, а також кількості природного газу, заощадженого внаслідок їх впровадження. Результати таких розрахунків для доменних печей різного корисного об'єму наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Емісія парникових газів при установці ГУБТ

Параметр	Режими роботи печей					
Об'єм печі, $м^3$	1386	1513	1719	2000	2700	5000
Річне виробництво електроенергії , млн кВт	43,7	48,0	58,3	66,8	83,1	187,7
Кількість зекономленого природного газу, млн $м^3$/год	4,8	5,26	6,39	7,33	8,83	20,3
Зменшення емісії парникових газів, тис. год	16,3	17,9	21,8	25	30,1	69,1

Аналіз наведених даних свідчить, що впровадження газоутилізаційної безкомпресорної турбіни з одночасним виробництвом електроенергії є технічно та економічно обґрунтованим рішенням. Для ефективної роботи установки необхідно забезпечити стабільний режим функціонування доменної печі, зокрема підтримання тиску газу під колошником на рівні не нижче 0,18 МПа.

Крім того, екологічна ефективність застосування ГУБТ пов’язана зі зниженням емісії парникових газів завдяки стабілізації та підвищенню тиску у верхній зоні доменної печі. Постійний тиск покращує газодинамічні умови всередині агрегату, сприяє більш ефективному відновленню заліза, зменшує питому витрату коксу та, за незмінних обсягів виробництва, забезпечує економію всіх видів палива, включаючи природний газ.

Принципову схему включення ГУБТ (ДДГ) у технологічний цикл металургійного підприємства наведено на рис. 2.3.

Доменний газ, що утворюється під час виплавки чавуну в доменній печі, після проходження систем сухого пиловловлення та мокрого очищення (скрубера) подається на вхід турбодетандера. Газ, що вже відпрацював у турбіні, спрямовується до загального колектора газорозподільної мережі заводу. Запуск установки ДДГ здійснюється через пусковий регулюючий клапан, який після синхронізації генератора з електромережею та відкриття основного швидкодіючого клапана переводиться у закритий стан.

У режимі простою або при непрацюючій турбіні доменний газ надходить у заводську газову мережу через дросельну групу клапанів і основний байпасний швидкодіючий клапан.

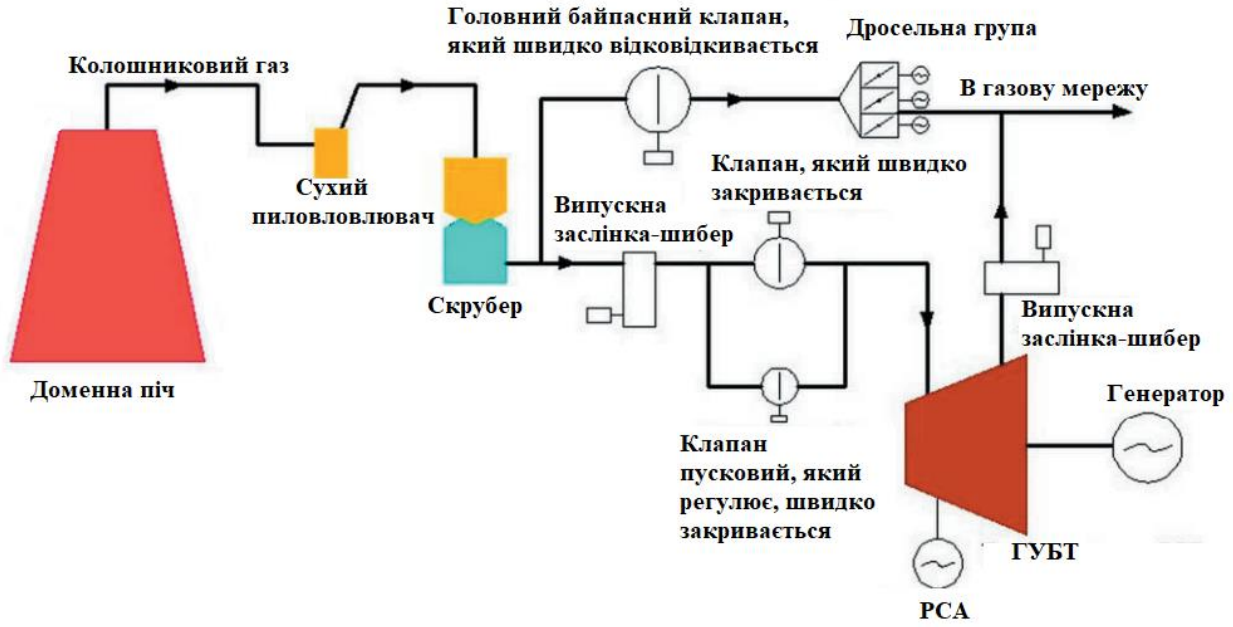


Рисунок 2.3 – Принципова схема включення ГУБТ

Отже, використання ГУБТ дозволяє:

- зменшити споживання електроенергії з зовнішніх джерел;
- скоротити витрати палива на ТЕЦ;
- підвищити енергоефективність доменного виробництва;
- знизити питомі викиди CO_2.

Крім ГУБТ, вторинні енергоресурси можуть використовуватися шляхом спалювання очищеного доменного газу в котлах-утилізаторах та теплоелектроцентралях для виробництва електричної і теплової енергії.

Таким чином, утилізація енергії доменного газу є важливим елементом декарбонізації сучасної металургії та підвищення енергетичної ефективності підприємств.

2.3 Аналіз конструкцій існуючих ГУБТів

Газоутилізаційна безкомпресорна турбіна типу ГУБТ-25 (рис. 2.4) спроєктований з підведенням газу в радіальному напрямку через равликовий повітропідведення і з поділом потоку газу на дві протилежні сторони.



Рисунок 2.4 – Загальний вигляд ГУБТ-25

Використання зазначеної конструктивної схеми дало змогу значно знизити габаритні розміри основних елементів турбіни, зокрема зменшити діаметр дисків і висоту робочих лопаток. Так, висота лопаток першого ступеня становить близько 300 мм. Разом із тим радіальна подача газу до турбіни поступається осьовій за рівномірністю розподілу потоку на вході до перших ступенів, що може призводити до певних нерівномірностей газодинамічних характеристик.

Корпус статорної частини виконано з горизонтальним рознімання, що спрощує монтажні роботи, технічне обслуговування та проведення ремонтів. Для опори ротора застосовані виносні підшипники ковзання, які забезпечують більш надійну роботу системи мащення порівняно з турбодетандерами меншої потужності, де підшипникові вузли розташовані всередині корпусу. Таке технічне рішення мінімізує ймовірність проникнення мастила в проточну частину агрегату та усуває необхідність очищення маслоповітряної суміші від азоту.

Симетричне розміщення двох турбінних секцій на одному валу дозволяє практично повністю компенсувати осьові навантаження, що виникають під час роботи установки, без застосування спеціальних пристроїв для їх урівноваження.

Для запобігання витіканню доменного газу за межі турбіни використовуються лабіринтові ущільнення, до яких подається азот із технологічної мережі. Робочий тиск азоту під час експлуатації становить приблизно 2,5 кгс/см², хоча проєктною документацією передбачено його значення на рівні 5–6 кгс/см². Додатково азот надходить до ущільнювальних вузлів поворотних лопаток регульованого соплового апарата. Практичні вимірювання показують, що сумарне споживання азоту системою ущільнень досягає близько 600 м³/год, що істотно перевищує розрахункове значення 150 м³/год.

Конструкцією агрегату передбачено систему гідравлічного підйому ротора перед пуском. Піднімання здійснюється за допомогою мастила, яке

подається спеціальним насосом під тиском близько 30 кгс/см², що забезпечує зменшення навантаження на опорні підшипники під час запуску.

Система мащення, спільна для турбодетандера та електрогенератора, а також гідравлічна система керування приводами клапанів і заслінок розташовані в окремому приміщенні допоміжного обладнання. Таке компонування сприяє підвищенню надійності роботи установки, полегшує доступ до обладнання та покращує умови його технічного обслуговування.



Рисунок 2.5 – Приміщення допоміжних систем ГУБТ-25

ГУБТ-8 і ГУБТ-12 за своїм конструктивним виконанням є практично ідентичними (рис. 2.6). Збільшення встановленої потужності з 8 до 12 МВт досягається шляхом підвищення витрати доменного газу, що проходить через проточну частину турбіни.

На відміну від установки ГУБТ-25, у цих агрегатів реалізовано осьове підведення доменного газу. Конструктивно вони виконані як двоступінчасті турбіни. Перший сопловий апарат може встановлюватися під фіксованим кутом, який задається відповідно до номінальної витрати газу.

Необхідний рівень тиску під колошником доменної печі забезпечується регулюванням положення діафрагми на вході в турбіну. У даній конструкції

турбодетандерів використовується двосторонній упорний підшипник ковзання (УПС).



Рисунок 2.6 – Загальний вигляд ГУБТ -8 (ГУБТ-12)

Соплові апарати першого та другого ступенів виконані з горизонтальними роз’ємами. Як опори ротора турбіни застосовано підшипники ковзання колодкового типу з горизонтальним рознімом, що належать до безвкладишної конструкції.

Через підігрів доменного газу перед подачею до ГУБТ-8 і ГУБТ-12 у змішувальному підігрівачі його температура на вході в турбіну є підвищеною (до 120 °С) порівняно з ГУБТ-25. Унаслідок цього під час розширення газу конденсація пари не відбувається, тому в процесі експлуатації основними регламентними операціями є регулярне промивання проточної частини (щодобово) та її періодичне очищення (щомісяця).

На рис. 2.7 показано конструктивне виконання (поздовжній розріз) розробленого детандера. Турбіна має двоступінчасту консольну схему з

регульованим сопловим апаратом на першому ступені, осьовим підведенням робочого середовища та відведенням відпрацьованого газу через равликовий газовідвід із низьким гідравлічним опором.

Регульований сопловий апарат (РСА) виконує функцію раціонального спрямування потоку доменного газу на робочі лопатки турбіни в широкому діапазоні витрат. Крім того, завдяки взаємодії із системою автоматизованого керування він забезпечує підтримання необхідного рівня тиску в підколошниковій зоні доменної печі та його коригування відповідно до технологічних вимог.

У конструкції агрегату застосовані опорні підшипники ковзання колодкового типу, які характеризуються підвищеною довговічністю та надійністю порівняно з підшипниками кочення. Особливості виконання ротора й опорних вузлів дають можливість відмовитися від системи попереднього гідравлічного підйому ротора перед запуском детандер-генератора, що дозволяє спростити конструкцію установки шляхом виключення додаткового гідравлічного обладнання, необхідного для ГУБТ-25.

Корпус соплового апарата має рознімну конструкцію, що значно полегшує технічне обслуговування та ремонтні роботи. Завдяки цьому у процесі експлуатації можна виконувати заміну соплових і робочих лопаток без проведення складних демонтажних операцій.

Для сприйняття осьових навантажень використовується двосторонній упорний підшипник колодкового типу. Така конструкція забезпечує надійну фіксацію ротора в осьовому напрямку як під час нормальної роботи установки, так і при переході генератора в режим електродвигуна, що може виникати залежно від режиму функціонування доменної печі.

Робочі лопатки турбіни, а також лопатки другого ступеня соплового апарата уніфіковані з елементами силової турбіни газотурбінного двигуна UGT-15000. Для зміни положення лопаток РСА використано механізм

повороту, запозичений із двигуна Д090, який є морською реверсивною модифікацією установки UGT-15000.

