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 *«Проєкт системи очищення конвертерних газів з частковим допалюванням»*

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1833

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

спеціалізації
_____
(шифр і назва)

Є.В. Кулик
_

Керівник доцент, к.т.н. Манідіна Є.А.

Рецензент доцент, к.т.н. Бєлоконь К.В.
(

Запоріжжя
2024

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 _____*другий магістерський 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*__

«____» _____2024 року

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

_____*Кулик Євген Володимирович*_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Проєкт системи очищення конвертерних газів з частковим допалюванням»_____
керівник роботи _____*Манідіна Євгенія Анатоліївна* *к.т.н, доцент*____
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від *"28"02* 2024 року *№ 359-с*
2. Строк подання студентом роботи _____*06.12.2024*_____
3. Вихідні дані до роботи *розробити систему очищення відхідних газів від кисневих конвертерів з частковим допалюванням, запронувати метод утилізації шламів системи газоочищення. Передбачити використання конвертерного газу в якості пилу.*
_____
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Вступ. Характеристика виробництва сталі в кисневo-конверторному виробництві. Системи відведення газів. Характеристика газів кисневo-конвертерного виробництва при різних режимах газовідведення. Аналіз систем газоочищення газів конвертерного виробництва. Проєктування системи очистки газів від кисневого конвертера з частковим допалюванням. Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту. Утилізація шламу газоочистки конвертерного газу. Охорона праці та техногенна безпека. Економічна частина. Висновки. Перелік джерел посилань.*_____
_____
_____
_____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
презентаційний матеріал на 10 слайдах (на 10 сторінках): основні апарати газоочищення

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Розділ 1	*Манідіна Є.А., доцент*	
Розділ 2	*Манідіна Є.А., доцент*	
Розділ 3	*Манідіна Є.А., доцент*	
Розділ 4	*Манідіна Є.А., доцент*	

7. Дата видачі завдання_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

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

Студент _____ *Євген КУЛИК*

Керівник роботи _____ *Євгенія МАНІДІНА*

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер _____ *Андрій ВАГІН*

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до кваліфікаційної роботи: 63 с., 9 табл., 7 рис., 13 джерел

КОНВЕРТЕРНЕ ВИРОБНИЦТВО, КОНВЕРТЕР, ЧАСТКОВЕ ДОПАЛЮВАННЯ, КОТЕЛ-ОХОЛОДЖУВАЧ, СКРУБЕР ВЕНТУРІ, СТРОК ОКУПНОСТІ

Об'єкт дослідження – виробництво сталі в конверторному виробництві.

Предмет дослідження – система газоочищення відхідних газів від кисневий конверторів з частковим допалюванням.

Мета кваліфікаційної роботи – розробити систему очищення відхідних газів від кисневих конвертерів з частковим допалюванням, запронувати метод утилізації шламів системи газоочищення.

Використання системи з частковим допалюванням дозволяє уникнути викидів газу в цех і підтримувати стабільну роботу системи. Є можливість використовувати теплоту та хімічну енергію конвертерного газу

Встановлено, що найкращою є система очищення конвертерного газу, що складається з таких складових: устаткування газовідведення з частковим допалюванням оксиду вуглецю, котла-утилізатора, порожнистого скрубера, скрубера Вентурі (першого та другого ступеня), димотяга, газгольдера та димової труби.

Визначено, що застосування котла-утилізатора дозволяє ефективно використовувати тепло конвертерних газів, отримуючи до 250 тонн на годину гострого пару.

Встановлено, що термін окупності інвестицій становить 4,6 року.

ЗМІСТ

ВСТУП ... 6
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА ... 8
1.1 Характеристика виробництва сталі в киснево-конверторному виробництві ... 8
1.2 Системи відведення газів ... 12
1.3 Характеристика газів киснево-конвертерного виробництва при різних режимах газовідведення ... 14
2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА ... 17
2.1 Аналіз систем газоочищення газів конвертерного виробництва ... 17
2.2 Проєктування системи очистки газів від кисневого конвертера з частковим допалюванням ... 22
2.3 Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту ... 34
2.4 Утилізація шламу газоочистки конвертерного газу ... 39
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА ... 44
3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів ... 44
3.2 Розробка заходів з покращення умов праці в конвертерному виробництві. Виробнича санітарія ... 47
3.3 Заходи з електробезпеки в конвертерному виробництві ... 50
3.4 Заходи з пожежної та техногенної безпеки ... 51
4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА ... 54
4.1 Аналіз економічної доцільності. Визначення капітальних витрат на систему очищення газів ... 54
4.2 Експлуатаційні витрати на очищення газу і вловлювання пилу ... 55
4.3 Техніко-економічне обґрунтування рішень, які прийняті у проекті ... 57
ВИСНОВКИ ... 60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ ... 62

ВСТУП

До основних сучасних видів сталеплавильних технологій відносять: киснево-конвертерне, електросталеплавильне. Більш застарілим способом виробництва сталі є мартенівське виробництво.

Киснево-конвертерний процес має низку суттєвих переваг перед електросталеплавильним і мартенівським способами виробництва сталі, що робить його провідним у сучасній металургії. А саме:

1. Висока продуктивність: киснево-конвертерний процес забезпечує швидкий хід плавки, зазвичай триває близько 30–50 хвилин. Для порівняння, електросталеплавильний цикл займає кілька годин, а мартенівський – до 8-12 годин. Завдяки цьому киснево-конвертерний метод дозволяє виробляти більші обсяги сталі за менший час.

2. Низькі витрати енергії: киснево-конвертерний процес використовує теплоту хімічних реакцій (вигоряння вуглецю, кремнію, марганцю), тому додаткові енерговитрати зведені до мінімуму. Електросталеплавильний спосіб вимагає значних обсягів електроенергії, що збільшує його вартість. У мартенівському способі витрачається багато енергоносіїв для підтримки температури.

3. Економічність сировини: киснево-конвертерне виробництво дає змогу використовувати дешевшу сировину, зокрема чавун і брухт. Електросталеплавильний спосіб потребує високоякісного металобрухту, що збільшує собівартість сталі. У мартенівському виробництві використовується великий обсяг палива, що підвищує загальні витрати.

4. Висока якість сталі: завдяки інтенсивному рафінуванню киснем досягається низький вміст домішок у сталі, таких як сірка та фосфор. Електросталеплавильний спосіб також дозволяє отримувати високоякісну сталь, але мартенівський процес менш ефективний у цьому аспекті.

5. Екологічна перевага: викиди CO_2 у киснево-конвертерному процесі менші, ніж у мартенівському. Хоча електросталеплавильний спосіб вважається

найбільш екологічним, киснево-конвертерний метод є більш вигідним з точки зору економічності при прийнятних екологічних показниках.

6. Простота автоматизації: киснево-конвертерний процес добре адаптований для автоматизації та цифрового контролю, що забезпечує високу стабільність і повторюваність процесу. У мартенівському виробництві автоматизація є складнішою через тривалість і багатостадійність процесу.

7. Гнучкість у масштабах виробництва: конвертери великих обсягів (до 400 т) дозволяють задовольнити потреби великих металургійних підприємств. Електропечі мають обмеження за обсягом плавки, а мартенівські печі вже вважаються застарілими.

8. Нижча собівартість сталі: завдяки вищезазначеним перевагам киснево-конвертерний процес забезпечує нижчу собівартість виробленої сталі порівняно з іншими методами, особливо у великих обсягах виробництва.

Таким чином, завданням кваліфікаційної роботи є розробка та обґрунтування системи очищення газів від кисневого конвертера, яка забезпечуватиме ефективне його знешкодження.

1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

1.1 Характеристика виробництва сталі в киснево-конверторному виробництві

Киснево-конвертерний процес є одним із найефективніших способів виплавки сталі, що базується на інтенсивному окисленні домішок у чавуні за допомогою чистого кисню. Завдяки високій продуктивності та економічності цей метод займає провідне місце у світовій металургії. Розглянемо основні етапи та особливості цієї технології (рис.1.1 [1]).

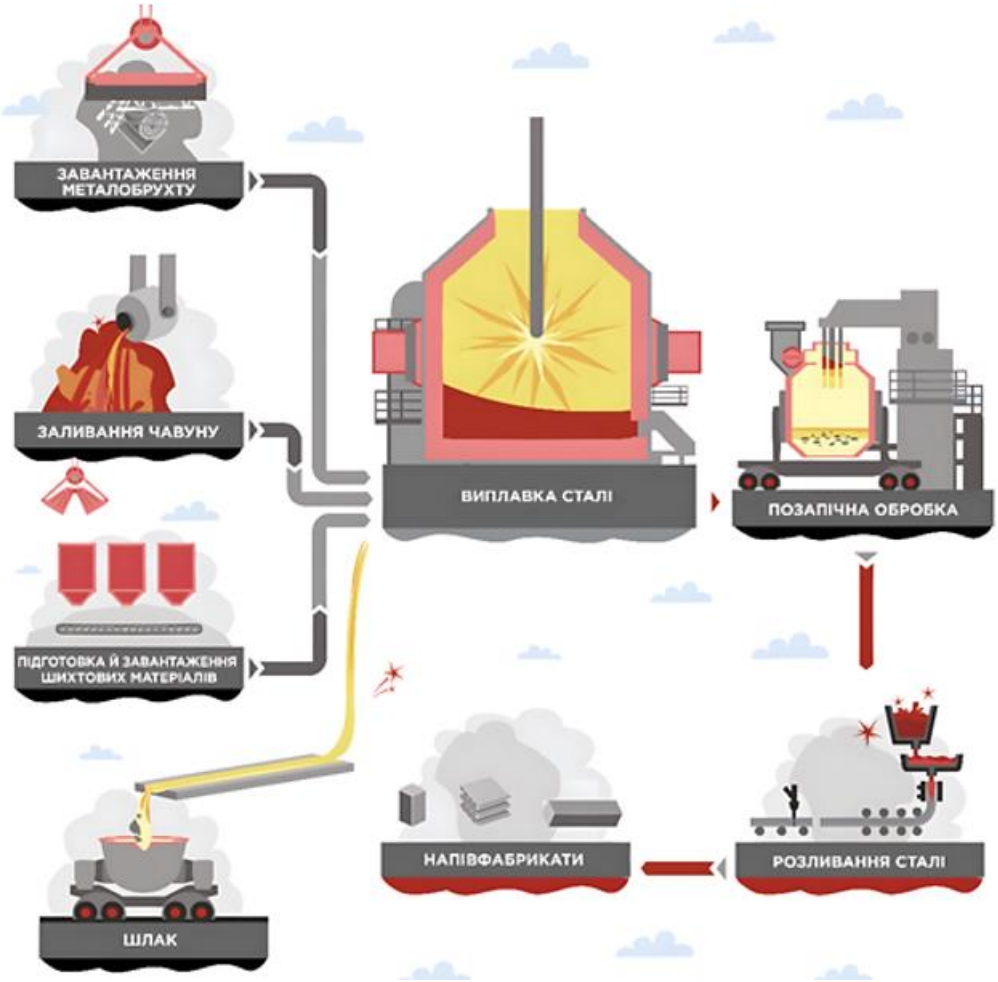


Рисунок 1.1 – Принципіальна схема виробництва сталі в конверторі

1. Основні компоненти технології. Киснево-конвертерна плавка здійснюється у спеціальній ємності – конвертері (рис.1.2), яка має наступні складові:

– корпус конвертера: виготовлений із міцної сталі та футерований вогнетривкими матеріалами, що захищають обладнання від високих температур.