З метою запобігання проникненню доменного газу через ущільнювальні вузли поворотних лопаток і масляні порожнини передбачена система підпору ущільнень інертним середовищем. Для цього використовується азот, який створює необхідний бар'єрний тиск і підвищує герметичність системи.

Схеми очищення доменного газу, що традиційно застосовуються на більшості металургійних підприємств України, наведені на рисунках 2.8 та 2.9. Вони включають комплекс обладнання, призначений для видалення пилу та інших механічних домішок із газового потоку перед його подальшим використанням в енергетичних установках або технологічних процесах.

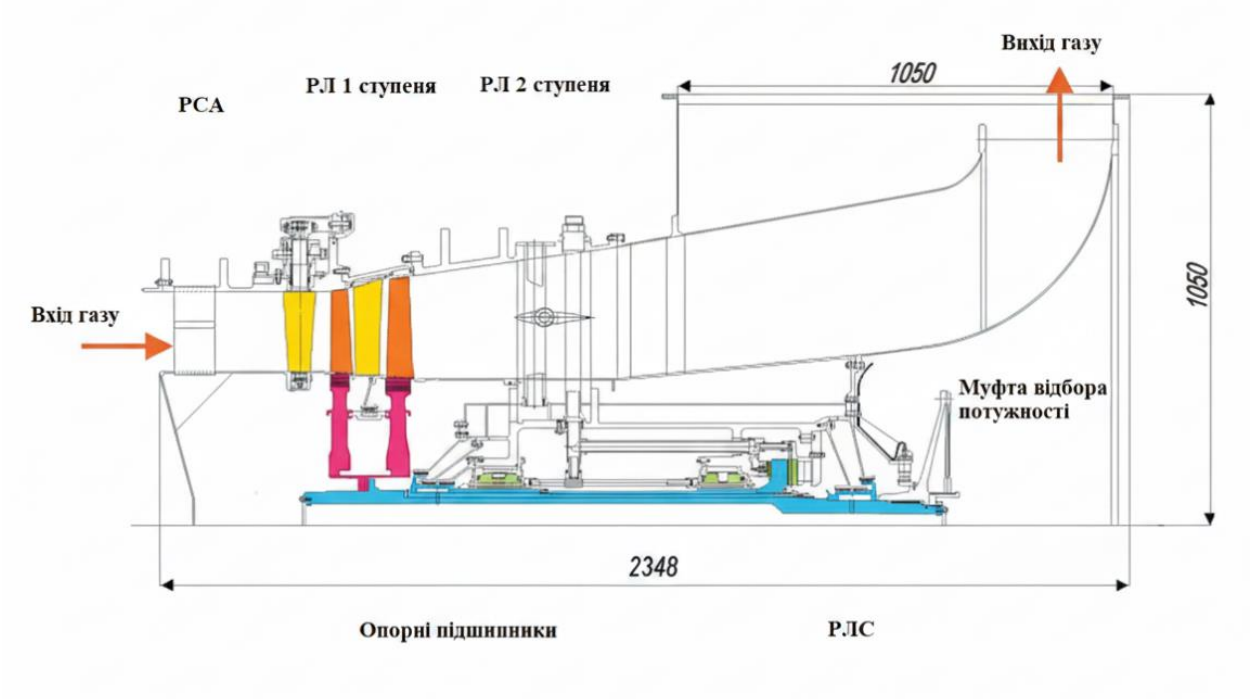
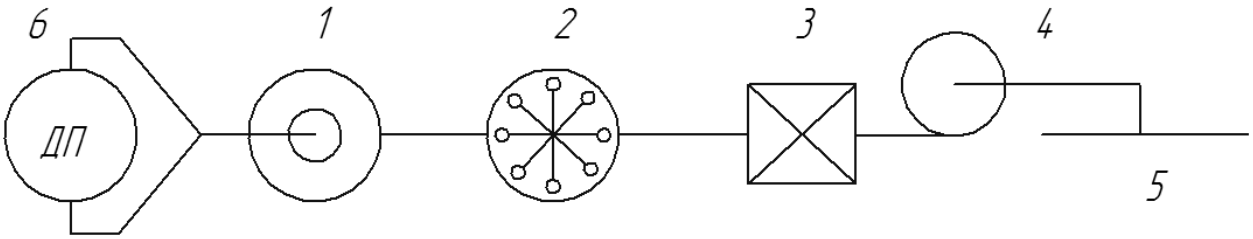


Рисунок 2.7 – Продольний переріз ГУБТ

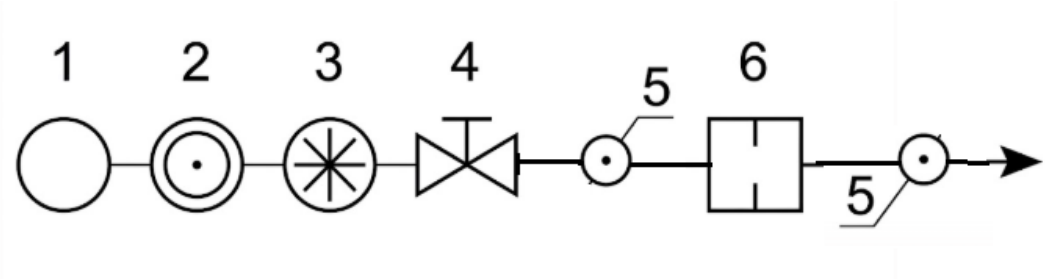
Таким чином, головним завданням системи очищення колошникового газу від пилу є зниження вмісту завислих речовин у газі до рівня не більше 4

мг/м^3 з максимальним збереженням його теплотехнічних властивостей, що впливають на ефективність використання доменного газу як паливо.



1 – сухий інерційний пиловловлювач; 2 – порожнистий форсунковий скрубер; 3 – дросельна група; 4 – краплевловлювач;5 – колектор «чистого» газу; 6 – доменна піч

Рисунок 2.8 – Схема комбінованої очистки доменного газу з використанням дросельної групи



1 – доменна піч; 2 – інерційний пилоосаджувач; 3 – порожнистий скрубер; 4 – труба Вентурі; 5 – краплевловлювач; 6 – дросельна група

Рисунок 2.9 – Типова схема комбінованої очистки доменного газу з використанням скрубера Вентурі

Колошникові гази з доменної печі (1) надходять на перший ступінь знепилювання, як найбільш часто використовують сухий інерційний пилоосаджувач або «пиловий мішок» (2). Його ефективність зазвичай не висока, проте для доменного газу становить 30-40%, дозволяючи на виході з даного апарату отримувати запиленість на рівні 6-8 г/м^3. Останнім часом як перший ступінь очищення використовує високоефективні циклони спеціальної конструкції, які дозволяють досягти ступеня знепилювання доменного газу на рівні 50-65%.

На другому ступені, доменний газ проходить порожнистий скруббер форсунок (3), в якому відбувається зрошення газу водою за допомогою евольвентних форсунок. Даний апарат є порожнистою циліндричною колоною висотою більше 20 м з розташованими по висоті ярусами зрошення. Вхід запиленого газу здійснюється в нижній частині скрубера, вихід зверху. Ефективність його роботи залежить від двох головних факторів - кількості води, що подається на зрошення, і ступеня її диспергування.

Так само має певний вплив швидкість газу в перерізі скрубера, проте вона є досить постійною величиною через сталість витрати газу. Запиленість колошникового газу після порожнього скрубера досягає 1,5-2,0 г/м^3.

Після скрубера, доменний газ потрапляє в наступний ступінь очищення, представлений скрубером (трубою) Вентурі (4) і краплеуловлювачем (5). Даний апарат відноситься до високоефективних і ступінь його очищення досягає 90-95% рівня залишкової запиленості газу 40-60 мг/м^3. Такі показники досягаються за рахунок високого гідравлічного опору Вентурі труби і високої швидкості руху газу, що дозволяє отримати високодисперсне дроблення крапель рідини.

Доочищення доменного газу у діючих схемах виконується в мокрій дросельній групі (6). Основне призначення цього вузла – підтримання стабільного тиску під колошником доменної печі, що забезпечується роботою кількох дроселів грубого та тонкого регулювання. Водночас, через значну швидкість газового потоку в звуженнях дроселів і попереднє зволоження водою, дана система фактично виконує також функцію додаткового очищення, забезпечуючи зниження запиленості колошникового газу до рівня приблизно 4-6 мг/м³.

Разом з тим, така «мокра» технологія має суттєві недоліки. У процесі її роботи утворюється значна кількість шламів, що потребує організації замкненого оборотного водопостачання. Це підвищує експлуатаційні витрати та створює ризики вторинного забруднення шламовими стоками. Крім того, мокре очищення не забезпечує стабільно низького вмісту пилу в очищеному

газі: у різні періоди експлуатації його концентрація може змінюватися в межах 5-6 до 45–70 мг/м³, що негативно впливає на роботу паливоспоживального обладнання та стан футеровки котлів і повітронагрівачів.

Після проходження мокрої очистки погіршуються й теплотехнічні властивості доменного газу, оскільки він набуває майже повної вологонасиченості, що знижує його фізичну та хімічну теплоту згоряння. Додаткові труднощі також пов’язані з експлуатацією систем оборотного водопостачання та газових трубопроводів очищеного середовища.

З огляду на зазначені недоліки останніми роками активно розглядаються та впроваджуються сухі системи очищення доменного газу, які позбавлені цих обмежень. Зокрема, на низці металургійних комбінатів Японії застосовувалися напірні тканинні фільтри, що забезпечували стабільне очищення газу до рівня не вище 4 мг/м³.

Перехід до «сухої» схеми очищення має низку суттєвих переваг:

1. Виключається необхідність оборотного водопостачання, шламових господарств, насосних станцій і відстійників;
2. Уловлений пил отримується у сухому вигляді, що значно спрощує його подальшу утилізацію;
3. Очищений газ зберігає кращі теплотехнічні характеристики, що підвищує ресурс роботи пальникового обладнання;
4. Сухий доменний газ, який має достатню температуру та тиск, може ефективно використовуватися для виробництва електроенергії в ГУБТ.

Додатково слід зазначити, що заміна мокрого очищення на сухе підвищує загальну енергоефективність системи. На відміну від скруберів, сухі установки не спричиняють значного охолодження газу, завдяки чому зберігається його теплотворна здатність. Це дозволяє ефективніше використовувати доменний газ як паливо в інших агрегатах, зокрема в повітронагрівачах (кауперах), та зменшувати споживання природного газу.

Як пиловловлюючий апарат у системі сухого очищення, відповідно до вимог надійності та ефективності, обрано рукавний фільтр типу ФРО.

Отже, проєктована система очищення доменного газу включатиме радіальний пиловловлювач, рукавний фільтр, газоутилізаційну безкомпресорну турбіну та дросельну групу. У разі підвищення температури газу понад 190 °С передбачено впровадження системи її регулювання перед апаратами очищення.

3 ПРОЄКТНИЙ РОЗДІЛ

3.1 Розрахунок першої ступені очищення - радіального пиловловлювача

Розраховуємо радіальний пиловловлювач (рис. 3.1).