– киснева фурма: основний елемент подачі кисню, розташований вертикально зверху або з низу.

– механізми нахилу: забезпечують поворот конвертера для завантаження сировини і зливу готової сталі.

– система відведення газів: дозволяє уловлювати конвертерні гази для подальшої утилізації.

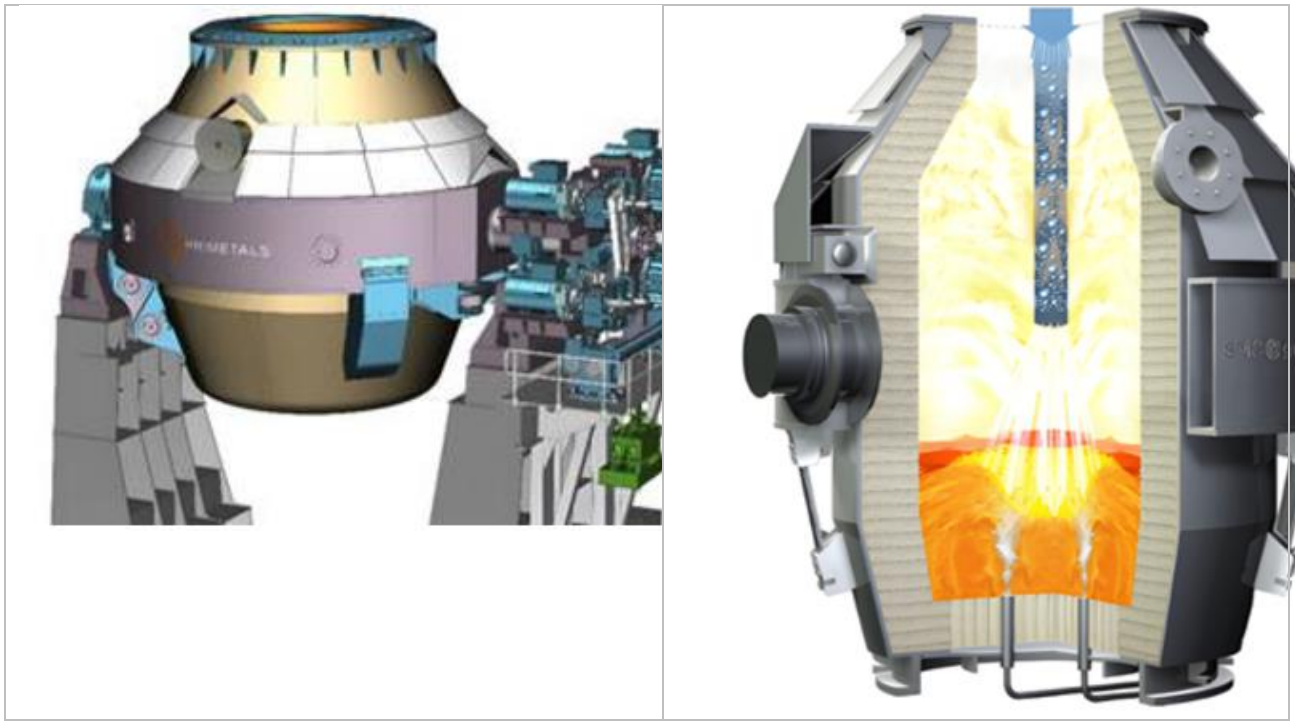


Рисунок 1.2 – Кисневий конвертер [1]

2. Підготовка до плавки. Перед початком процесу конвертер підігрівають до робочої температури для забезпечення оптимальних умов плавки. У цей момент перевіряється стан футеровки та підготовленість обладнання. Потім у конвертер заливають рідкий чавун, який є основною сировиною для виплавки сталі. Зазвичай чавун отримують у доменних печах, після чого транспортують до конвертера у спеціальних ковшах. Окрім чавуну, у конвертер завантажують металобрухт, який слугує охолоджувачем, і вапно для видалення домішок. Металобрухт також сприяє зниженню температури в процесі окислення, що дозволяє уникнути перегріву металу.

3. Процес продувки киснем (рис. 1.3). Основний етап виробництва сталі полягає в подачі чистого кисню через водоохолоджувану фурму. Кисень подається під високим тиском (до 10–15 атмосфер), що дозволяє створювати інтенсивну реакцію окислення. У процесі окислення вуглець, кремній, марганець, сірка та інші домішки в чавуні перетворюються на оксиди. Ці оксиди переходять у шлак або виділяються у вигляді газів.

Хімічні реакції, що відбуваються під час продувки, супроводжуються виділенням великої кількості тепла. Ця енергія забезпечує підтримання необхідної температури металу без додаткового нагрівання.

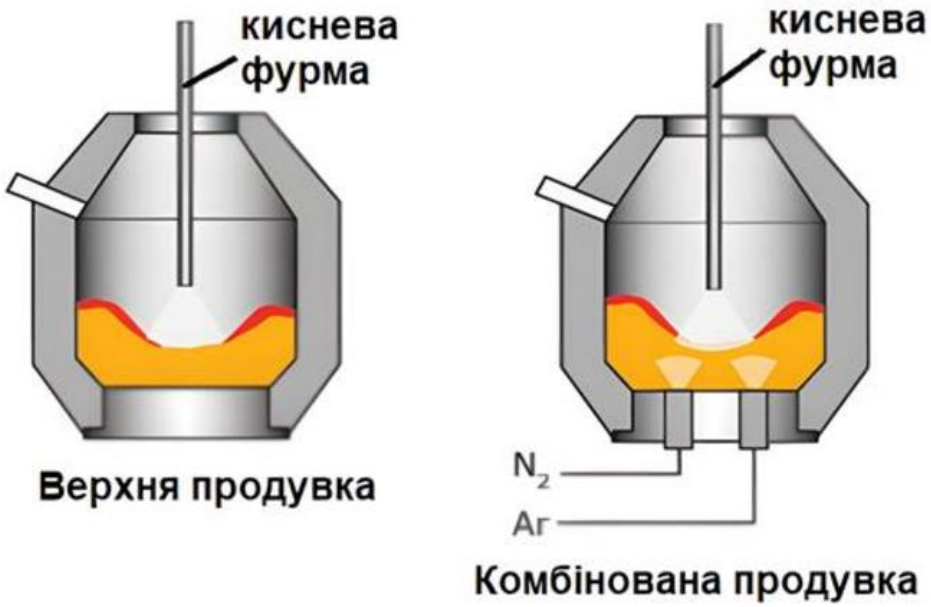


Рисунок1.3 – Варіанти продувки

4. Формування шлаку. Шлак відіграє важливу роль у процесі. Він утворюється внаслідок реакції вапна з окисленими домішками, зокрема сіркою та фосфором. Утворений шлак плаває на поверхні розплавленого металу, захищаючи його від взаємодії з атмосферним киснем і сприяючи видаленню небажаних елементів.

5. Контроль і завершення плавки. Протягом продувки оператори постійно контролюють процес за допомогою спеціальних датчиків і проб металу. Це дозволяє визначити момент завершення окислення та отримати сталь із заданими

характеристиками. Після завершення продувки конвертер нахиляють, і рідку сталь переливають у ковш.

Шлак залишається в конвертері й видаляється окремо. Його можуть використовувати в інших технологічних процесах, наприклад, у виробництві цементу. Етапи роботи конвертера наведені на рис. 1.4

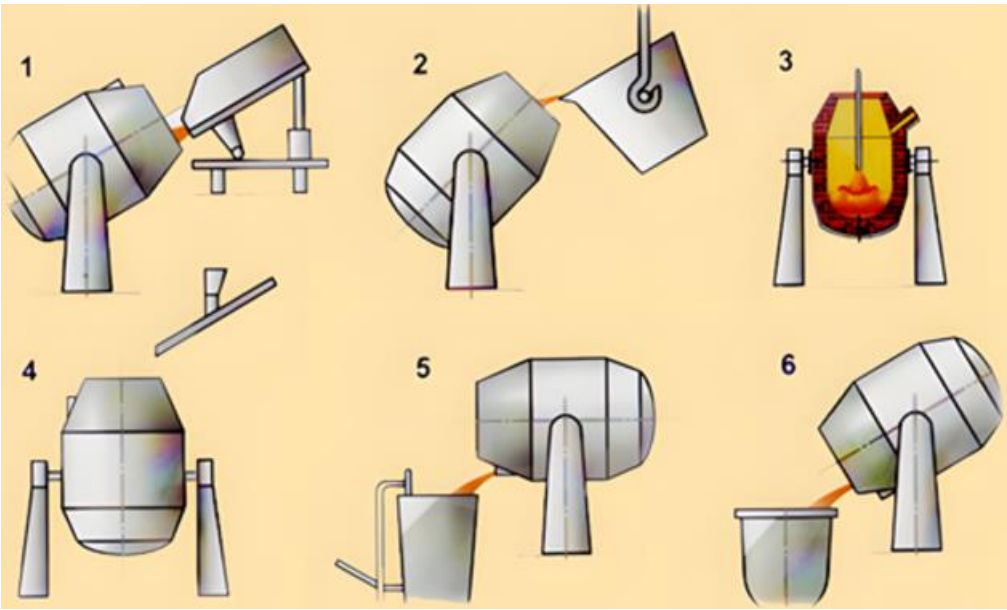


Рисунок 1.4 – Етапи роботи кисневого конвертера [1]

6. Очищення і використання конвертерних газів. У процесі продувки утворюються конвертерні гази, які містять значну кількість оксиду вуглецю (CO). Ці гази вловлюються системою газоочищення, що дозволяє не лише зменшити шкідливі викиди в атмосферу, а й утилізувати енергію газів для технологічних потреб підприємства.

7. Розлив і подальша обробка сталі. Готова сталь після вивантаження з конвертера може бути спрямована на подальшу обробку, а саме на:

– легування: додавання до складу сталі легувальних елементів, таких як хром, нікель або ванадій.

– розлив у форми: отримання сталевих злитків або безперервне лиття для формування заготовок.

– обробка в ковші: додаткове рафінування для досягнення високих стандартів якості.

1.2 Системи відведення газів

При проєктуванні систем газоочищень перш за все необхідно забезпечити ефективне вловлювання пилу. При можливості, також необхідно розглянути можливість використання теплової та хімічної енергії відхідних газів від технологічних агрегатів. Відомі три основні типи систем газовідведення від кисневого конвертере залежно від способу обробки відхідних газів, а саме:

1. Системи з повним допалюванням оксиду вуглецю (CO) – допалювання здійснюється шляхом подачі в охолоджувач конвертерного газу необхідної кількості повітря. При цьому в зазорі між горловиною конвертера та котлом-охолоджувачем підтримується розрідження, що забезпечує додатковий приплив повітря до струменя газу.

2. Системи без допалювання оксиду вуглецю – герметизація зазору між конвертером і котлом-охолоджувачем виключає підсмоктування повітря, що дозволяє уникнути допалювання. Це знижує обсяг газів, що потребують очищення, та оптимізує роботу газоочисної системи.

3. Системи з частковим допалюванням – підтримується мінімальне розрідження в зазорі, що дозволяє підсмоктувати обмежену кількість повітря, необхідну для часткового допалювання оксиду вуглецю. Такий підхід дозволяє уникнути викидів газу в цех і підтримувати стабільну роботу системи.