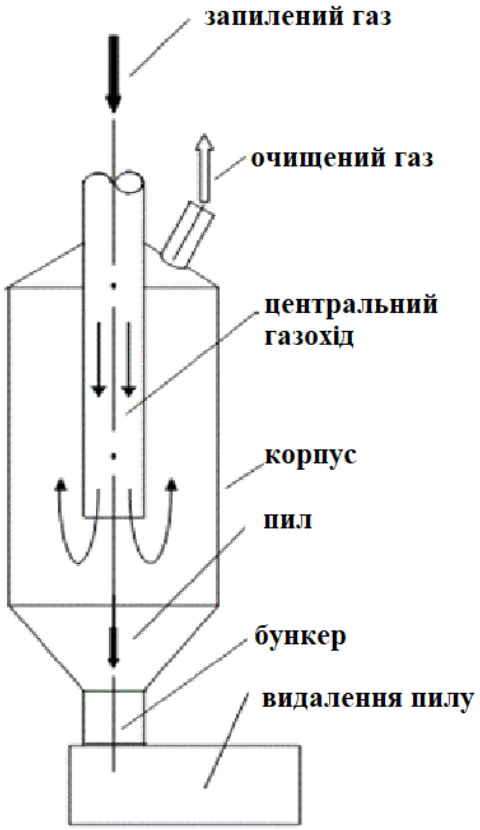


Рисунок 3.1 – Радіальний пиловловлювач

Для розрахунку приймаємо такі вихідні дані:

температура на вході в пиловловлювач 245 °С;

витрата доменного газу за нормальних умов 248000 м^3/год;

запиленість на вході в радіальний пиловловлювач 20 г/м^3;

тиск на колошнику180 кПа;

щільність частинок пилу $\rho_ч$ = 3390 кг/м^3.

Склад газу: CO_2 – 11,3% CO – 29%, CH_4 – 0,2%, H_2 – 4,3%, O_2 + N_2 – 55,2%.

Приймаємо фракційний склад пилу, який наведено в таблиці.

Таблиця 3.1 – Дисперсний склад пилу

Діаметр часток пилу, мкм	Більш 200	200-100	100-60	60-20	20-10	10-1	Менш 1
Масова частка, %	34,5	12,3	19,0	25,0	7,5	1,65	0,05

Враховуючи дисперсний склад пилу та за імовірнісно-логарифмічною координатною сіткою: dm = 72 мкм

Відповідно до заданого складу доменного газу визначаємо густину газовою суміші при 0 °С та тиску 101,3 кПа за формулою

$$\rho_{ог} = 0{,}01\ \Sigma\ \rho_i\ r_i, \qquad (3.1)$$

де ρ_i – густина і-го компонента газової суміші (доменного газу), кг/м^3;

r_i –вміст і-го компонента газової суміші, % об.

Визначаємо густину кожного компонента доменного газу за нормальних умов [9]:

ρ_{0CO2} = 1,96 кг/м^3;

ρ_{0CO} = 1,25 кг/м^3;

ρ_{0CH4} = 0,714 кг/м^3;

ρ_{0H2} = 0,089 кг/м^3;

ρ_{0N2} = 1,25 кг/м^3.

Тоді відповідно до формули (3.1) густина доменного газу за нормальних умов становить:

$$\rho_{ог} = 0{,}01\cdot(11{,}3\cdot1{,}96+29\cdot1{,}25+0{,}2\cdot0{,}714+4{,}3\cdot0{,}089+55{,}2\cdot1{,}25) = 1{,}279 \text{ кг/м}^3$$

Густина газової суміші за робочих умов, кг/м^3:

$$\rho_t = \rho_o \cdot (273 / 273 + t_r) \cdot (B + P_г / B_o), \quad (3.2)$$

де t_r – температура газу, °С, приймаємо $t_r = 245$°С;

В – атмосферний тиск, кПа, В=98 кПа;

B_0 – атмосферний тиск за нормальних умов, кПа, $B_0 = 101{,}3$ кПа ;

$P_г$ –тиск газу на колошнику доменної печі, $P_г = 180$ кПа;

ρ_0 – густина суміші газів за нормальних умов, кг/м^3.

Тоді підставляємо вихідні дані та дані, які отримані за формулою (3.1), отримуємо:

$$\rho_t = 1{,}279 \cdot (273 / (273 + 245) \cdot (98 + 180)/ 101{,}3) = 1{,}85 \text{ кг/м}^3$$

За заданої температури доменного газу визначаємо динамічний коефіцієнт в’язкості його і-го компонента, Па·с:

$$\mu = \mu_o \cdot (273 + C' / T + C') \cdot (T / 273)^{1,5}, \quad (3.3)$$

де μ_o – динамічний коефіцієнт в’язкості газу, Па·с, наведено втабл. 3.2;

C' – постійна Сезерленда, наведено в табл. 3.3.

Таблиця 3.2 – Динамічний коефіцієнт в’язкості газу компонентів доменного газу

Назва газу	Величина динамічний коефіцієнт в’язкості газу, Па·с
1	2
CO_2	$13{,}7 \cdot 10^{-6}$

Продовження табл. 3.2

1	2
CO	$16{,}6 \cdot 10^{-6}$
CH_4	$10{,}3 \cdot 10^{-6}$
H_2	$8{,}42 \cdot 10^{-6}$
N_2	$17 \cdot 10^{-6}$

Таблиця 3.3 – Постійна Сезерленда для складових доменного газу

Назва газу	Постійна Сезерленда
CO_2	254
CO	100
CH_4	164
H_2	73
N_2	114

Тоді, відповідно до формули (3.3):

$$\mu_{CO2} = 13{,}7 \cdot 10^{-6} \cdot ((273 + 254) / (245 + 254)) \cdot (245 / 273)^{1,5} = 12{,}301 \cdot 10^{-6} \text{ Па·с}$$

За формулою (3.3) визначаємо для інших компонентів динамічний коефіцієнт в’язкості:

$\mu_{CO} = 15{,}258 \cdot 10^{-6}$ Па·с

$\mu_{CH4} = 9{,}356 \cdot 10^{-6}$ Па·с,

$\mu_{H2} = 7{,}789 \cdot 10^{-6}$ Па·с,

$\mu_{N2} = 15{,}580 \cdot 10^{-6}$ Па·с

Визначаємо динамічний коефіцієнт в’язкості доменного газу:

$$\mu_г = 0{,}01 \cdot \Sigma\, \mu_i\, r_i, \text{ Па·с}, \qquad (3.4)$$

$\mu_г = 0,01 \cdot (12,301 \cdot 11,3 + 15,258 \cdot 29 + 9,356 \cdot 0,2 + 7,789 \cdot 4,3 + 15,580 \cdot 55,2) \cdot 10^{-6} = 14,769 \cdot 10^{6}$ Па·с

Перераховуємо динамічний коефіцієнт в'язкості доменного газу у коефіцієнт кінематичної в'язкості:

$\gamma_г = \mu_г / \rho_t = 14,769 \cdot 10^{-6} / 1,85 = 7,983 \cdot 10^{-6}$ м^2/с

Визначаємо можливе значення числа Рейнольдса для частинок пилу, якщо швидкість газу в радіальному пиловловлювачі W = 1 м/с.

$Re = 1 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} / 7,983 \cdot 10^{-6} = 16,2$

Оскільки отримане значення Рейнольдса знаходиться в інтервалі значень 10-100, то A = 16,8, а n = 0,6.

За умов стаціонарного ізотермічного процесу осадження пилових частинок під впливом сили тяжіння у висхідному газовому потоці, характерного для роботи радіальних пиловловлювачів, швидкість осадження (або швидкість витання) частинок відносно потоку газу, який їх переносить, визначається в м/с:

$$W = \left(\frac{g \cdot \rho_1 \cdot d_e^{n+1}}{0,75K \cdot A \cdot \rho \cdot \upsilon^n} \right)^{\frac{1}{2-n}}, \qquad (3.5)$$

де g – прискорення сили тяжіння, м/с^2;

ρ_1 – щільність несферичних частинок пилу, кг/м^3;

de – еквівалентний діаметр несферичних частинок пилу, м;

A – коефіцієнт форми частинок пилу;

A і n – коефіцієнти, які залежать від значення числа Рейнольдса;

ρ і ν – відповідно густина та кінематичний коефіцієнт в'язкості газу, кг/м^3

$$W = [9,81 \cdot 3390(1,3 \cdot 10^{-4})^{1,8} / ((0,75 \cdot 1,2 \cdot 16,8 \cdot 1,85 / 7,983 \cdot 10^{-6})^{0,8})]^{1 / 2-0,6} = 0,64 \text{ м/с}$$

Визначаємо величину числа Рейнольдса при швидкості вітання часток пилу, за умов, що W = 0,64 м/с.

$$Re = 0,64 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4} / 8,22 \cdot 10^{-6} = 10$$

Отримане значення критерію Рейнольдса узгоджується з раніше визначеними коефіцієнтами А та n, що дає можливість завершити розрахунок швидкості витання частинок.

Приймаючи середню швидкість руху газу в пиловловлювачі u = 0,64, визначимо необхідну площу поперечного перерізу апарата:

$$F = 47,63 / 0,64 = 74,42 \text{ м}^2$$

Визначаємо витрату доменного газу за робочих умов:

$$V = (248000 \cdot ((101,325(273 + 245) / 273 \cdot (98 + 180)))/3600 = 47,63 \text{ м}^3/\text{с}$$

Приймаємо, що $D^2/d^2 = 10$, одержуємо, площу перерізу радіального пиловловлювача, м^2:

$$F = \pi/4(D^2 - d^2) = \pi/4(10\, d^2 - d^2) = 9\pi/4d^2, \qquad (3.6)$$

відповідно

$$d = (4F/9\pi)^{0,5} = (4 \cdot 74,42 / 9 \cdot 3,14)^{0,5} = 3,25 \text{ м, приймаємо d= 3 м.}$$

$$D = \left(10d^2\right)^{0,5} = \left(10 \cdot 3^2\right)^{0,5} = 9,4м$$

приймаємо 9 м – зовнішній діаметр пиловловлювача

3 м – внутрішній діаметр пиловловлювача.

Висота циліндричної частини пиловловлювача:

$$H = 2D = 2 \cdot 9 = 18 \text{ м}$$

Висота конусної частини:

$$Нк = 0,5 \cdot D = 0,5 \cdot 9 = 4,5 \text{ м}$$

Загальна висота

$$H = H + 2H_к = 18 + 4,5 \cdot 2 = 27 \text{ м}$$

Ефективність затримання пилу в радіальному пиловловлювачі знаходиться в межах 60-70 %.

Відповідно, концентрацію пилу в газовому потоці після проходження першого ступеня очищення можна визначити як:

$$z_1 = z_2(1 - \eta) = 20\ (1 - 0,65) = 7 \text{ г/м}^3$$

Втрати тиску на радіальному пиловловлювачу буде становити 200 Па.

3.2 Розрахунок рукавного фільтра типу ФРО

Вихідні дані для розрахунку рукавного фільтру типу ФРО:

- об’ємна витрата доменного газу за нормальних умов 248000 м^3/год;
- температура газу попереду рукавного фільтру $t_г = 220$ °С;
- запиленість газу після радіального пиловловлювача $z_1 = 7$ г/м^3;
- фракційний склад пилу з урахуванням попередньої ступені очищення в радіальному пиловловлювачі наведено в табл.3.2.

Таблиця 3.2 – Фракційний склад пилу після радіального пиловловлювача

Розмір часток пилу, мкм	100-60	60-20	20-10	10-1	< 1
Масовий вміст часток, %	35,72	46,99	14,1	3,1	0,09

Обробка цих даних в імовірнісно-логарифмічній системі координат дозволила встановити медіанний діаметр часток пилу в газовому потоці - dm = 28,1 мкм .

Розраховуємо об'ємну витрату газу, який йде на рукавний фільтр за робочих умов (220 °С), м^3/год:

$$V_r=V_o((273+t_r)101,3/273(P_{раб}\pm P_r))$$

$$V_r =248000((273+220)101,3/273(98+180-0,2)) = 163310,1 \text{ м}^3/\text{год}$$

Густина газу за робочих умов становить ρ = 1,86 кг/м^3.