При роботі системи газовідведення необхідно враховувати розрідження в зазорі, яке впливає на склад газів: повне допалювання відбувається при $\alpha > 1$ (надлишок повітря), часткове – при $\alpha \approx 0{,}11$, а повітряний контакт виключається при $\alpha \approx 0$.

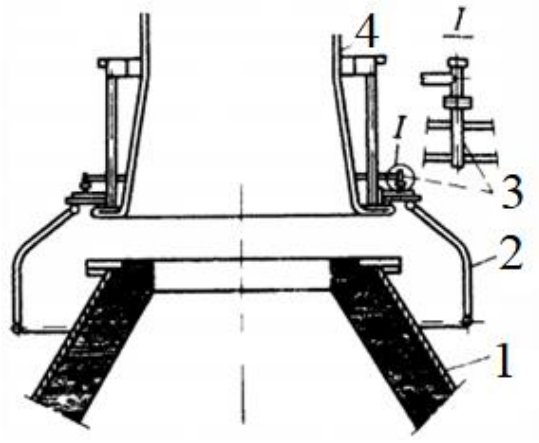
Особливості безпечного газовідведення. Для запобігання утворенню вибухонебезпечних сумішей при $\alpha < 0{,}75$ необхідно забезпечувати герметичність системи газовідведення, уникаючи контакту горючого газу з повітрям.

Використовуються спеціальні «тампони» з інертного газу, які ізолюють шари газів у тракті.

Для зменшення витрат на очищення поширення набули дві системи герметизації:

- система IRSID–CAF (Франція) – передбачає використання герметичних «спідниць», що рухаються вертикально й з'єднують конвертер із охолоджувачем.
- система OG (Японія) – включає застосування рухливої муфти та подачу азоту в зазор між конвертером і котлом-охолоджувачем.

Ці технології дозволяють ефективно керувати тепловими та газодинамічними процесами, оптимізуючи витрати та підвищуючи безпечність виробництва. На рис. 1.5 наведено приклад системи герметизації зазору між горловиною конвертера та охолоджувачем конвертерного газу



1 – кисневий конвертер , 2 – юбка, 3 – датчик вимірювання тиску, 4 – котел-утилізатор типу ОКГ

Рисунок 1.5 – Система герметизації зазору між горловиною конвертера та охолоджувачем конвертерного газу

Для забезпечення належної герметизації діаметр укриття зазвичай перевищує діаметр горловини конвертера в 1,5–2,5 рази. У нижньому положенні укриття перекриває горловину по висоті приблизно на 1 метр, створюючи ефективний бар'єр. Під укриттям автоматично підтримується невеликий надлишковий тиск, який запобігає проникненню повітря через зазор між

«спідницею» та конвертером. Система управління тиском ґрунтується на показниках датчика, встановленого під укриттям. Автоматична регуляція розміру перетину газовідвідного тракту дозволяє зберігати необхідний рівень надлишкового тиску.

Покращена модифікація системи IRSID-CAF успішно використовується на багатьох вітчизняних металургійних підприємствах. Її основна перевага — зменшення обсягу газовідвідного тракту у порівнянні з системами, що працюють у режимі повного допалювання. Завдяки цьому розміри конструкції для обробки газів суттєво менші, що знижує витрати на її впровадження та експлуатацію.

Отже, система газовідведення без допалювання є ефективним рішенням для оптимізації розмірів обладнання, одночасно забезпечуючи безпеку та екологічність виробничого процесу.

1.3 Характеристика газів киснево-конвертерного виробництва при різних режимах газовідведення

Джерела виділення пилу та газів у киснево-конвертерному цеху включають: зони переливання чавуну; конвертерний блок; установку для безперервного лиття заготовок; тракти подачі сипких матеріалів та феросплавів; установки для позапічної обробки сталі; ділянки ремонту сталерозливних і проміжних ковшів.

Основними забруднювачами, які потрапляють у виробничі приміщення та атмосферу, є пил, сірчистий ангідрид, оксиди азоту й вуглецю.

Під час продувки розплавленого металу киснем у конвертері утворюється конвертерний газ, характеристики якого змінюються в залежності від параметрів процесу: витрати кисню, складу чавуну, шихти та висоти фурми над ванною. У складі газу присутня значна кількість пилових частинок, зокрема залізистий пил, оксиди заліза, залишки руди, вапна та інших домішок, що надходять у плавку разом із завантажуваними матеріалами.

Процес продувки умовно поділяється на три такі стадії:

1. Початкова стадія, у якій переважно відбувається окиснення домішок і шлакоутворення.

2. Основна стадія, що характеризується інтенсивним обезвуглецюванням до досягнення певного критичного рівня вмісту вуглецю.

3. Заключна стадія, для якої типові зниження швидкості окиснення вуглецю та активізація вигоряння заліза.

Кількість пилових викидів суттєво варіюється залежно від етапу плавки й змін концентрації вуглецю в металі. Для верхньої продувки питомі викиди пилу коливаються в межах 13–22 кг/т сталі. Середній вміст пилу в газах становить 160–350 г/м³, але при введенні сипучих матеріалів цей показник може досягати 1500 г/м³.

Особливістю пилових виділень у конвертерному газі є висока концентрація залізовмісного пилу, що надає газу характерного бурого забарвлення, відомого як «бурий дим». Найбільший обсяг таких викидів спостерігається під час першої стадії плавки, коли відбувається активне обезвуглецювання.

Дані щодо розподілу розмірів пилових частинок у конвертерному газі наведено в табл. 1.1. Ці показники свідчать про важливість впровадження ефективних систем очищення, здатних справлятися зі значною кількістю дрібнодисперсного пилу.

Таблиця 1.1 – Гранулометричний склад пилу в газі, що відходить від конверторів

Розмір частинок, мкм	0-5	0,3-5	0,1-0,3	≤ 0,1
Операція: завантаження лому	88	4	-	0,6
Операція: продувка верхня	68	55	23	-
Випускання сталі	99	90	-	9

З літературних джерел відомо, що обсяг конвертерних газів, які виводяться через горловину конвертера, становить приблизно 70-90 м³ на тонну завантаженої шихти. Їх хімічний склад зазвичай варіюється у таких межах (%): 85-90 – оксид вуглецю (CO), 8–14 – діоксид вуглецю (CO_2), 1,5-3,5 – кисень (O_2),

і 0,5-2,5 – азот (N_2). Завдяки такому складу ці гази мають високу теплоту згоряння, яка становить 8,5-9,2 МДж/м³.

Під час виведення конвертерних газів у навколишнє середовище виноситься до 14% сірки, що міститься у шихті. З них 13% припадає на пилові частинки, а 1% залишається в газоподібній фазі. Оксиди азоту (NO_x) майже не утворюються у самому конвертері, однак їх кількість значно збільшується при допалюванні CO у котлі-охолоджувачі (приблизно 100 мг/м³ або 50 г/т сталі) та на спеціальній свічці для допалювання (приблизно 30 г/т сталі).

Температура газів на виході з конвертера змінюється протягом процесу. На початку продувки вона становить 1250-1300 °C, поступово зростаючи до 1600-1700 °C у середині та наприкінці процесу.

У сирому вигляді ці гази можна використовувати для підігріву шихтових матеріалів або як відновлювальний агент для залізорудної сировини. Однак для використання в ролі палива або хімічної сировини, гази потребують попереднього охолодження до 200-300 °C і очищення від пилових частинок.

Головними викликами, що ускладнюють використання конвертерного газу як палива, є:

1. Нерівномірність обсягу газу, який коливається від нуля (під час простою між плавками) до максимуму в середині циклу кисневого продувки.

2. Високий рівень запиленості на виході з конвертера.

3. Змінна калорійність через відмінності в характеристиках процесу від плавки до плавки, що впливає на теплоту згоряння газу.

Усі ці аспекти вимагають ретельного технічного підходу для зменшення впливу цих обмежень і забезпечення ефективного використання конвертерного газу.

2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Аналіз систем газоочищення газів конвертерного виробництва

Для видалення пилу з конвертерного газу використовуються різні типи обладнання, зокрема скрубери Вентурі, електрофільтри та тканинні фільтри. Усі великі конвертерні печі обладнані котлами-утилізаторами та випарними скруберами з порожнистою конструкцією. У цих установках здійснюється виробництво пари та зниження температури газів до 200 °С.

Як і для інших газів, що відходять від металургійних агрегатів, для очищення газів киснево-конвертерного виробництва існують два основних підходи:

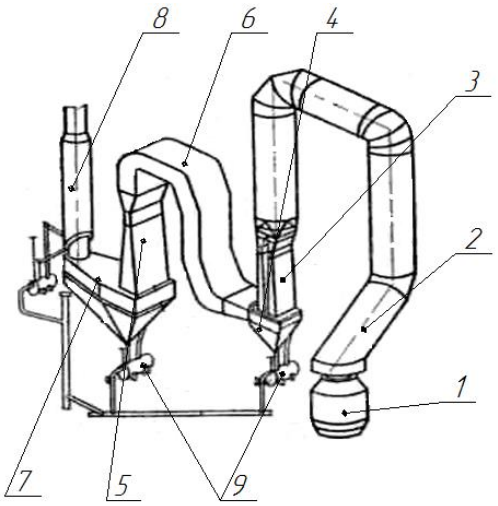
1. Мокре очищення, яке реалізується за допомогою скруберів Вентурі та мокрих електрофільтрів.

2. Сухе очищення, що передбачає використання рукавних (тканинних) фільтрів і електрофільтрів (сухих).

У випадках, коли оксид вуглецю у відхідних газах піддається допалюванню, широко застосовуються швидкісні пиловловлювачі з трубами Вентурі. Їх конструкція може бути як круглою, так і прямокутною. Труби Вентурі забезпечують осадження грубих частинок пилу та крапель шламу в спеціальних бункерах. Після укрупнення частки пилу осідають у відцентровому скрубері.

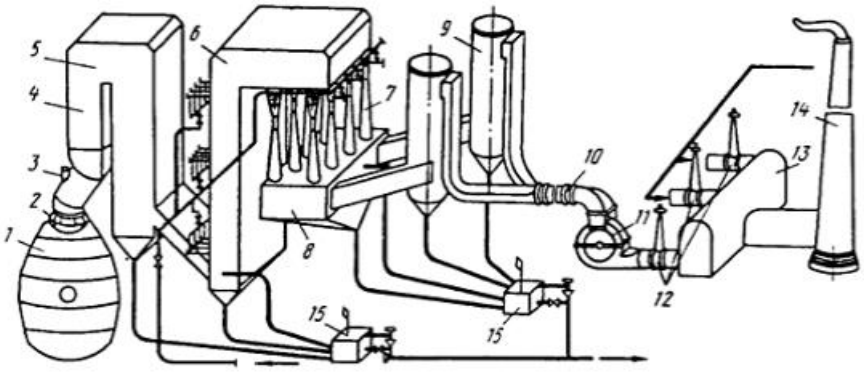
На рис. 2.1 продемонстровано конструкцію відцентрового скрубера, в якому використані труби Вентурі, а на рис. 2.2 – схему відведення і очищення газу з допалюванням оксиду вуглецю. У цій схемі використовується круглий перетин труб Вентурі для ефективного видалення пилу.

Таким чином, сучасні технології очищення конвертерного газу забезпечують як ефективне зниження його температури, так і значне зменшення вмісту шкідливих домішок, що сприяє мінімізації впливу на довкілля.



1 – конвертер; 2 – газовідвідний тракт; 3 – низьконапірна труба Вентурі; 4 – бункер-краплевловлювач; 5 – високонапірна труба Вентурі; 6 – газохід; 7 – інерційний пиле- і краплевловлювач; 8 – відцентровий пиловловлювач; 9 – гідрозасувка

Рисунок 2.1 – Схема очищення конвертерного газу з використанням прямокутних труба Вентурі



1 – кисневий конвертор; 2 – кесон; 3 – отвір для фурми; 4 – підйомний газохід з радіаційними поверхнями котла-утилізатора; 5 – газохід з конвективними поверхнями і економайзер; 6 – скрубер; 7 – блок труб Вентурі з круглою горловиною; 8 – інерційний краплеобмежувач; 9 – відцентрові порожнисті скрубери; 10 – дросельний клапан; 11 – димотяг; 12 – засувка; 13 – лежак; 14 – димова труба; 15 – гідро затвор

Рисунок 2.2 – Схема відводу та очистки конверторного газу з використанням круглих труб Вентурі

Очищення конвертерних газів без допалювання оксиду вуглецю проводиться без припливу повітря в газовий тракт, що дозволяє видаляти лише конвертерні гази, без залучення продуктів їх згорання. Задля досягнення необхідної концентрації пилу на виході з системи, яка становить 50 мг/м³, забезпечується оптимальна робота системи очищення на всіх етапах плавки. Для цього важливо підтримувати гідравлічний опір скрубера Вентурі на рівні 14 кПа.

При використанні сухого методу очищення в електрофільтрах необхідно попередньо зволожити гази, які надходять до системи. Така система дозволяє очищати гази, що містять до 5-6% оксиду вуглецю. Крім того, застосовуються мокрі електрофільтри, які розташовуються в газовому тракті після котлів-утилізаторів і скрубера. Після котла-охолоджувача, де гази охолоджуються до 1100°С, вони надходять в два паралельні злегка нахилені скрубери, а потім — в вертикальний трубчастий електрофільтр, де температура газів знижується до 77°С. Електрофільтр складається з 1000 труб, які є осаджувальними електродами, всередині яких розташовуються коронуючі електроди. Робоча напруга в системі складає 40 кВ.

Для фільтрації газів через тканинні фільтри необхідно ретельно підбирати фільтруючі матеріали, оскільки конвертерний пил є неоднорідним за хімічним складом. Шар пилу, що утворюється на тканині, допомагає подальшій коагуляції часток, сприяючи більш ефективному очищенню. Для підтримки необхідної температури газів перед тканинним фільтром вони проходять через випарний скрубер або обладнуються термостатами для регулювання подачі додаткового повітря. Після очищення через тканинні фільтри вміст пилу знижується до 20 мг/м³.

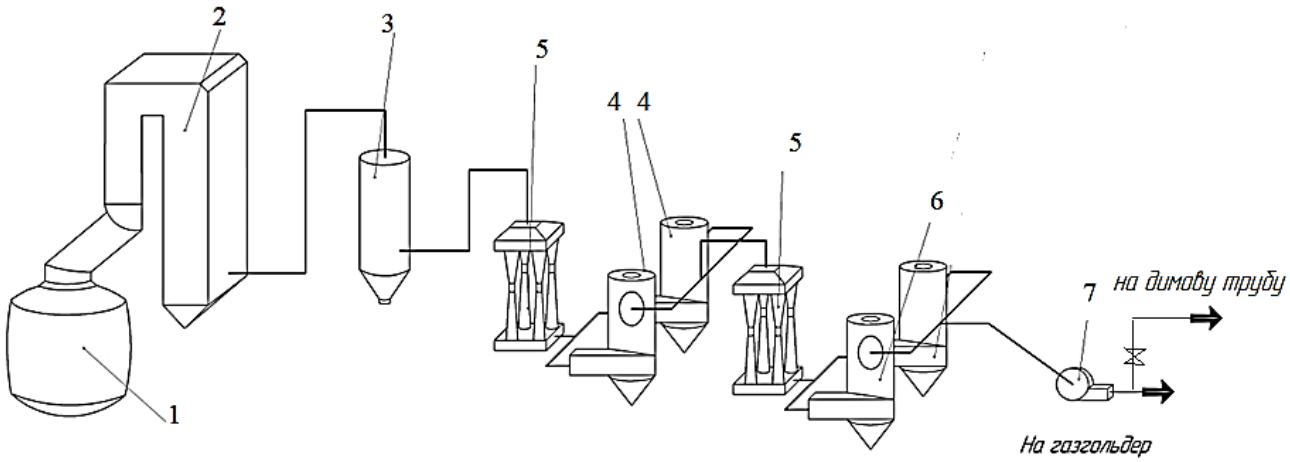
Очищення тканинних фільтрів від пилу здійснюється шляхом струшування. У системах з повним спалюванням газів процес струшування та перемикання секцій відбувається автоматично в залежності від фаз продування.

Отже, на основі теоретичного аналізу, оптимальним варіантом є розробка системи очищення газів конвертера, яка включає (рис.2.3): відведення газів з частковим допалюванням оксиду вуглецю; котел-утилізатор для відновлення

енергії; випарний скрубер для початкового очищення; двоступеневу систему очищення за допомогою скрубера Вентурі; димотяг зі свічкою для згорання CO; газгольдер для накопичення газу. Після цього газ спрямовується до кінцевого споживача. Якщо ж вміст оксиду вуглецю в газі менший за 35%, газ напряму подається в димову трубу, де він спалюється на свічці. Для підтримки мінімальної кількості газу в газгольдері використовують доменний газ для його заповнення. Використання другого скрубера Вентурі обґрунтоване вимогами до чистоти палива, що використовується в пальниках (запиленість газу має бути менше 10 мг/м³). Це рішення дозволяє забезпечити ефективність та екологічність процесу, знижуючи шкідливі викиди й покращуючи загальну енергоефективність виробництва.

Для задання вихідних даних при проєктуванні систем газоочищення з частковим допалювання необхідно більш детально розглянути систему відведення конвертерного газу з його частковим допалюванням.

Робота газовідвідного тракту з частковим допалюванням протікає з повністю відкритим зазором. Димотяг працює з постійною продуктивністю, що перевищує на 10-15 % вихід конвертерного газу в період його максимального виділення. В цьому випадку в початковий період продування, коли конвертерного газу мало і оксида вуглецю в ньому теж мало з атмосфери через відкритий підсмоктується повітря і горіння CO відбувається з великим надлишком повітря. Отже, в газовідвідному тракті присутні тільки кисень, вуглекислий та спостерігається повна відсутність оксиду вуглецю (II), рис. 2.4. По мірі виходу конвертерного газу надлишок кисню швидко зменьшується та при $\alpha = 1$ стає близьким до нулю. В цей час в в газоході немає CO, який повністю окислюється до CO_2. Тобто виникає «Тампон» з суміші газів $CO_2 + N_2$, котрий повністю продуває газовий тракт та звільнює його від залишків O_2.



1 – кисневий конвертер; 2 – котел-утилізатор; 3 – випарний скрубер; 4 – циклон-краплевловлювач; 5 – блок труб Вентурі; 6 – циклон-краплевловлювач; 7 – димотяг

Рисунок 2.3 – Обрана схема очистки конвертерних газів з частковим допалюванням

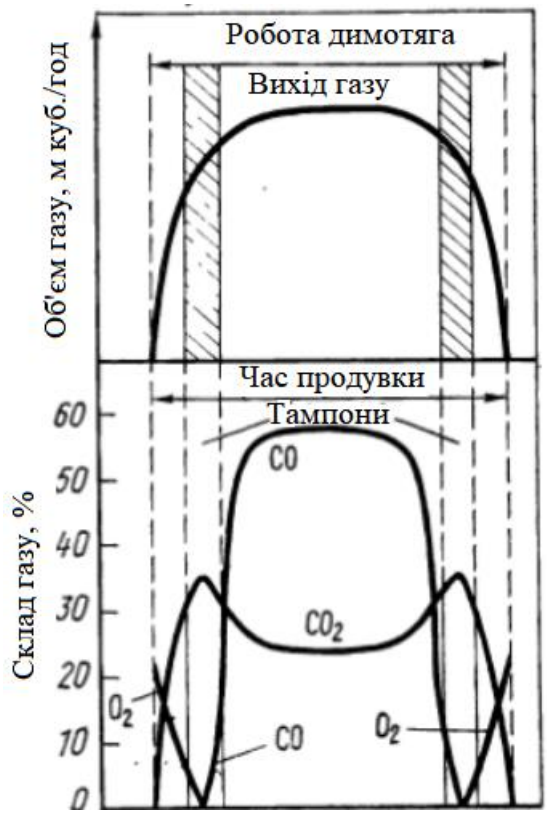


Рисунок 2.4 – Зміна кількості та складу газів, в газовідвідному тракті при газовідведенні з частковим допалюванням

По закінченню продування такі ж процеси відбуваються у зворотньому напрямку. Отже, тампон з суміші інертних газів, якій утворюється на початку та наприкінці кисневого продування, надійно розділяє газ різної якості, при цьому не допускає змішування оксиду вуглецю з повітрям та утворенням вибухонебезпечної суміші. При режимі роботи з частковим допалюванням СО можливість використання конвертерного газу в якості палива значно зменшується. З практичних даних відомо, що з загального часу продування газ з високим вмістом СО виходить з газового тракту за 6-10 хв, що становить 25-30% всього часу.

В установка з частковим допалюванням СО запиленість газів становить в межах 30-80 г/м^3.

2.2 Проєктування системи очистки газів від кисневого конвертера з частковим допалюванням

Відповідно до розділу 1 обираємо витрату газів попереду котла-охолоджувача, при максимальній інтенсивності продувки, за нормальних умов 160 000 нм^3/год. Тоді, температура конвертерного газа перед котлом-охолоджувачем становить $t_{гк}$=1550°С. Для проєктування системи газоочищення приймаємо наступний склад газів, газ з високим вмістом СО:

Сполуки	% об.
CO	75
CO_2	22
N_2	1,5
O_2	1,5
Всього	100

Згідно з умовами проєкту, запиленість газів перед котлом-утилізатором ОКГ складає 80 г/м³ (розділ 1). Аналіз показав, що медіанний діаметр частинок пилу в цих газах дорівнює 0,35 мкм (розділ 1). З урахуванням цих параметрів та

початкової температури газу, вибрано охолоджувач конвертерних газів ОКГ-250-2. Котел-утилізатор ОКГ-250-2 призначений для допалювання та охолодження відхідних газів сталеплавильних конвертерів. Це барабанний вертикальний водотрубний котел з примусовою циркуляцією.

Конструкція котла включає чотиригранний газонепроникний радіаційний газоход і складається з кессона, двох газопроводів (нахиленого та вертикального), люка для ремонту, екрану сипучих матеріалів та фурми, спідниці, барабана, панелей кессона і трубопроводів. Технічні характеристики:

- витрата газів через охолоджувач: 200 000 нм³/год;
- температура газів перед котлом: 1600 °С;
- температура газів після котла: 780 °С;
- температура живильної води: 104 °С;
- гідравлічний опір: 300 Па;
- паропродуктивність: 250 т/год.

Цей охолоджувач забезпечує ефективне зниження температури газів до необхідного рівня для подальшої обробки та очищення, що сприяє зниженню шкідливих викидів та підвищенню енергоефективності процесу.