Перераховуємо за робочих умов динамічний коефіцієнт в'язкості:

$\mu_{CO} = 16,6\cdot10^{-6}(273 + 100 / 220 + 100) \cdot (220 / 273)^{1,5} = 0,00032$ Па·с

$\mu_{CO2} = 13,7\cdot10^{-6}(273 + 254/ 220 + 254) \cdot (220 / 273)^{1,5} = 0,00037$ Па·с

$\mu_{CH4} = 10,3\cdot10^{-6}(273 + 162/ 220 + 162) \cdot (220 / 273)^{1,5} = 0,00028$ Па·с

$\mu_{H2} = 8,42\cdot10^{-6}(273 + 73/ 220 + 73) \cdot (220 / 273)^{1,5} = 0,00023$ Па·с

$\mu_{N2} = 17\cdot10^{-6}(273 + 144/ 220 + 144) \cdot (220 / 273)^{1,5} = 0,000046$ Па·с

Тоді динамічний коефіцієнт в'язкості доменного газу за робочих умов, Па·с:

$\mu = 0,01 \cdot(0,00037\cdot11,3+0,00032\cdot29+0,00028\cdot0,2+0,00023\cdot4,3+0,000046\cdot55,2) =$

$= 77\cdot10^{-6}$ Па·с

Розраховуємо пористість шару пилу:

$$\varepsilon_n = 1 - 79\cdot d_m^{0,47}, \qquad (3.7)$$

де d_m – медіанний розмір часток пилу, м.

$$\varepsilon_n = 1 - 79\cdot(28{,}1\cdot10^{-6})^{0{,}47} = 0{,}427$$

Питомий гідравлічний опір тканини h_o, що віднесено до товщини, яка дорівнює 1 м, для склотканини $h_o = 8{,}4\cdot10^5$ Па

Значення коефіцієнтів А визначаємо за формулою:

$$A = 670\cdot10^{-6}(1 - \varepsilon_n)^2\ \varepsilon_{тк}^3\cdot h_o^{2/3} / d_m^{1{,}75}\cdot \varepsilon_n^3, \qquad (3.8)$$

де ε_n – пористість шару пилу;

$\varepsilon_{тк}$ – пористість тканини рукава, долі од., $\varepsilon_{тк}$= 55;

d_m – медіанний діаметр частинок пилу, d_m=28,1·10^{-6} м.

$$A = 670\cdot10^{-6}(1 - 0{,}427)^2\ 0{,}55^3\cdot (8{,}4\cdot10^5)^{2/3} / ((28{,}1\cdot10^{-6})^{1{,}75}\cdot(0{,}427)^3) = 3{,}77\cdot10^8\ м^{-1}$$

Коефіцієнт β розраховується по формулі:

$$\beta = 817(1 - \varepsilon_n) / d_m^2\cdot\varepsilon_n^3\cdot\rho_r, \qquad (3.9)$$

де ρ_r – щільність часток пилу, кг/м^3, ρ_r =3390 кг/м^3.

$$\beta = 817\cdot(1 - 0{,}427) / ((28\cdot10^{-6})^2\cdot 0{,}427^3\cdot 3390 = 2{,}15\cdot10^9$$

Визначаємо міжрегенераційний період:

$$t_ф = ((\Delta P_ф / \mu\omega_ф) - A) / \beta\cdot\omega_ф\cdot z_1, \qquad (3.10)$$

де $\Delta P_ф$ – гідравлічний опір фільтра, Па;

μ – динамічний коефіцієнт в'язкості доменного газу, Па·с;

$\omega_ф$ – швидкість фільтрування, м/с, за практичними даними $\omega_ф$ =0,025 м/с;

z_1 – запиленість газу попереду рукавного фільтру, г/м^3, z_1= 7 г/м^3.

Приймаємо гідравлічний опір рукавного фільтру $\Delta P_ф$=1500 Па

Тоді

$$t_ф = ((1500 / 77\cdot10^{-6} \cdot 0{,}025) - 3{,}77\cdot10^{-8}) / 2{,}15\cdot10^{9}\cdot0{,}025\cdot7\cdot10^{-3} = 2{,}05 \text{ год}$$

В рукавному фільтрі типу ФРО використовується для регенерації рукавів зворотню продувку. Зворотня продувка відбувається очищеним доменним газом. Визначаємо витрату газу, який використовується для зворотньої продувки:

$$V_р = 0{,}2 \cdot V_г, \qquad (3.11)$$

де $V_г$ – витрата доменного газу за робочих умов, м^3/год;

0,2 – коефіцієнт, який враховує об'ємну витрату очищеного доменного газу на зворотню продувку (дуття), дорівнює 20%.

$$V_р = 0{,}2 \cdot 163310{,}1 = 32662{,}02 \text{ м}^3\text{/год} = 9{,}07 \text{ м}^3\text{/с}$$

Тоді розраховуємо необхідну площу фільтрування за формулою:

$$F_ф = (V_г + V_р)/60\cdot q_ф, \qquad (3.12)$$

де $q_ф$ – допустиме газове навантаження на фільтр, $q_ф$=1,56 м^3/ м^2·хв, за даними каталогу газоочисних апаратів.

$$F_ф = (163310,1 + 32662,02)/(60 \cdot 1,56) = 2093 \text{ м}^2$$

Приймаємо до встановлення фільтр типу ФРО-2500 із площею фільтрування 2500 м^2. Конструктивно він складається з 12 секцій, містить 480 рукавів, при цьому висота одного рукава становить 8,07 м, а діаметр – 196 мм. Фільтри серії ФРО застосовуються для ефективного уловлювання різних видів пилу та конденсованих частинок у чорній і кольоровій металургії.

Ступінь очищення в рукавному фільтрі досягає 99,9 %, тому залишкову концентрацію пилу на виході з апарата (г/м³) визначають за формулою:

$$z_2 = z_1 \cdot (1 - 0,999) = 7 \cdot (1 - 0,999) = 0,007 \text{ г/м}^3$$

де z_1 – вміст пилу в газі перед рукавним фільтром, г/м^3

Отже, рівень запиленості газу після проходження системи газоочищення відповідає нормативним вимогам, необхідним для стабільної та безпечної експлуатації ГУБТ.

3.3 Вибір та розрахунок ГУБТ

Визначаємо тиск доменного газу на вході в турбіну, кПа:

$$Р_т = Р_т - Р_{тр}, \qquad (3.13)$$

де $Р_т$ - тиск газу на колошнику доменної печі, кПа;

$Р_{тр}$ – повний розрахунковий опір газовідвідного тракту, кПа, за табл. 3.5

$Р_т = 180 - 2,1 = 177,9$ кПа

Робота, яку здійснює газ в турбіні, кДж/кг:

$$1 = i_{нт} – i_{вт} = (C_{рнт} \cdot t_{нт} - C_{рвг} \cdot t_{вт}) \cdot \eta_т, \quad (3.14)$$

де $C_{рнт}$, $C_{рвг}$ – теплоємність суміші газу на виході і вході турбіни, відповідно, кДж/кг·град;

$i_{нт}$, $i_{вт}$ – ентальпія доменного газу на вході в турбіну і на виході з неї, кДж/кг;

$t_{нт}$, $t_{вт}$ – температура газу на вході і на виході з турбіни, відповідно, ° С;

$\eta_т$ – коефіцієнт корисної дії турбіни.

Визначаємо середньоарифметичний показник ізотропи:

$$К_ф = К_{нт} + К_{вт} / 2, \quad (3.15)$$

де $К_{нт}$ – показник ізотропи, що відповідає $t_{нт}$ газу,

$К_{вт}$ – показник ізотропи, що відповідає $t_{вт}$ газа,

$$К_{нт} = C_{рнт} / C_{нт} = 1,389,$$

Приймаємо значення $К_{вт}$ трохи більшим, ніж $К_{нт}$, $К_{вт} = 1,396$.

Тоді:

$К_ф = 1,389 + 1,396 / 2 = 1,392$

Співвідношення тиску на початку та в конці розширення:

$$\varepsilon_n = P_{нт} / P_{вт}, \quad (3.16)$$

де $P_{нт}$ – тиск газу перед турбіною, МПа;

$P_{вт}$ – тиск газу на виході з турбіни, МПа.

$\varepsilon_n = 0,1773 / 0,115 = 1,54$

Величину температурного перепаду газу в турбіні Δt_{tur} задаємо як частку від абсолютної температури газу на вході в турбіну 493 К. Вона визначається залежно від ступеня розширення, тобто співвідношення тисків на вході та виході E_t, а також показника ізотропії:

$\Delta t_{тур} = 0,2202 \cdot 493 = 108,5°C$

Температура газу на виході з турбіни, °С:

$t_{вт} = t_{вт} - \Delta t_{тур} = 200 – 109 = 91°C$

Роботу газового потоку в турбіні розраховуємо за наступним виразом, кДж/кг:

$1 = 1,0241 \cdot 200 – 1,0153 \cdot 0,85 = 90$

Потужність турбінної установки визначається у кВт/год:

$$N = 1_т \cdot G_т / 3600, \qquad (3.17)$$

де $G_т$ – масова витрата газу, кг/г.

$G_т = \upsilon_o \cdot \rho_o = 248000 \cdot 1,279 = 317\ 192$ кг/г

$N = 90 \cdot 317\ 192 / 3600 = 7\ 929,8$ кВт/год

На основі розрахунку обираємо ГУБТ-8 (табл. 3.3)

Таблиця 3.3 – Технічна характеристика ГУБТ-8

Показники	Одиниці виміру	Значення
Абсолютний тиск газу:		
- перед турбіною	МПа	0,1779
- після турбіни	МПа	0,115
Температура доменного газу:		
- перед турбіною	°С	200
- після турбіни	°С	91
Витрата газу на турбіну	тис. нм^3/год	248
Потужність на клемах генератору	МВт	8
Внутрішній ККД турбіни	%	85
Маса турбіни	т	66

3.4 Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту (зворотня продувка)

Схема газовідвідного тракту наведена на рис. 3.4

Ділянка I (доменна піч – гравітаційний пиловловлювач).

Температура газу на колошнику $t_г = 245°C$.

Визначаємо густину газової суміші за умов її фактичної роботи:

$$\rho_t = 1,279(273/273 + 245) \cdot (98 + 180/101,3) = 1,85 \text{ кг/м}^3$$

Об’ємна витрата доменного газу на виході з печі, за робочих умов $Q_г = 45,3$ м^3/с.

Приймаємо довжину першої ділянки 1 = 90 м, а швидкість доменного газу в газоході становить W = 20 м/с.

Діаметр газопроводу на першій ділянці:

$$d = 1{,}13 \sqrt{\frac{Q}{W}}, \text{ м}, \tag{3.18}$$

$$d = 1{,}13 \sqrt{\frac{45{,}3}{20}} = 1{,}7 \text{ м}$$

Загальний розрахунковий опір газовідвідного тракту ΔР визначають як суму втрат тиску вздовж довжини потоку та втрат на місцевих опорах:

$$\Delta P = \Delta P_м + \Delta P_е, \text{ Па}, \tag{3.19}$$

де $\Delta P_е$ – втрати тиску по довжині, Па;

$\Delta P_м$ – втрати тиску на місцеві опори, Па.

Визначаємо втрату тиску газу по довжині газопроводу, Па:

$$\Delta P_е = \lambda \cdot (1/ d_е) \cdot \rho_г (W^2/2), \tag{3.20}$$

де λ – коефіцієнт Дарсі (тертя), приймаємо λ= 0,02, за практичними даними;

$d_е$ – еквівалентний діаметр газопроводу, м;

1 – довжина розрахункової ділянки, м;

W – швидкість доменного газу на розрахунковій ділянці газопроводу, м/с;

$\rho_г$ – густина доменного газу за робочих умов на розрахунковій ділянці, кг/м^3.