Оскільки температура газу після виходу з котла-утилізатора становить 780 °С, то необхідно проводити його охолодження в полому форсунковому скрубері типу АКРП.

Визначаємо густину конвертерного газу за вищенаведеним складом при н. у, кг/м^3:

$$\rho_o = \frac{0{,}01}{22{,}4} \sum R_i O_j \cdot M_{R_i O_j}, \qquad (2.1)$$

де М – молекулярна маса речовини в конвертерному газі, кг/моль.

$$\rho_0 = \frac{0{,}01}{22{,}4} \cdot (75 \cdot 28 + 22 \cdot 44 + 1{,}5 \cdot 28 + 1{,}5 \cdot 32) = 1{,}401 \text{ кг/м}^3$$

Для визначення геометричних розмірів випарного скрубера необхідно перерахувати густину конвертерного газу при р.у.:

$$\rho_t = \rho_0 \frac{273(B \pm P_г)}{101{,}3(273+t_г)}, \quad (2.2)$$

де $P_Г$ – тиск газу перед АКРП, кПа;

B – атмосферний тиск, кПа, приймаємо 100 кПа;

$t_г$ – температура газу після котла-утилізатора, °С.

$$\rho_t = 1{,}409 \frac{273(100-0{,}25-0{,}3)}{101{,}3(273+780)} = 0{,}359 \text{кг/м}^3$$

Перераховуємо годинну витрату конвертерних газів на секундну:

$$Q_t = \frac{Q_0 \cdot \rho_0}{\rho_t} = \frac{44.44 \cdot 1.409}{0.359} = 174{,}41 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Ентальпія конвертерного газу на вході в АКРП за рабочих умов, t_1= 780 °С:

$$i_1 = 0{,}01 \sum_1^n i_i \cdot a_i \quad (2.3)$$

де i_i – ентальпія і-го компонента газової суміші, кДж/м^3 (довідникові дані).

$$i_1 = 0{,}01 \sum_1^n 1042{,}08 \cdot 75 + 1519{,}5 \cdot 22 + 1019{,}55 \cdot 1{,}5 + 1082{,}35 \cdot 1{,}5 = 1147{,}38$$

На виході зі АКРП температура газу становить tг = 200 °С, тоді:

$i_2 = 0{,}01 \sum_1^n 261{,}5 \cdot 75 + 357{,}5 \cdot 22 + 260 \cdot 1{,}5 + 267{,}1 \cdot 1{,}5 = 286{,}64$ кДж/м^3

Тоді у скрубері газ буде передавати воді (зрошувальній) таку кількість теплоти:

$Q_m = Q_0(i_1 - i_2) = 44{,}44 \cdot (1147{,}38 - 286{,}64) = 38251{,}29$ кВт

Температура води на виході зі АКРП становить 100 °С, при коефіцієнти випаровуванні рівним одиниці. Визначаємо середню температуру газу в порожнистому скрубері, °С:

$$t_{ср} = \frac{t_1 + t_2}{2} = \frac{780 + 200}{2} = 490$$

Цій температурі відповідає ентальпія $i_П$=3420 кДж/кг, довідникові дані

Далі визначаємо витрату води на зрошення газу в АКРП, кг/с:

$$M_В = \frac{Q_m}{\varphi(i_п - i_н) + (1-\varphi)(i_к - i_н)} = \frac{38251,29}{(3420 - 83,9)} = 11,47$$

Тоді, встановлюємо питому витрату води на зрошування конвертерного газу в АКРП:

$$m = \frac{M_B}{Q_t} = \frac{11,47}{174,41} = 0.066 \text{ кг/м}^3.$$

Перераховуємо склад газу, з урахуванням його вологості після АКРП, за н.у.:

$$f_{02} = f_{01} + \frac{\varphi \cdot M_B}{Q_0} = \frac{11,47 \cdot 10^3 \cdot 3600}{160000} = 258,08 \text{ г/м}^3$$

де f_{01} – початкова вологість газу, на вході в АКРП, г/ м^3.

Тоді з урахуванням вологості робимо перерахунок витрати газу на виході із АКРП, р.у.:

$$Q = Q_0 \left(1 + \frac{f_0}{0.804}\right) \frac{101.3 \cdot T_г}{273 \cdot P_г} \qquad (2.4)$$

$$Q_{t2} = 44,44 \left(1 + \frac{0,2581}{0.804}\right) \frac{101.3 \cdot 473}{273 \cdot (100 - 0,25 - 0,3 - 0,9)} = 104,55 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Густина газу на виході зі скрубера:

$$\rho_{г2} = \frac{\rho_0 + f_0}{1 + \frac{f_0}{0.804}} \frac{273 \cdot P_г}{101,3 \cdot T_г} = \frac{1,324 + 0,24548}{1 + \frac{0,24548}{0,804}} \cdot \frac{273 \cdot (100 - 0,25 - 0,3 - 0,9)}{101,3 \cdot 473} = 0,675 \text{ кг/м}^3$$

Середня різниця температур між газом і водою в АКРП:

$$\Delta t = \frac{(t_1 - t_к) - (t_2 - t_H)}{\ln \frac{t_1 - t_K}{t_2 - t_H}} = \frac{(780 - 200) - (200 - 20)}{\ln \frac{780 - 100}{200 - 20}} = 300,95 \,°\text{C}.$$

Розраховуємо об'єм скрубера, м^3:

$$V_{\text{ск}} = \frac{1000 \cdot Q_m}{K_0 \cdot \Delta t} = \frac{1000 \cdot 38251{,}29}{178{,}51 \cdot 300{,}95} = 712{,}01$$

де K_0 – об'ємний коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м^3·°С).

Об'ємний коефіцієнт теплопередачі

$$K_0 = (17{,}4 + 115m \cdot U_{\text{г}})\rho_{\text{г}2} \cdot U_{\text{г}} = (17{,}4 + 115 \cdot 0{,}062 \cdot 5) \cdot 0{,}673 \cdot 5 = 178.51$$

де Uг – швидкість газу на виході із скрубера, приймаємо для АКРП Uг=5 м/с [8].

Визначаємо діаметр скрубера:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot Q_{\text{г}}}{\pi \cdot U_{\text{г}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 174.41}{3.14 \cdot 5}} = 6.61 \text{ м}$$

За довідником та отриманими даними приймаємо 2 скрубери типу АКРП з внутрішнім діаметром 5,5 м, гідравлічний опір становить 900 Па.

Тоді фактична швидкість в скрубері, м/с:

$$U_{\text{г}} = \frac{4 \cdot Q_{\text{г}}}{n \cdot \pi \cdot d^2} \qquad (2.5)$$

де n – кількість одиниць апаратів газоочищення, шт;

D – стандартний діаметр скрубера, м.

$$U_{\text{г}} = \frac{4 \cdot 174{,}41}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 5{,}5^2} = 3{,}67 \text{ м/с}$$

Далі з урахуванням вологості газів на виході з АКРП перераховуємо склад газів:

$$r_{\text{i}} = \frac{r_{ic}}{1 + \frac{f_{02}}{0.804}} \qquad (2.6)$$

де r_{ic} – вміст компонента в сухому газі, %

$$r_{CO} = \frac{75}{1+\frac{0,25808}{0.804}} = 56,77\%$$

$$r_{CO2} = \frac{22}{1+\frac{0,25808}{0.804}} = 16,65\ \%$$

$$r_{N2} = \frac{1.5}{1+\frac{0,25808}{0.804}} = 1,14\ \%$$

$$r_{O2} = \frac{1.5}{1+\frac{0,25808}{0.804}} = 1.14\ \%$$

Тоді концентрація водяної пари у газах після АКРП:

$$r_{H2O} = 100 - \sum_1^n r_i \qquad (2.8)$$

$r_{N2} = 100 - (56,77 + 16,65 + 1.14 + 1.14) = 24,3\ \%$

Оскільки ми плануємо використовувати конвертерний газ в якості палива, то згідно проєкту було встановлено дві ступені скруберів Вентурі. За практичними даними ефективність роботи скрубера Вентурі першої ступені становить 99,1 % . Отже запиленість на виході зі скрубера Вентурі на першій ступені очищення складе 1 г/м^3.

Число одиниць переносу:

$$N_ч = \ln\frac{1}{1-\eta}\ , \qquad (2.9)$$

де η – ефективність очищення на першій ступені, частки.

$$N_ч = \ln\frac{1}{1-0,99} = 4,61$$

Питома енергія, яка витрачається на пилевловлювання:

$$N_ч = B \cdot K_ч^{\chi}, \qquad (2.10)$$

де B и χ – константи, що залежать від дисперсного складу пилу;

$К_ч$ – витрати енергії на мокру очистку газів від пилу

$N_ч = 4,61 = 9,88 \cdot 10^{-2} \cdot K_ч^{0,4663}$, звідси $К_ч$=4025 кДж/ 1000 м^3.

Далі визначається сумарний гідравлічний опір скрубера Вентурі:

$$\Delta P = K_ч - P_p \cdot m_в, \quad (2.11)$$

де p_p – тиск рідини, що розпилюється, на вході в апарат, Па;

m – питома витрата зрошувальної рідини, м^3/м^3 газу.

$\Delta P = 4025 - 300000 \cdot 0{,}0015 = 3575$ Па

Густина конвертерного газу на вході в скрубер Вентурі за нормальних умов:

$$\rho_0 = \frac{0{,}01}{22{,}4} \cdot (56{,}77 \cdot 28 + 16{,}65 \cdot 44 + 1{,}14 \cdot 28 + 1{,}14 \cdot 32 + 24{,}3 \cdot 18) = 1{,}458 \text{ кг/м}^3$$

Тоді за робочих умов густина газу на вході в скрубер Вентурі становить:

$$\rho_t = 1{,}458 \frac{273(100-0{,}25-0{,}3-0{,}9)}{101{,}3(273+200)} = 0{,}817 \text{ кг/м}^3$$

Витрата конвертерного газу, що входять у скрубер Вентурі першої ступені, за робочих умов, м^3/с:

$$Q_t = \frac{44{,}44 \cdot 1{,}458}{0{,}817} = 79{,}31$$

Кількість зрошувальної рідини, при $m_в$1,5 л/м^3:

$$М_в = m_в \cdot Q_t$$

$М_в = 1{,}5 \cdot 79{,}31 = 118{,}97$ кг/с

Визначаємо температуру газів на виході з скрубера Вентурі:

$$t_2 = (0.133 - 0.041 \cdot m_в)t_1 + 35 \quad (2.12)$$

де t_1 – температура газу на вході до скрубера Вентурі, °С

$t_2 = (0.133 - 0.041 \cdot 0{,}0015)200 + 35 = 61{,}59$

Густина газу на виході з труби Вентурі:

$$\rho_{t2} = 1{,}458 \frac{273(100-0{,}25-0{,}3-3{,}396)}{101{,}3(273+61{,}59)} = 1{,}128 \text{ кг/м}^3$$

Об'ємна витрата газу на виході з труби Вентурі:

$$Q_{t2} = \frac{44{,}44 \cdot 1{,}458}{1{,}128} = 57{,}44 \text{ м}^3\text{/с}$$

В якості краплевловлювача приймаємо циклон типу КЦТ.

Необхідна площа перетину циклона, м^2:

$$F = \frac{V_2}{w_{опт}}, \tag{2.13}$$

де $w_{опт}$ – середня швидкість газу в циклоні, м/с;

$F = \frac{57,44}{4}$=14,36 м^2

Діаметр циклона, попередньо задаємося кількістю циклонів N, м:

$$D = \sqrt{\frac{F}{0,785N}} \tag{2.14}$$

Приймаємо циклони- краплевловлювачі типу КЦТ в кількості 4 шт:

$$D = \sqrt{\frac{14.36}{0.785 \cdot 4}} = 2,13 \text{ м}$$

Обираємо 4 циклони з стандартними розмірами Д$_{ст}$=2200 мм.

Фактична швидкість газу в циклоні, м/с:

$$w = \frac{Q_{t2}}{0.785 \cdot N \cdot D_{ст}{}^2} \tag{2.15}$$

$$w = \frac{57,44}{0.785 \cdot 4 \cdot 2,2^2} = 3,78$$

Тоді на першій ступені встановлюємо блок з 4 труб Вентурі та за ними 4 циклони типу КЦТ-2200.

Визначаємо гідравлічний опір циклона КЦТ, Па:

$$\Delta P_ц = \frac{\xi \cdot w^2 \cdot \rho_{t2}}{2} \tag{2.16}$$

де ζ – коефіцієнт гідравлічного опору циклона, довідникові дані.

$$\Delta P_{ц} = \frac{32 \cdot 3{,}78^2 \cdot 1{,}128}{2} = 257{,}88$$

Гідравлічний опір труби Вентурі, Па:

$$\Delta P_T = \Delta P - \Delta P_ц, \quad (2.17)$$

$$\Delta P_{тр} = 3575 - 257{,}88 = 3317{,}12$$

Коефіцієнт опору труби Вентурі при зрошувані рідиною:

$$\xi_2 = A\xi_1 m^{B_1}, \quad (2.18)$$

де A і B_1 – емпіричні коефіцієнти, довідникові дані.

Обираємо трубу Вентурі із центральним підведенням зрошувальної рідини. Тоді коефіцієнт гідравлічного опору «сухої» труби становить 0,15, а емпіричні коефіцієнти А=0,63, B_1= - 0,3.

$$\xi_2 = 0{,}63 \cdot 0{,}15 \cdot 0{,}0015^{-0{,}3} = 0{,}66$$

Тоді швидкість газу в горловині труби Вентурі, м/с:

$$w_г = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_т}{\xi_1 \rho_t + \xi_2 \cdot \rho_в \cdot m_в}} \quad (2.19)$$

де ρ і $\rho_ж$ – густина газу та щільність зрошувальної рідини, кг/м^3.

$$w_г = \sqrt{\frac{2 \cdot 3317{,}12}{0.15 \cdot 0{,}569 + 0{,}66 \cdot 1000 \cdot 0.0015}} = 78{,}54 \text{ м/с}$$

Тоді, діаметр горловини труби Вентурі, м:

$$d_{\text{г}} = 1{,}13\left(\frac{Q_t}{w_{\text{г}}}\right)^{0.5} \quad (2.20)$$

де V – об’єм при робочих умовах газу, що очищають, м^3/с.

$$d_{\text{г}} = 1{,}13\left(\frac{57{,}44}{78{,}54}\right)^{0.5} = 0{,}966 \text{ м}$$

Таким чином, діаметр звуженої частини труби Вентурі перевищує максимальний діаметр горловини стандартного ряду високонапірних труб (0,42 м). Тому потрібно встановити кілька труб, що працюють паралельно. Приймаємо кількість труб n=4n = 4n=4. У цьому разі діаметр горловини кожної труби становитиме:

$$d_{\text{г}} = 1{,}13\left(\frac{57{,}44}{4 \cdot 78{,}54}\right)^{0.5} = 0{,}48 \text{ м}$$

Обираємо діаметр горловини труби Вентурі рівним 420 мм, який відповідає моделі ГВПВ-0,140-01. З урахуванням цього стандартного розміру, розрахована фактична швидкість газу в горловині складає, м/с:

$$w_{\text{г}} = \frac{1{,}13^2 \cdot 57{,}44}{4 \cdot 0{,}42^2} = 103{,}95 \text{ м/с}$$

Друга ступень очистки - скрубер Вентурі. Встановлюємо, що ефективність видалення пилу на першому етапі очищення становить 99,4 % або 0,994. Таким чином, концентрація пилу на виході з скрубера Вентурі після першого ступеня очищення дорівнює 0,009 г/м³.

Визначаємо число одиниць переносу:

$$N_{\text{ч}} = \ln\frac{1}{1-\eta} = \ln\frac{1}{1-0{,}994} = 5{,}11$$

Питома енергія, що використовується для уловлювання пилу:

$N_ч = 5{,}11 = 9{,}88 \cdot 10^{-2} \cdot K_ч^{0{,}4663}$,

Тоді $К_ч$=4700 кДж/ 1000 м^3.

Сумарний гідравлічний опір скрубера Вентурі (блок труб):

$\Delta P = 4700 - 300000 \cdot 0{,}0015 = 4250$ Па

Визначаємо густину газів на вході в трубу Вентурі (робочі умови):

$\rho_t = 1{,}128 \frac{273(100-0{,}25-0{,}3-0{,}9-3{,}317)}{101{,}3(273+61.59)}$ =0,865 кг/м^3

Об'ємна витрата конвертерних газів, що поступають у труби Вентурі (р. у.), м^3/с:

$Q_t = \frac{44{,}44 \cdot 1{,}128}{0{,}865} = 57{,}95$

Тоді витрата води на зрошення, кг/с:

$М_в = 1.5 \cdot 57{,}95 = 86{,}92$ кг/с

Визначаємо температуру газів на виході зі труби Вентурі:

$t_2 = (0.133 - 0.041 \cdot 0{,}0015)\ 61.59+35$=41,19 °С

Густина газів на виході з труби Вентурі:

$\rho_{t2} = 1{,}128 \frac{273(100-0{,}25-0{,}3-3{,}575-4{,}250)}{101{,}3(273+41{,}19)} = 0{,}887$ кг/м^3

Витрата газів на виході з труби Вентурі, м^3/с:

$Q_{t2} = \frac{44{,}44 \cdot 1{,}128}{0{,}887} = 56{,}51$

Розрахунок характеристик краплевловлювача. Обираємо 4 циклони-краплевловлювачі типу КЦТ.

Фактична швидкість руху газу в циклоні, м/с:

$$w = \frac{56,51}{0.887 \cdot 4 \cdot 2,2^2} = 3,29$$

Отже, за підсумками розрахунків, після труб Вентурі передбачено встановлення чотирьох циклонів-краплевловлювачів типу КЦТ-2200. Гідравлічний опір циклону, Па:

$$\Delta P_{ц} = \frac{32 \cdot 3,29^2 \cdot 0,887}{2} = 307,3$$

Гідравлічний опір труби Вентурі, Па:

$$\Delta P_{тр} = 4250 - 307,3 = 3942,7$$

Коефіцієнт опору труби Вентурі, зумовлений подачею зрошувальної рідини:

$$\xi_2 = 0,63 \cdot 0,15 \cdot 0,0015^{-0,3} = 0,66$$

Тоді швидкість газу в горловині труби Вентурі, м/с:

$$w_г = \sqrt{\frac{2 \cdot 3942,7}{0.15 \cdot 0,569 + 0,66 \cdot 1000 \cdot 0.0015}} = 85,63 \text{ м/с}$$

Діаметр горловини труби - розпилювача, м:

$$d_г = 1,13 \left(\frac{56,51}{85,63}\right)^{0.5} = 0,92 \text{ м}$$

Обираємо труби Вентурі 4 шт. Тоді діаметр горловини труби:

$$d_г = 1,13 \left(\frac{56,51}{4 \cdot 85,63}\right)^{0.5} = 0,459 \text{ м}$$

Обираємо діаметр горловини труби Вентурі 420 мм, який відповідає моделі ГВПВ-0,140-01. Виходячи зі стандартного розміру горловини, фактична швидкість газу в ній дорівнює, м/с:

$$w_{\text{г}} = \frac{1{,}13^2 \cdot 56{,}33}{4 \cdot 0{,}42^2} = 101{,}9 \text{ м/с}$$

2.3 Аеродинамічний розрахунок газовідвідного тракту

Загальний розрахунковий опір газовідвідного тракту (рис. 2.1) становить, Па:

$$_{\Delta}\text{P} = {}_{\Delta}\text{P}_{\text{кот.ут.}} + {}_{\Delta}\text{P}_{\text{п.с}} + {}_{\Delta}\text{P}_{\text{с.в1}} + {}_{\Delta}\text{P}_{\text{с.в2}} + {}_{\Delta}\text{P}_{\text{газох.}}, \quad (2.21)$$

де $_{\Delta}\text{P}_{\text{кот.ут}}$ – опір котла-утилізатора, Па;

$_{\Delta}\text{P}_{\text{п.с}}$ – опір порожнистого скрубера, Па

$_{\Delta}\text{P}_{\text{с.в.1}}$, $_{\Delta}\text{P}_{\text{с.в.2}}$, – опір скрубера Вентурі першої і другої ступені відповідно, Па;

$_{\Delta}\text{P}_{\text{газов.}}$ – опір з'єднувальних газоходів, Па.

Сумарні втрати тиску (енергії 1 м^3 газу) складаються з втрат тиску на тертя по довжині трубопроводу $\Delta p_{тр}$ і втрат тиску на місцевих опорах $\Delta p_{м}$:

$$\Delta p = \sum_{i=1}^{m} \Delta p_{тр\,i} + \sum_{i=1}^{m} \Delta p_{м\,i}, \quad (2.22)$$

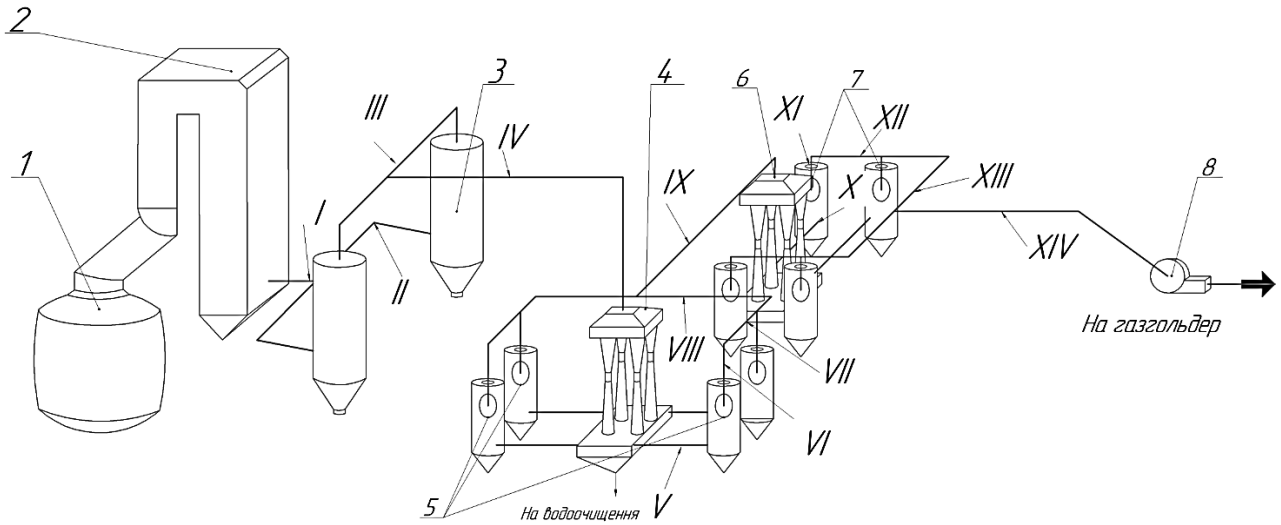
де i – номер розрахункової ділянки;

m – кількість розрахункових ділянок.