Розраховуємо втрати тиску на місцеві опори, Па:

$$\Delta P_м = \Sigma\xi \cdot W^2 \cdot \rho_г/2 \tag{3.21}$$

де ξ – коефіцієнт місцевого опору, залежить від виду місцевого опору;

W – швидкість доменного газу на розрахунковій ділянці газопроводу, м/с;

$\rho_г$ – густина доменного газу за робочих умов на розрахунковій ділянці, кг/м^3.

Визначаємо втрати тиску по довжині для ділянки І:

$$\Delta P_l = 0,02 \cdot 1,85 \cdot (90/ 1,7) \cdot (20^2/2) = 391,76 \text{ Па}.$$

Ділянка І має такі види місцевих опорів:

- вхід в трубу ξ=0,63;
- секційне коліно ξ=0,39;
- плавне розширення ξ=0,11

Тоді втрати тиску на місцеві опори на першій ділянці, Па:

$$\Delta P_м = 1,13 \cdot 1,85 \cdot 20^2/2 = 418,1 \text{ Па}$$

Аналогічним способом виконують розрахунок для всіх ділянок газового тракту. Отримані результати розрахунків заносять до таблиці 3.4.

Для подачі очищеного газу на зворотне дуття слід підібрати відповідне тягодуттєве обладнання:

$\Delta P = \Delta P_м + \Delta P_l = 418,1 + 391,75 = 809,85$ - враховуються місцеві опори газового тракту (4 плавних повороти на 90^0, вхід до каналу) і втрати по довжині.

Діаметр газопроводу 0,5 м, при швидкості руху газа 19,1 м/с.

Довжина ділянки 27 м.

Оскільки доменний газ транспортується під надлишковим тиском, при його відборі слід додатково враховувати повний напір вентилятора, який приймається на рівні 2 кПа.

Отже:

ΔР=809,85+2000=2809,85 Па.

Підбір димотяга здійснюється за результатами аеродинамічного розрахунку газовідвідного тракту. Його продуктивність $V_д$ приймають із запасом 10 % від розрахункового значення. У цьому випадку обсяг газів, що відсмоктуються димотягом з урахуванням підсмоктування повітря та з поправкою на барометричний тиск, визначається як:

$V_д = 1,1\ V_р \cdot 101,3/В = 1,1 \cdot 9,07 \cdot 101,3 / 98 = 10,31$ м^3/с = 37126,66 м^3/год.

Тиск, що розвивається димотягом і приведений до умов каталогу для його підбору, позначений як ΔР_кат, визначається за формулою:

$$_{\Delta}P_{кат} = 1,2\ _{\Delta}P_р \cdot К, \qquad (3.22)$$

де 1,2 – коефіцієнт запасу;

$_{\Delta}P_р$ – загальний опір газовідвідного тракту, Па;

К – коефіцієнт перерахунку для врахування температури газу, що наведена в каталозі.

Коефіцієнт перерахунку

$$К = (273 + t^{\circ}_г)\ 101,3\ \rho_{ог}/(\ (\ 273 + t^{\circ}_к)\ В\ \rho_{ог}\ ), \qquad (3.23)$$

де $t^{\circ}_г$ – температура доменного газу, °С;

$t^{\circ}_к$ – температура, до якої віднесено дані з каталогу, °С;

$\rho_{ог}$ – густина доменного газу за нормальних умов, кг/м^3;

Отже

$$К= (273 + 245) \cdot 101,3 \cdot 1,279/((273 + 70) \cdot 98 \cdot 1,273)=1,56,$$

$$_{\Delta}Р_{кат} = 1,2 \cdot 2809,85 \cdot 1,56 = 5260,04 \text{ Па}.$$

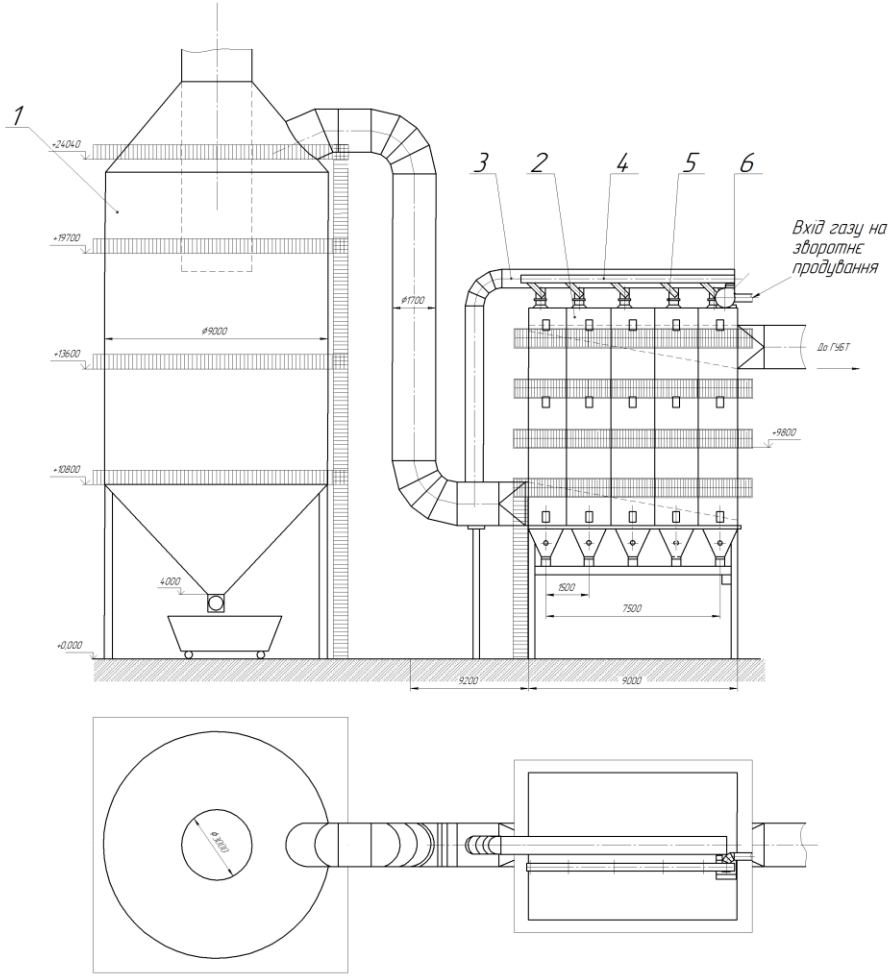
Обираємо 1 димотяг типу ВМ –15 продуктивністю 38 тис. м^3/год, повним тиском 7300 Па та потужністю 955 кВт.

Потужність димотяга, який використовується для зворотньої продувки:

$$\mathbf{N} = \frac{V_{кат} \cdot \Delta p_{кат}}{\eta_{кат} \cdot K} \cdot \mathbf{10^{-3}} = \frac{37126,66 \cdot 5260,04}{3600 \cdot 0,82 \cdot 1,56} \cdot \mathbf{10^{-3}} = 42,41 \text{ кВт}$$

Таблиця 3.5 – Результати аеродинамічного розрахунку газового тракту

№	Найменування	Q, м^3/с	$D_{ст}$, м	$U_ф$, м/с	$\rho_{ру}$, кг/м^3	l, м	ξ	ΔP_l, Па	$\Delta P_м$, Па
1	Піч-радіальний пиловловлювач	45,3	1,7	20	1,85	90			
	- вхід до труби						0,63		
	- секційне коліно						0,39		
	- плавне розширення						0,11	391,76	418,1
2	Радіальний пиловловлювач-рукавний фільтр	45,3	1,7	19,8	1,85	90			
	-конфузор						0,2		
	-поворот під кутом α = 50°						0,39		
	-два секційних коліна						0,78		
	-плавне звуження						0,03	383,4	507,7
3	Рукавний фільтр - ГУБТ	44,8	1,7	19,68	1,86	30			
	-плавне розширення						0,025		
	-два секційних коліна						0,78	127,12	289,9
	$Р_{р.п.}$=200Па; $Р_{р.ф.}$=1500Па	ΔР = 2117,98 Па							



1 - радіальний пиловловлювач; 2 - рукавний фільтр; 3 - збірний колектор;
4 - колектор зворотнього продування; 5 - дросельні засувки; 6 - вентилятор

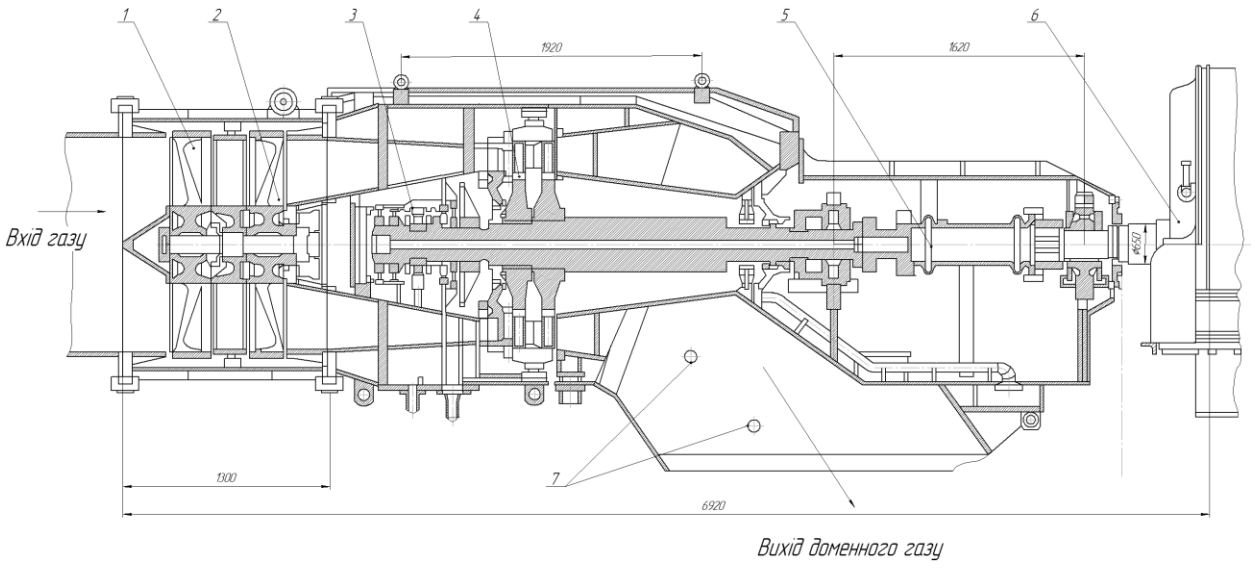
Рисунок 3.4 – Розріз запроєктованої системи очистки доменного газу

Таким чином, було підібрано та розраховано принципову схему очищення газу, що включає радіальний пиловловлювач і рукавний фільтр. Запропонована система забезпечує зниження концентрації пилу в очищеному газі до рівня 7 мг/м³ на виході.

Також виконано розрахунок газовідвідного тракту, сумарний гідравлічний опір якого становить 2117,98 Па. На основі отриманих результатів для виробництва електроенергії обрано установку ГУБТ-8.

3.5 Проєктування основного та допоміжного обладнання технології утилізації вторинних енергоресурсів

Для утилізації вторинних енергоресурсів в доменному цеху передбачено встановлення газоутилізаційної турбіни ГУБТ (рис.3.5). Газ виходить з доменних печей з високим тиском (190-250 кПа), і перш, ніж направити його на ТЕЦ, необхідно тиск знизити.