Втрати тиску на тертя по довжині розрахункової ділянки, Па:

$$\Delta p_{тр\,i} = \lambda_i \cdot \frac{l_i}{d_{e\,i}} \cdot \rho_{гі} \cdot \frac{w_i^2}{2}, \quad (2.23)$$

де λ_i – коефіцієнт гідравлічного тертя, Дарсі.



1 – кисневий конвертер; 2 – котел-утилізатор; 3 – порожнистий скрубер АКРП, 4,6 - блок труб Вентурі; 5,7 – циклон-краплевловлювач КЦТ; 8 - димотяг

Рисунок 2.1 – Схема розрахунку газового тракту системи очищення конвертерного газу

Коефіцієнт гідравлічного тертя визначається двома безрозмірними параметрами: числом Рейнольдса Re і відносною шорсткістю $\frac{k_{e\,i}}{d_{e\,i}}$.

Визначаємо число Рейнольдса:

$$Re_i = \frac{w_i \times d_{ei}}{\nu_i} \tag{2.24}$$

де w_i – швидкість газу в газоході, м/с;

d_{ei} – діаметр газоходу, м.

Під час вибору діаметрів газоходів необхідно забезпечити, щоб швидкість і об’ємна витрата газів залишалися приблизно однаковими на всіх ділянках і відгалуженнях системи.

Діаметр газоходу:

$$d = \sqrt{\frac{V}{w}}, \tag{2.25}$$

де w – швидкість газів у газоході, м/с.

Приймаємо, що рух газів у газоході відбувається в області «гідравлічно шорстких» труб, для розрахунку коефіцієнта гідравлічного тертя застосовують таку формулу:

$$\lambda_i = 0{,}11 \times \left(\frac{k_{ei}}{d_{ei}} \right)^{0{,}25} \tag{2.26}$$

Втрати тиску через тертя в газоході визначаються як сума втрат на всіх розрахункових відрізках:

$$\Delta p_{mp} = \sum_{i=1}^{m} \Delta p_{mp\,i}\,, \tag{2.27}$$

Втрати тиску на місцевих опорах, Па:

$$\Delta p_{мi} = \zeta_i \times \rho_{ei} \times \frac{v_i^2}{2}\,, \tag{2.28}$$

де ζ_i – коефіцієнт місцевого опору.

Втрати тиску на місцеві опори в газоході визначаються як сума втрат на окремих ділянках, Па:

$$\Delta p_{м} = \sum_{i=1}^{m} \Delta p_{мi}\,, \tag{2.29}$$

Відповідно до рис. 2.1, на ділянках газопроводу спостерігаються такі види місцевих опорів:

Ділянка I

- Вхід у канал
- Трійник для поділу потоків

Ділянка II

- Поворот на 90°

Ділянка III

- Вхід у канал
- Два секційні коліна з поворотом на 90°
- Дифузор
- Трійник для злиття потоків

Ділянка IV

- Секційне коліно з поворотом на 90°

Ділянка V

- Вхід у канал
- Конфузор

Ділянка VI

- Конфузор
- Секційне коліно з поворотом на 90°

Ділянка VII

- Трійник для злиття потоків

Ділянка VIII

- Секційне коліно з поворотом на 90°
- Трійник для злиття потоків

Ділянка IX

- Секційне коліно з поворотом на 90°

Ділянка X

- Вхід у канал
- Конфузор

Ділянка XI

- Конфузор
- Секційне коліно з поворотом на 90°

Ділянка XII

- Трійник для злиття потоків

Ділянка XIII

- Злиття потоків
- Секційне коліно з поворотом на 90°

Ділянка XIV

- Секційне коліно
- Конфузор

Результати аеродинамічного розрахунку заносимо в табл. 2.1.

Підбір димотяга проводиться на основі аеродинамічного розрахунку газовідвідного тракту. Його продуктивність визначається із запасом у 10%, незалежно від температури газів, але з урахуванням корекції на барометричний тиск.

$$Q_д = 1{,}1 \cdot Q_р \cdot \frac{101{,}3}{p_{бар}} \qquad (2.30)$$

$Q_д = 1{,}1 \cdot 56{,}33 \cdot 3600 \cdot \frac{101.3}{100} = 225966{,}68$ м^3/год.

Розрідження, створюване димотягом та приведене до каталожних умов для його підбору, приймається рівним:

$$\Delta p_{кат} = \beta_2 \cdot \Delta p_{заг} \cdot K_р = 1{,}2 \cdot 13069.03 \cdot 0.68 = 10664{,}55 \text{ Па}$$

де β_2 – коефіцієнт запасу тиску. Приймаємо коефіцієнт запасу тиску β_2=1,2;

$\Delta p_р$ – сумарний опір газовідвідного тракту, отриманий в результаті аеродинамічного розрахунку $\Delta p_{заг}$ = 13069,03 Па.

$K_р$ – коефіцієнт перерахунку.

Коефіцієнт $K_р$ визначається:

$$K_р = \frac{\overline{T_{г\,i}}}{T_х} \cdot \frac{101{,}3}{p_{бар}} \cdot \frac{\rho_{0\,г\,i}}{\rho_{0в}}, \qquad (2.31)$$

де $T_х$ – температура, для якої наведена хара, К;

$\overline{T_{г\,i}}$ – середня температура газу на останній ділянці газоходу, К.

Середня температура газу на розрахунковій ділянці $\bar{t}_г$ = 41.19 °С.

Тоді:

$$K = \frac{(273+41.19)\cdot 101.3\cdot 0.948}{(273+70)\cdot 100\cdot 1.293} = 0{,}68$$

На основі аеродинамічного розрахунку обрано вентилятор моделі ВМ-180/1100-1. Згідно з робочими характеристиками становить Н=13,000 Па.

Потужність димососу, кВт:

$$N = \rho\cdot\frac{Q_{кат}\cdot\rho_{кат}}{\eta_{кат}\cdot К}\cdot 10^{-3} \qquad (2.32)$$

$$N = 0.887\cdot\frac{28.6\cdot 13000}{0.67\cdot 0.68} = 723{,}85 \text{ кВт.}$$

2.4 Утилізація шламу газоочистки конвертерного газу

Стічні води, що утворюються під час очищення конвертерного газу, містять зважені тверді частинки та розчинені хімічні речовини. Їхній склад і кількість залежать від системи відведення та очищення відхідних газів, а також від технологічного процесу (виробництво сталі чи напівпродукту), причому характеристики стічних вод змінюються протягом плавки.

Основні характеристики кількості та складу стічних вод для конвертерів наведено нижче:

- Витрата води на очищення 1000 м³ газу, м³: 1-2,2
- Середня витрата стічних вод, м³/год: 240—800
- Вміст зважених речовин, мг/л:

до очищення газу: 145-600

після очищення газу: 2800-20,000

- Лужність, мг-екв/л:

до очищення газу: 1-5

Таблиця 2.1 – Результати розрахунку аеродинаміки газовідвідного тракту

Ділянка	$Q_{в.у.}$, м³/с	$\rho_г$, кг/м³	d, м	ω, м/с	l, м	Втрати тису			
						ζ	$\Delta P_м$,Па	ΔP_l,Па	$\Sigma\Delta P_i$, Па
Котел-утилізатор									300
Ділянка 1	174.6	0.337	3.3	20,4	200	1,5	105.18	127.4	232.58
Ділянка 11	87,3	0.337	3,3	21,02	18.0	0,39	29.03	8.12	37.15
Порожнистий скрубер									900
Ділянка 11I	39,57	0,675	1,5	22,4	17.0	2,35	397.96	33.38	431.34
Ділянка IV	79.13	0,675	2,1	22,8	36.0	0,39	68.42	84.21	152.63
Блок труб Вентурі									3396,26
Ділянка V	14,3	0,929	0,8	27,46	4,7	0,6	210.15	41.16	251.31
Краплевловлювач									178,74
Ділянка VI	14,3	0,929	0,8	27,46	9,0	0,45	157.62	78.80	236.42
Ділянка VII	14,3	0,929	1,2	20,9	4,5	1,2	243.48	15.21	258.69
Ділянка VIII	28,3	0.929	1,2	25.03	12,0	1,5	436.51	58.20	494.71
Ділянка IX	57,2	0,929	1,7	25,21	50.0	0,39	115.13	173.65	288.78
Блок труб Вентурі									**4250**
Ділянка X	14,075	0,948	0,8	27,3	4.7	0.6	211.96	41.51	253.47
Краплевловлювач									175, 23
Ділянка XI	14,075	0,948	0,8	27,3	9.0	0.45	158.97	79.49	238.46
Ділянка XII	14,075	0,948	1,2	20,9	4.5	1.2	243.48	15.21	258.69
Ділянка XIII	28,150	0,948	1,2	25.03	12.0	1.5	436.51	58.20	494.71
Ділянка XIV	56,3	0.948	1.6	28.01	18.0	0.42	156.19	83.67	239.86
									13069.03

Збільшення концентрації розчинених солей у воді відбувається через нагрівання і випаровування під час проходження через газоочисні апарати, а також внаслідок розчинення хімічних речовин із відхідних газів. Загальний вміст солей в оборотній воді варіюється від 1450 до 2600 мг/л за вихідної концентрації до 250 мг/л.

Хімічний склад осаду зі стічних вод газоочищення конвертерів:

Fe_2O_3: 90-95%

FeO: 1-2%

SiO_2: 2-4%

Al_2O_3: 0,5-1%

CaO: 0,1-0,5%

P: 0,05-0,1%

S: 0,02-0,04%

Mn: 1-2%.

Осад, після зневоднення, направляється на аглофабрику для використання у шихті агломерату. Його щільність становить 3,5-4,5 т/м³.

Гранулометричний склад осаду:

Частинки до 0,01 мм: 10-20%

0,01-0,1 мм: 35-50%

0,1-0,25 мм: 8-51%

0,25-0,5 мм: 8-15%

0,5-2 мм: 2-5%

Понад 2 мм: 8-25%.

Вимоги до води в конвертерних цехах:

На споживачів чистої води – тиск 0,45-0,55 МПа.

Для охолодження фурм – до 1,2 МПа.

Для газоочисних установок – 0,4-0,6 МПа залежно від конструкції.

Витрати води для очищення газів:

Конвертери з допалюванням і утилізацією тепла: 1–3 м³/1000 нм³ газу.

Без утилізації тепла: до 8 м³/1000 нм³ газу.

Без допалювання: 10-13 м³/1000 нм³ газу.

Методи та обладнання для очищення стічних вод у газоочисних системах киснево-конвертерних цехів

В очищенні стічних вод, що утворюються при газоочищенні конвертерів, використовується оборотна система водопостачання. На початкових етапах передбачено вилучення зважених часток розміром понад 500 мкм, видалення за необхідності оксиду вуглецю, освітлення води у радіальних відстійниках або флокуляторах, а також охолодження у спеціальних градирнях.