1 – регулюючий апарат; 2 – відсічний пристрій; 3 – підшипник; 4 – апарат, який направляє; 5 – муфта; 6 - регенератор; 7 - форсунка

Рисунок 3.5 – Газоутилізаційна безкомпресорна турбіна

З уведенням ГУБТ енергія тиску доменного газу використовується для обертання ротора турбіни й генератора, за рахунок чого виробляється

електроенергія. При цьому для виробництва енергії паливо не спалюється. Саме тому технологія виробітку енергії на ГУБТ вважається «зеленою».

Відповідно до розрахунків, наведених у п.3.2 для вироблення електроенергії з доменного газу за рахунок використання його енергії підвищеного тиску обрано ГУБТ-8.

Проходячи через проточну частину турбіни ГУБТ-8, доменний газ (ДГ), віддаючи енергію тиску, прохолоджується. При охолодженні газу пара, що перебуває в газі, частково конденсується й виділяється у вигляді крапельок вологи, яка віддаляється через конденсато-відвідник по ходу проходження доменного газу. Турбіна – чотириступінчаста, двопотокова. Регулювання турбіни здійснюється за допомогою поворотних напрямних лопаток перших ступенів обох потоків, призначених для зміни пропускної здатності проточної частини турбіни, залежно від витрати доменного газу, що проходить через турбіну. Вони управляються через поворотні кільця гідроциліндрами, які, у свою чергу, управляються або в режимі дистанційного керування, або в автоматичному режимі електронно-гідравлічною системою регулювання турбіни, яка здійснює підтримку на заданому рівні тиску газу під колошником доменної печі. Якщо вихід доменного газу перевищує пропускну здатність ГУБТ, передбачена схема регулювання газу за допомогою відкриття викідного клапану перед дросельною групою при повністю відкритих лопатках ГУБТ.

Продукти очищення газів доменних печей в основному використовуються в агломераційному виробництві, причому ступінь утилізації колошниковому пилу становить 98 %. Схеми переробки вловленого пилу з доменного газу наведені на рис.3.3.

Схема пилоприбирання передбачає безперервне вивантаження пилу з бункерів-накопичувачів кожної секції. Відсікання кожного бункера від системи пилоприбирання здійснюється за допомогою дискових затворів. Вловлений пил скребковими транспортерами, подається в загальний бункер-накопичувач пилу.

Пересипання пилу з поздовжніх бункерів на поперечний здійснюється через шлюзові живильники.

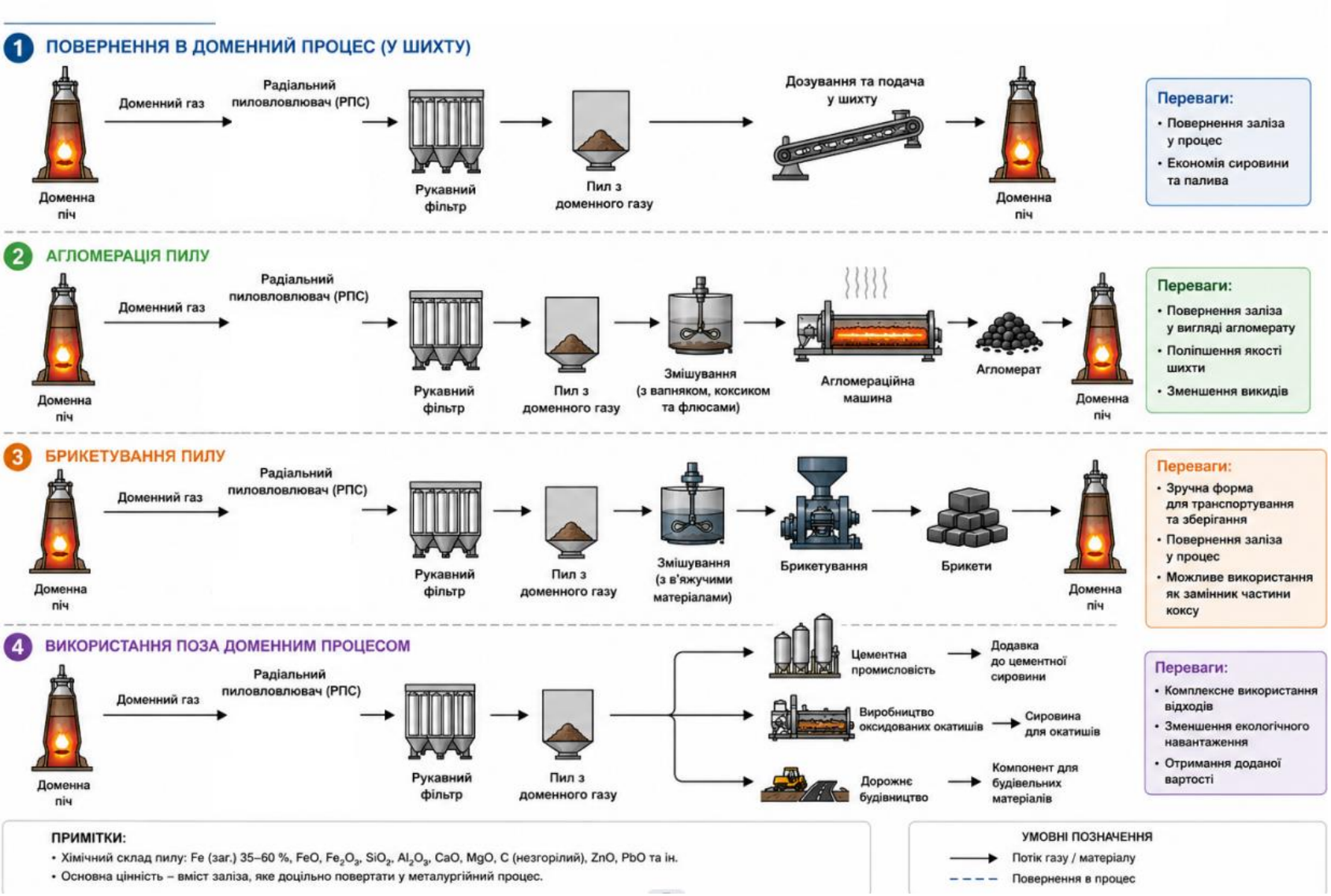
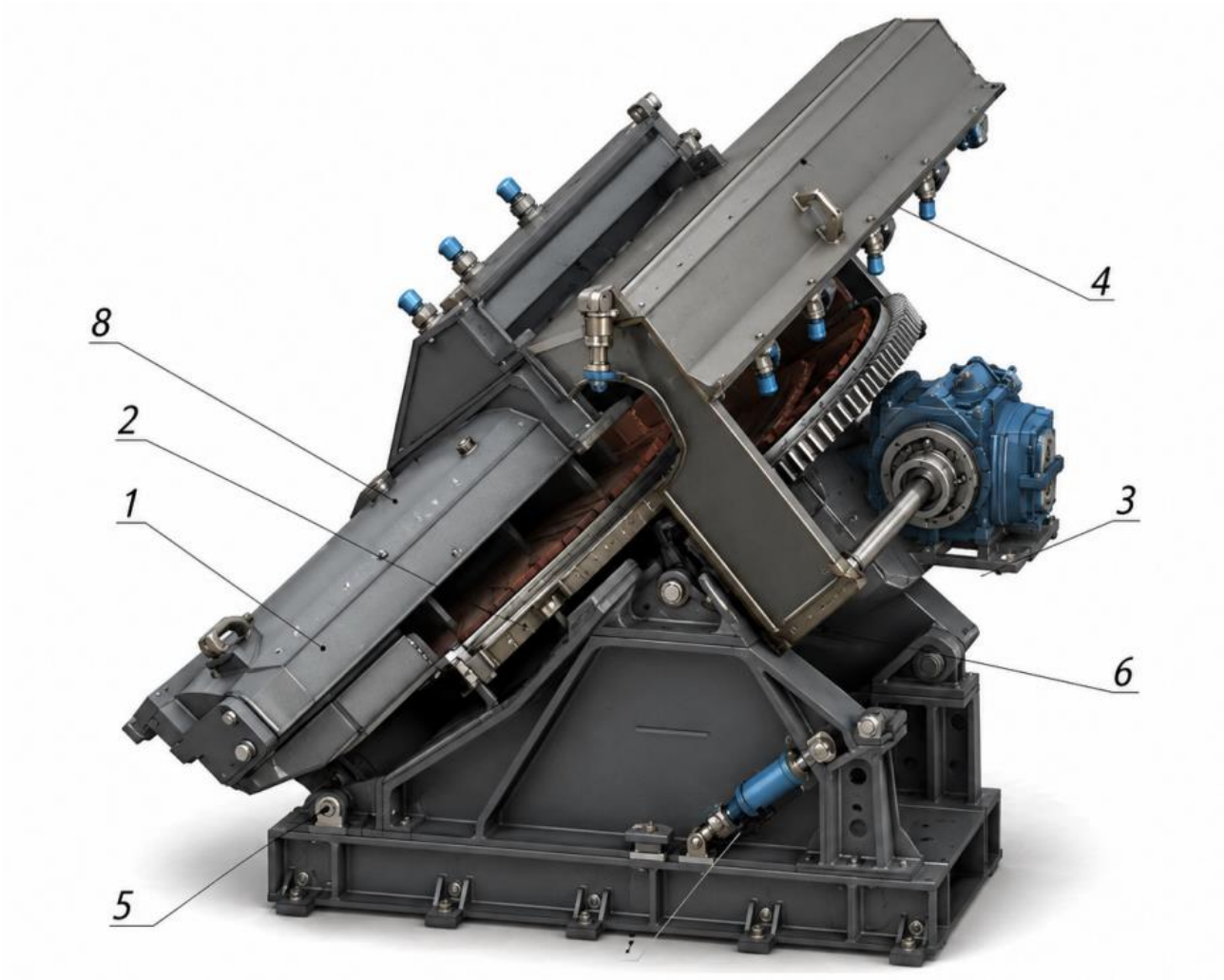


Рисунок 3.3 – Схеми переробки вловленого пилу з доменного газу

Пил з певною швидкістю по тічці живильника надходить на чашовий окомковувач (рис. 3.4), туди ж підведена технічна вода. Регулювання кількості води подаваної на зрошення, здійснюється вентилями, установленими перед кожною форсункою.



1 – чаша; 2 – зубчастий вінець; 3 – вал; 4 – кришка; 5 – станина; 6 – шарніра; 7 – гідродомкрат; 8 – форсунки

Рисунок 3.4 – Чашовий окомковувач

Окомковувач являє собою нахилену чашу діаметром близько 2 м, всередині якої розміщено два ножові елементи: один встановлений у днищі, другий – вертикально вздовж стінки. Обертання чаші здійснюється зі швидкістю приблизно 60 об/хв.

Пил, змішуючись із водою у заданому співвідношенні, в процесі обробки переходить у гранули (окатиші) необхідного розміру. У міру накопичення

готового продукту в чаші окомковувача окатиші пересипаються через її край і по лотку надходять на елеватор. Далі елеватором вони подаються до накопичувального бункера, звідки скребковим транспортером через телескопічний лоток завантажуються у залізничні вагони.

Шлаки, як і чавун, є кінцевими продуктами доменного процесу. Вони утворюються в печі з пустої породи рудної частини шихти, флюсових матеріалів та зольних компонентів коксу. Стабільність хімічного та фізичного складу сировини, палива і флюсів забезпечує рівномірний перебіг доменної плавки, а також однорідність властивостей чавуну і шлаку. Це має вирішальне значення для якості кінцевої продукції.

У процесі високотемпературних реакцій шлаки акумулюють значний запас теплової та хімічної енергії, що відрізняє їх від первинної мінеральної сировини. Доцільне використання цього потенціалу реалізується при виробництві гранульованих шлаків, пористих та щільних заповнювачів, а також шлакової вати.

Найпоширенішим способом переробки доменних шлаків є грануляція. Основним споживачем гранульованого шлаку є цементна промисловість, де він частково замінює дорогий клінкер.

Завдяки високій гідравлічній активності гранульований шлак використовується як мінеральна добавка до портландцементу (до 15 % маси) та інших видів цементів, а також як ключовий компонент шлакопортландцементу (до 60 %).

Шлакопортландцемент є гідравлічним в’яжучим матеріалом, що твердне як у водному, так і в повітряному середовищі. Його отримують спільним або роздільним тонким помелом клінкера, гіпсу (до 5 %) і гранульованого шлаку. Він широко використовується у виробництві бетонів, залізобетонних виробів, кам’яній кладці та штукатурних роботах. Бетони на його основі характеризуються підвищеною довговічністю, зносостійкістю та зменшеною усадкою під час твердіння.

Досвід вітчизняної та світової практики показує, що одним із найпростіших способів переробки рідких доменних шлаків є отримання литого щебеню, який використовується також для виробництва мінеральної вати за умови відсутності металевих домішок.

Рідкі доменні шлаки можуть служити сировиною для виготовлення легкого пористого заповнювача – шлакової пемзи. Її отримують шляхом обробки розплаву водяними струменями під тиском 0,6–0,8 МПа зі швидкістю 17–20 м/с. Процес спучування здійснюється на каскаді гідроринв із відбивними екранами, після чого маса надходить на конвеєр жолобчастого профілю, де завершується охолодження та кристалізація.

Мінеральна вата є волокнистим матеріалом, що отримується з силікатного розплаву, і широко застосовується у теплоізоляційній промисловості. Більша частина (понад 50 %) теплоізоляційних матеріалів виготовляється саме на її основі, зокрема для ізоляції поверхонь, що нагріваються до 700 °С. Вона є негорючою та має вищу довговічність порівняно з багатьма хімічними ізоляційними матеріалами.

Шлакове лиття являє собою штучний кристалічний матеріал, отриманий із розплаву з подальшим його охолодженням, кристалізацією та термообробкою. Вироби з нього відзначаються високою механічною міцністю, зносостійкістю та хімічною стійкістю.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Технологічний процес виплавки чавуну в доменних печах супроводжується впливом комплексу виробничих факторів, які можуть негативно позначатися на здоров'ї працівників та рівні безпеки праці. Найбільш характерними для доменного виробництва є підвищена температура повітря робочої зони, значне теплове випромінювання, запиленість атмосфери, шумове навантаження та дія вібрацій.

Доменний цех належить до гарячих виробництв, оскільки під час роботи печей у навколишнє середовище виділяються значні обсяги теплоти. Це спричиняє формування несприятливого мікроклімату та підтримання підвищених температур на робочих місцях персоналу. Додатковим джерелом негативного впливу є інтенсивне інфрачервоне випромінювання, яке створюється розплавленим чавуном, рідким шлаком, нагрітими поверхнями футеровки печі та відкритими технологічними отворами агрегату.

Під час виконання виробничих операцій працівники систематично перебувають у зоні дії теплового випромінювання. За результатами виробничих вимірювань його інтенсивність може досягати 560 Вт/м², що приблизно в чотири рази перевищує нормативне значення 140 Вт/м², встановлене вимогами ДСН 3.3.6.042-99. Тривале перебування в таких умовах призводить до надмірного навантаження на механізми терморегуляції організму, порушення водно-сольового балансу та погіршення функціонального стану працівника.

Вплив високих температур викликає швидке стомлення, зниження концентрації уваги та працездатності, що підвищує ймовірність виникнення нещасних випадків. Крім того, тривала дія теплових факторів може спричинити розвиток професійних захворювань, зокрема теплового виснаження, теплових ударів, судомних станів та уражень органів зору внаслідок інтенсивного інфрачервоного випромінювання.

Суттєву небезпеку для персоналу становить також пилове забруднення повітря робочої зони. У процесі завантаження шихтових матеріалів, випуску продуктів плавки та роботи газоочисного обладнання в атмосферу виробничих приміщень потрапляє значна кількість пилу. Концентрація доменного пилу може досягати 16–19 мг/м³, що більш ніж у чотири рази перевищує гранично допустимі значення.

Пилові частинки містять сполуки заліза та інші мінеральні компоненти, які характеризуються фіброгенною дією. Потрапляючи в організм через дихальні шляхи, вони викликають подразнення слизових оболонок, негативно впливають на шкіру та органи дихання. За тривалого професійного контакту можливий розвиток хронічних захворювань бронхолегеневої системи та інших патологій, пов’язаних із накопиченням пилу в легеневій тканині.

До важливих несприятливих факторів виробничого середовища належать шум та вібрація, які виникають унаслідок роботи доменних повітродувок, транспортних механізмів, кранового обладнання та інших технологічних установок. Рівень шуму на окремих робочих місцях досягає 86 дБА, перевищуючи нормативне значення 80 дБА.

Тривала дія шуму підвищеної інтенсивності негативно впливає на слуховий аналізатор людини та може стати причиною розвитку професійної приглухуватості. Крім цього, шумове навантаження викликає функціональні порушення центральної нервової системи, підвищену дратівливість, втому, зниження уваги та погіршення загального самопочуття працівників.

Вібрація в доменному виробництві проявляється меншою мірою порівняно з іншими шкідливими факторами. У більшості випадків її параметри не перевищують встановлених санітарних норм, однак за тривалої дії вона також може чинити негативний вплив на опорно-руховий апарат та нервову систему працівників.

Для зниження рівня професійних ризиків необхідно впроваджувати комплекс технічних та організаційних заходів. До них належать удосконалення систем вентиляції та аспірації, застосування теплових екранів, механізація та

автоматизація виробничих операцій, використання сучасних засобів індивідуального захисту, а також проведення регулярного контролю параметрів виробничого середовища. Важливим елементом профілактики професійних захворювань є систематичні медичні огляди працівників та контроль стану їхнього здоров’я.

Отже, умови праці персоналу доменного цеху характеризуються наявністю комплексу шкідливих і небезпечних виробничих факторів, серед яких домінують теплове навантаження, запиленість повітря та шум. Сукупний вплив цих факторів дозволяє віднести робочі місця горнових до категорії шкідливих і важких умов праці з підвищеним рівнем виробничого ризику.

4.2 Виробнича санітарія. Заходи з поліпшення умов праці

У виробничому цеху застосовується різнопланове обладнання, робота якого характеризується високим рівнем шумового навантаження, що негативно впливає на умови праці персоналу. Раціональне чергування періодів роботи та відпочинку в умовах підвищеного шуму є важливим заходом профілактики професійних захворювань. Тривалість перебування працівників у зоні дії шуму не повинна перевищувати 50–60 % робочої зміни.

Для зменшення негативного впливу надлишкових теплових виділень у доменному виробництві застосовують комплекс інженерних рішень, що включає природне та механічне вентилювання, а також системи аерації виробничих приміщень. Усі агрегати та поверхні, які є джерелами інтенсивного теплового випромінювання, повинні бути оснащені ефективною теплоізоляцією. Одним із найбільш результативних способів захисту персоналу від теплового опромінення є встановлення спеціальних екранів, дія яких ґрунтується на відбитті, поглинанні або відведенні теплової енергії.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого й трудового процесу

Професія: горновий

№	Фактори виробничого середовища й трудового процесу	Норматив. значення (ГДК, ГДУ)	Фактичне значення	III клас Шкідливі та небезпечні умови та характер праці			Тривалість дії фактора за зміну, %
				I ст.	II ст.	III ст.	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3 2 клас небезпеки марганцю оксиди 3 клас небезпеки азоту діоксид ангідрид сірчаний вуглецю оксид	 0,3 2,0 10,0 20,0	 0,28 1,6 6,8 13,5				80
2	Пил переважно фіброгенної дії, мг/м^3	4	18,5		4,6 р		80
3	Вібрація (загальна і локальна), дБ	92	85				80
4	Шум, дБА	80	86	6			80
5	Мікроклімат в приміщенні в теплий період року						
	- температура повітря,°С	15-26	37			10	90
	- швидкість руху повітря, м/с	0,2-0,6	0,45	1,5р			90
	- відносна вологість повітря,%	<75	44				
	- інфрачервоне випромінювання,	140	560		560		90
6	Важкість праці	3	3				

Засоби індивідуального захисту працівників гарячих цехів мають відповідати підвищеним вимогам щодо термостійкості. Спеціальний одяг повинен надійно захищати від впливу високих температур і теплових потоків, мати достатню механічну міцність та водночас забезпечувати комфортні умови роботи завдяки належній повітропроникності.

Під час виконання робіт у середовищі з високою температурою організм людини інтенсивно втрачає рідину через потовиділення. Це може спричинити порушення водно-сольового балансу, збільшення в’язкості крові та погіршення функціонування серцево-судинної системи. Для запобігання

таким наслідкам необхідно забезпечити своєчасне поповнення втрат рідини та мінеральних речовин. З огляду на те, що разом із потом організм втрачає солі та вітаміни, працівникам рекомендується вживати слабосолону газовану воду з концентрацією хлориду натрію близько 0,5 %. Орієнтовна норма споживання такої води становить 4–5 літрів протягом робочої зміни на одного працівника.

Важливою умовою підтримання працездатності персоналу є забезпечення нормативних параметрів мікроклімату. Стан повітряного середовища визначається його температурою, відносною вологістю, швидкістю руху повітря та хімічним складом. Підтримання цих показників на допустимому рівні здійснюється за допомогою систем вентиляції та опалення, спроєктованих відповідно до вимог ДБН В.2.5-67:2013.

Для обмеження впливу виробничого шуму на робочих місцях персоналу передбачаються спеціальні технічні рішення. До них належать звукоізольовані кабіни та пульти керування, використання шумопоглинальних ущільнень на повітронагрівачах, а також монтаж шумоглушників у вентиляційних і повітропровідних системах.

Опалення виробничих приміщень доменного цеху, як правило, виконується у вигляді повітряної системи, поєднаної з припливною вентиляцією. Подача очищеного та підготовленого повітря здійснюється централізованими припливними установками великої продуктивності, які об’єднуються в єдині вентиляційні комплекси.

Особливістю ливарного двору доменної печі є значна кількість надлишкового тепла, що потребує організації інтенсивного повітрообміну, особливо в літній період. Природна вентиляція забезпечується за рахунок різниці температур внутрішнього та зовнішнього повітря, а також дії вітрового напору. Для реалізації аерації у зовнішніх стінах будівлі передбачають спеціальні вентиляційні прорізи. Нижні отвори, призначені для надходження свіжого повітря в теплу пору року, розташовують на висоті до 1,8 м від рівня підлоги. Верхні отвори, які забезпечують повітрообмін

упродовж року, влаштовують на висоті не менше 4 м. Для підсилення природної тяги на покрівлі встановлюють аераційні ліхтарі.

Механічний повітрообмін у доменному цеху забезпечується системою централізованої вентиляції, до складу якої входять високопродуктивні вентиляторні установки, здатні підтримувати необхідні параметри повітряного середовища незалежно від зовнішніх умов.

Відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99 нормативні показники температури, вологості та швидкості руху повітря для робочих зон доменного цеху наведені в таблиці 5.2. Ці параметри є основою для оцінювання умов праці та визначення ефективності застосованих заходів захисту працівників від шкідливих виробничих факторів.

Таблиця 4.2 – Нормовані параметри повітряного середовища на ливарному дворі доменного цеху

Характеристика виробничих приміщень за надлишковими тепловиділеннями (більш або менш 23 Вт/м^3)	Категорія роботи по тяжкості	Період року (теплий, холодний)						Температура повітря поза постійних робочих місць, Т, °С	
		На постійних робочих місцях							
		Температура повітря, t, °С		Відносна вологість повітря, φ,%		Швидкість руху повітря, W, м/с			
		Опт.	Доп.	Опт.	Доп.	Опт.	Доп.	Опт.	Доп.
Більш 23 Вт/м^3	3 Важка	Холодний період							
		16-18	13-19	40-60	75	0,3	Не більше 0,4	19-22	12-20
		Теплий період							
		18-20	15-26	40-60	75	0,4	0,2-0,6	22-24	13-28

4.3 Електробезпека

З урахуванням особливостей технологічного процесу доменного виробництва виробничі приміщення цеху належать до категорії об’єктів із підвищеним рівнем електронебезпеки. Це пояснюється наявністю факторів, які підвищують ризик ураження електричним струмом, зокрема високою температурою навколишнього середовища, струмопровідними поверхнями

підлоги та можливістю одночасного контакту працівника з металевими елементами електроустановок і заземленими конструкціями будівлі (НПАОП 40.1-1.01-97).

Електрообладнання, що експлуатується в доменному цеху, працює від трифазної мережі змінного струму з напругою до 380 В. Для забезпечення безпечної експлуатації перед початком робіт необхідно виконувати перевірку технічного стану машин і механізмів, справності ручного інструменту, захисних огороджень, систем вентиляції та пристроїв заземлення.

У процесі виконання виробничих операцій персонал повинен неухильно дотримуватися вимог технологічних регламентів, правил безпечної експлуатації обладнання, вантажопідіймальних механізмів і внутрішньоцехового транспорту. Особлива увага приділяється підтриманню робочих місць у належному санітарному та безпечному стані.

У випадку виникнення нештатних або аварійних ситуацій працівники зобов’язані діяти відповідно до затверджених інструкцій з охорони праці та локалізації аварій, що дозволяє мінімізувати ризик травмування персоналу й запобігти розвитку небезпечних подій.

Виробничі дільниці повинні бути оснащені необхідними знаками безпеки, попереджувальними написами та інформаційними плакатами. Технологічне обладнання має відповідне сигнальне маркування, а транспортні маршрути та проїзди позначаються розміткою, яка забезпечує безпечне пересування працівників і транспортних засобів.

Експлуатація електротехнічного обладнання в умовах доменного цеху пов’язана з ризиком впливу електричного струму та електричної дуги. Небезпека може виникати як при безпосередньому контакті людини зі струмоведучими елементами, так і при наближенні до зони дії електричної дуги. З цієї причини для електроустановок напругою понад 1000 В передбачаються спеціальні інженерні та організаційні заходи захисту, спрямовані на недопущення випадкового дотику або небезпечного наближення до відкритих струмоведучих частин (ГОСТ 12.1.030-81 ССБТ).

Важливим чинником забезпечення електробезпеки є підтримання належного стану електричної ізоляції. Своєчасний контроль її параметрів дозволяє запобігати виникненню струмів витоку та аварійних режимів роботи електрообладнання. Додатковим заходом захисту в доменному цеху є застосування захисного занулення, яке забезпечує автоматичне відключення пошкоджених електроустановок та знижує ймовірність ураження персоналу електричним струмом.

4.5 Пожежна безпека

Найбільшу небезпеку в доменному виробництві становлять аварійні ситуації, пов’язані з вибухами доменного газу, а також неконтрольованим виходом, займанням або розбризкуванням розплавленого металу й шлаку. Подібні події мають особливо тяжкі наслідки, оскільки здатні миттєво створити загрозу для життя працівників і призвести до значних матеріальних збитків. Водночас ризик виникнення звичайних пожеж у доменному цеху порівняно невеликий, що пояснюється використанням переважно негорючих будівельних матеріалів та специфікою високотемпературних технологічних процесів.

Додатковим джерелом небезпеки є колошниковий пил, який транспортується разом із доменним газом. Його утворення пов’язане з термічними перетвореннями шихтових матеріалів та конденсацією летких сполук у газовому потоці. Особливістю такого пилу є його схильність до самозаймання, що може стати причиною вибухів і загорянь у газоочисних установках, пиловловлювачах та газопроводах.

Ефективне забезпечення пожежної та вибухової безпеки повинно передбачатися ще на стадії проєктування виробничих об’єктів і технологічних систем. Одним із ключових етапів є правильне визначення категорії приміщень та обладнання за вибухопожежною небезпекою. Відповідно до вимог НАПБ Б.03.002-2007, установки, що використовують

природний або коксовий газ, належать до категорії А. До категорії Б відносяться газоочисні комплекси, міжконусний простір колошникового пристрою, системи пиловугільного вдування та дільниці підготовки пилоподібного палива. Ливарний двір класифікується як категорія Г, оскільки тут виконуються операції з негорючими матеріалами, нагрітими до високих температур або переведеними в розплавлений стан, що супроводжується виділенням значної кількості теплоти, утворенням іскор та відкритого полум’я.

Для підвищення рівня безпеки кабельні споруди та електротехнічні приміщення оснащуються автоматичними системами виявлення пожежі. Прилади контролю та керування пожежною сигналізацією розміщуються в місцях постійного перебування чергового персоналу, що забезпечує оперативне реагування на виникнення небезпечних ситуацій.

Важливим елементом профілактики пожеж є належне утримання виробничих територій, своєчасне обслуговування технологічного обладнання та підтримання евакуаційних шляхів у вільному стані. Не менш значущим фактором залишається суворе виконання працівниками вимог технологічних інструкцій, правил охорони праці та норм виробничої дисципліни.

Для ліквідації можливих осередків займання на ранній стадії розвитку пожежі доцільно застосовувати установки газового пожежогасіння з дистанційним або механічним приводом запуску. Такі системи характеризуються високою ефективністю та дозволяють швидко локалізувати загоряння без пошкодження технологічного обладнання.

Відповідно до вимог НАПБ Б.03.001-2004 доменний цех повинен бути забезпечений необхідною кількістю первинних засобів пожежогасіння. До них належать повітряно-пінні та порошкові вогнегасники, вогнегасники типу ВВ-8, а також ящики із сухим піском та інший протипожежний інвентар.

Суттєве значення для підвищення рівня пожежної безпеки має систематична підготовка персоналу. Проведення планових інструктажів, протиаварійних тренувань і навчання діям у разі виникнення надзвичайних

ситуацій сприяє формуванню навичок швидкого реагування та дозволяє знизити вплив людського фактора на розвиток аварійних подій. У результаті комплексне впровадження організаційних і технічних заходів забезпечує надійний рівень пожежної та вибухової безпеки доменного цеху.

ВИСНОВКИ

В результаті теоретичних досліджень, проведених в кваліфікаційній роботі були розв’язані поставлені в роботі завдання та зроблено такі висновки:

1. Обґрунтовано, що встановлення ГУБТ з виробленням електроенергії є доцільним. При цьому необхідно забезпечити стабільний режим роботи доменної печі з тиском газу на колошнику не менш ніж 0,18 МПа.

2. Використання ГУБТ дозволяє: зменшити споживання електроенергії з зовнішніх джерел; скоротити витрати палива на ТЕЦ; підвищити енергоефективність доменного виробництва; знизити питомі викиди CO_2.

3. Встановлено, що вторинні енергоресурси можуть використовуватися шляхом спалювання очищеного доменного газу в котлах-утилізаторах та теплоелектроцентралях для виробництва електричної і теплової енергії.

4. Встановлено, що «сухий» доменний газ, який має достатню температуру та тиск, може ефективно використовуватися для виробництва електроенергії в ГУБТ.

5. Запроєктовано ефективну систему очищення доменного газу, що включає: радіальний пиловловлювач, рукавний фільтр типу ФРО-2500, ГУБТ-8. При зупинці ГУБТ на ремонт газ направляється в дросельну групу.

6. Рукавний фільтр забезпечує ефективність очищення газового потоку на рівні близько 99,9 %, при цьому залишкова запиленість не перевищує 7 мг/м³. Такі показники відповідають установленим вимогам до якості газу попереду ГУБТ.

7. Продукти очищення доменного газу переважно використовуються в агломераційному виробництві, при цьому рівень утилізації колошникового пилу сягає близько 98 %.

8. Найпоширенішим способом переробки доменних шлаків є грануляція. Основним споживачем гранульованого шлаку є цементна промисловість, де він частково замінює дорогий клінкер.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Україна наростила виробництво чавуну до довоєнного рівня і лишається у клубі індустріальних країн: аналітика. URL: https://surl.li/lnwnbl (дата звернення 30.04.2026).

2. CBAM (Carbon Border Adjustment Mechanism). URL: https://surl.li/pklgej (дата звернення 30.04.2026).

3. Ситников. В.В., Усатенко А.А. Створення енергозберігаючої установки для утилізації енергії доменного газу. *Східноєвропейський журнал передових технологій*. Вип. 4/5 (40). 2009. С.50-57.

4. Декарбонізація металургійної галузі. URL: https://bellona.org/news/ukraine/2017-07-dekarbonizatsiya-metalurhiynoyi-haluzi (дата звернення 05.05.2026).

5. HIsarna: A revolutionary Iron making process. URL: https://metalworldinsight.com/hisarna-a-revolutionary-iron-making-process/ (дата звернення 10.05.2026).

6. Чавунна справа: від роботи підмайстрів до технологічної досконалості. URL: https://metinvestholding.com/ua/media/article/chugunnoe-delo-ot-raboti-podmasterjev-do-tehnologicheskogo-sovershenstva (дата звернення 12.05.2026).

7. Крячко Г.Ю. Методичні вказівки до самостійної роботи з дисципліни «Теорія і технологія доменного процесу» для студентів напряму 6.050401 Металургія. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2014. 60 с.

8. Internal structure of a large blast furnace – Внутрішня структура працюючої доменної печі великого об’єму.png. URL: https://surl.li/tlqidv (дата звернення 12.05.2026).

9. Кожемякін Г.Б. Теоретичні основи та техніка захисту повітряного басейну: метод. вказівки до виконання курсового проекту та лабораторних робіт для студ. ЗДІА напряму 6.040106 «Екологія, охорона навкол.

середовища та збалансоване природокористування». Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 115 с.

10. Теорія та технологія доменного виробництва. URL: https://www.libr.dp.ua/text/kraj/1543234.pdf (дата звернення 10.05.2026).

11. Проектування об'єктів доменного виробництва. URL: https://mtechnology.com.ua/proektuvannya-obyektiv-domennogo-virobnictva/ (дата звернення 17.05.2026).

12. Доменна піч. URL: https://metinvest-smc.com/ua/articles/domennaya-pech-chto-eto-takoe-i-kak-ona-rabotaet/?srsltid=AfmBOorHP_B-I-z_rtv0kBRHRESOcMJAqZvzcDX-hLHYijZaxTbgq7Iv (дата звернення 15.05.2026).

13. Державні санітарні норми. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень/ М-во охорони здоров`я України. Головне сан.-епідем. упр, офіційне видання. Київ, 1999. 15 с.

14. Державні будівельні норми України. ДБН В.2.5-28-2006 Природне і штучне освітлення / Міністерство будівництва, архітектури та житлово-комунального господарства України, офіційне видання. Київ, 2006. 81 с.