Видалення оксиду вуглецю проводиться для зменшення його концентрації в районі освітлювальних пристроїв до безпечного рівня для персоналу. Для радіальних відстійників приймається питомий гідравлічний режим із навантаженням 1 м³/год·м², а для флокуляторів – 3–3,5 м³/год·м².

Для покращення ефективності освітлення застосовуються високополімерні коагулянти. Зокрема, коагуляція поліакриламідом у дозуванні 1 мг/л дозволяє збільшити навантаження на радіальні відстійники до 3 м³/год·м², а на флокулятори – до 7 м³/год·м². Вода після обробки зберігає рівень залишкових зважених речовин у межах до 300 мг/л. Перед повторним використанням нагріту в процесі очищення воду охолоджують на градирнях, що знижує її температуру на 15–20°С.

Схема обраного оборотного водопостачання наведена на рис. 2.2. Стічні води самопливом потрапляють у приймальну камеру, де також вводять пар. Далі вода проходить через камеру дегазації, де видаляються великі частки суспензії, з додаванням коагулянтів (наприклад, поліакриламіду).

Попередньо очищені стоки подаються в гідроциклони-флокулятори та багатоярусні флокулятори. Освітлена вода після обробки направляється на градирні, де охолоджується, збирається в приймальних камерах і насосами повертається в систему газоочищення.

Шлами, уловлені в процесі, потрапляють у горизонтальні відстійники, після чого вони зневоднюються і транспортуються на утилізацію. Додатково шлами з флотаторів обробляються в радіальних згущувачах і фільтр-пресах.

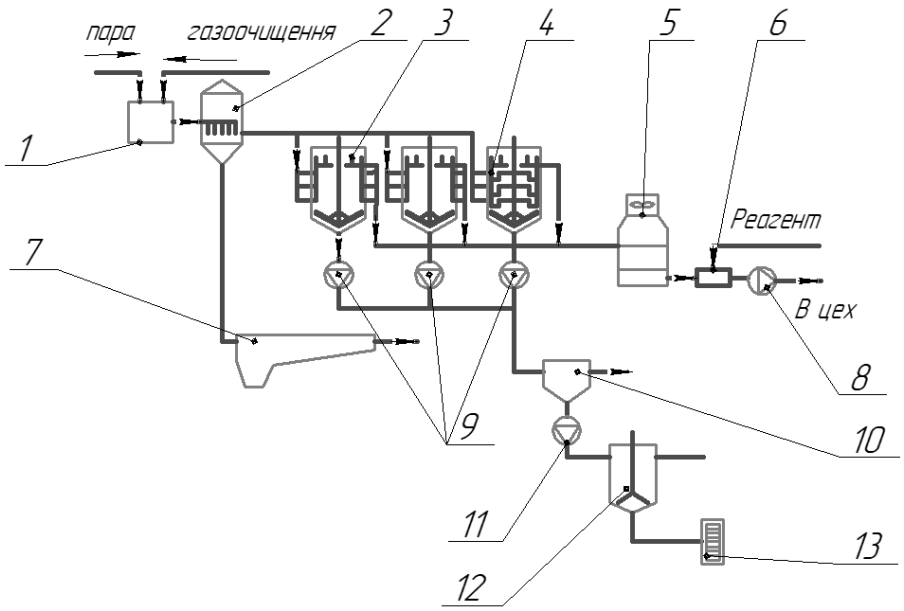


Рисунок 2.2 – Обрана схема оборотного водопостачання кисневоконвертерного цеха

Опис обладнання та продуктивність

- Флокулятори з висотою відстійної зони 10 м забезпечують ефективну обробку води при навантаженні до 6 м³/год·м².

- Градирні бризкального типу охолоджують воду для повторного використання.

- Системи фільтрації дозволяють знизити концентрацію суспензії до 60–80 мг/л при коагуляції поліакриламідом.

Продуктивність системи оборотного водопостачання газоочисток кисневоконвертерних цехів досягає 4000 м³/год.

Додаткові переваги використання оборотних систем Системи оборотного водопостачання дозволяють значно зменшити споживання прісної води та знизити екологічне навантаження на довкілля. Крім того, вони підвищують ефективність вилучення шкідливих домішок, що покращує якість викидів у повітря. Інноваційні рішення, такі як використання полімерних коагулянтів, дозволяють зменшити вміст залишкових забруднень у стоках і скоротити витрати на обслуговування обладнання. Отже, сучасні системи водоочищення забезпечують екологічність і економічність роботи кисневоконвертерних цехів.

3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

3.1 Характеристика потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

У конвертерному виробництві сталевої промисловості існує низка небезпечних і шкідливих факторів, які потребують особливої уваги:

Теплові випромінювання – виникають через роботу технологічного обладнання (конвертери, установки піч-ківш, МБЛЗ), розплавлений метал та шлак. Інтенсивність теплового опромінення може сягати 300–9000 Вт/м², що суттєво перевищує допустимі норми.

Газові викиди – утворюються під час продувки конвертера, сушіння ковшів і ремонту обладнання. Часто концентрація токсичних речовин перевищує санітарні норми, що становить загрозу здоров'ю працівників.

Пил – з'являється під час транспортування сипких матеріалів, заливання чавуну, випуску сталі та шлаку, створюючи ризики для органів дихання.

Джерела небезпек у виробництві

Високотемпературні рідини – розплавлений метал і шлак є постійною загрозою для працівників.

Рухомі частини обладнання та вантажі – потребують суворого дотримання правил техніки безпеки.

Електрообладнання – ризик ураження електричним струмом додає викликів у забезпеченні безпеки.

Особливі зони ризику

Зони теплового впливу:

Найбільше теплове навантаження отримують працівники під час відбору проб, вимірювання температури або ремонту горловини конвертера. Захист персоналу включає спеціальний термостійкий одяг і дотримання чітких протоколів техніки безпеки.

Зони газо- і пиловиділення:

Продувка конвертерів супроводжується викидами токсичних газів. Дрібнодисперсний пил, що утворюється під час роботи, є додатковим ризиком для здоров'я.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого процесу в конвертерному виробництві (карта умов праці), сталевар

№	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення (ГДК, ГДУ)	Фактичне значення	III клас Шкідливі і небезпечні умови і характер праці			Тривалість дії фактора за зміну, %
				I ст.	II ст.	III ст.	
1	Шкідливі хімічні речовини, мг/м^3					-	100
	1 клас небезпеки:					-	
	хром	0,01	0,036	-	3,6р	-	
	нікель	0,05	0,125	-	2,5р	-	
	марганець	0,05	0,2	-	4р	-	
	бенз (а) пирен	0,00015	0,00026	1,7р	-	-	
	2 клас: мідь	1,0	1,15	1,15р	-	-	
	3-4 клас: CO	20,0	80	4р	-	-	
	SO_2	10,0	37,5	3,75р	-	-	
	NO	5,0	29,5		5,9р	-	
2	Пил переважно фіброгенної дії, мг/м^3	4,0	143	-	-	35,8р	100
3	Вібрація (загальна та локальна), дБ	-	-	-	-	-	
4	Шум, дБА	80	89	-	9	-	80
5	Мікроклімат в приміщення: температура повітря, ºС						
	теплий період	16…27	39	-	-	12	
	холодний період	15…21	14	1	-	-	
	Швидкість руху повітря, м/с						
	теплий період	<0,5	0,8	1,6р	-	-	100
	холодний період	<0,4	0,8	2р	-	-	
	Відносна вологість виробництва						
	теплий період	<70	50	-	-	-	
	холодний період	<75	55	-	-	-	
	- інфрачервоне випромінювання, Вт/м^2	140	3000	-	-	3000	90

Умови праці в конвертерному виробництві характеризуються високим рівнем шкідливих і небезпечних факторів, що відповідають III класу 3-го ступеня за показниками шуму та мікроклімату. Робоче місце містить 4 фактори I ступеня, 2 фактори II ступеня і 2 фактори III ступеня. Ці показники дозволяють класифікувати умови як особливо шкідливі та важкі, що відповідає критеріям Списку №1.

Найбільш високі концентрації оксиду вуглецю та сірчистого газу спостерігаються над працюючими конвертерами, особливо в зоні дії газових пальників котла-утилізатора. У складі конвертерних газів вміст пилу коливається від 50 до 300 г/м³. Основними компонентами пилу є оксиди заліза (60–65% Fe), оксиди марганцю (2–6% Mn), а також SiO_2, CaO, Al_2O_3 та інші оксиди. Близько 80% частинок мають розмір до 0,5 мкм, що дозволяє їм легко поширюватися на значні відстані й довго залишатися в повітрі.

Джерела пилу та газів. Під час ремонту конвертерів і сталерозливних ковшів відбувається значне руйнування футерування, що супроводжується утворенням пилу. Шихтові матеріали також є суттєвим джерелом пилових викидів. У міксерних відділеннях гази та пил виділяються під час заповнення міксерів і зливу чавуну. На кожен метр чавуну, пропущеного через міксер, виділяється близько 60 г пилу та 370 г оксиду вуглецю.

Шумове навантаження**.** Експлуатація різного обладнання в цеху створює значний шум, який погіршує умови праці. Джерелами шуму є рух електромостових кранів, пересувні залізничні крани, механізми, трансформатори, а також сам конвертер. Рівень шуму на робочому місці сталевара перевищує нормативні значення на 9 дБА, що є порушенням встановлених стандартів ГОСТ 12.1.003-83 ССБТ і ДСН 3.3.6.037-99.

Інтенсивний шум у конвертерних цехах знижує продуктивність праці та створює передумови для розвитку професійних захворювань. Зниження цього впливу можливе за рахунок модернізації обладнання, встановлення шумопоглинаючих панелей і використання персоналом індивідуальних засобів захисту.

Крім того, для зменшення пилового навантаження застосовуються сучасні системи пиловловлювання, що забезпечують очищення повітря від дрібнодисперсних частинок. Використання таких технологій дозволяє суттєво зменшити ризики для здоров’я працівників і знизити забруднення навколишнього середовища.

3.2 Розробка заходів з покращення умов праці в конвертерному виробництві. Виробнича санітарія

Пил, що утворюється у виробничих процесах, негативно впливає на організм людини, викликаючи подразнення шкіри, очей, ясен, вух та проникаючи в легені. Такий вплив може призводити до розвитку специфічних професійних захворювань, серед яких найбільш поширеними є силікоз, антракоз, силікатоз та інші.

Для зменшення кількості пилу та газів у повітрі конвертерних цехів використовуються пилогазоочисні споруди та системи припливно-витяжної вентиляції. З метою мінімізації пиловиділення процеси просіювання, змішування та транспортування сипких матеріалів герметизуються, а пил видаляється шляхом аспірації безпосередньо з місць його утворення.

Тривалий вплив шуму може негативно впливати на здоров'я працівників, викликаючи порушення роботи серцево-судинної та нервової систем, зниження слуху, а іноді й повну глухоту. Для боротьби з цим явищем впроваджуються заходи звукоізоляції вбудованих приміщень, таких як пости управління чи кімнати відпочинку. Для зниження шуму агрегатів (електродвигунів, насосів) використовуються звукоізолюючі кожухи, виготовлені з металу завтовшки 2–3 мм, із внутрішнім облицюванням звукопоглинальними матеріалами.

Для зменшення шуму, що утворюється у повітряних та газопроводах, застосовуються глушники. Подібні заходи дозволяють суттєво поліпшити акустичний комфорт у робочих приміщеннях.

Підвищена теплова дія, яка виникає під час роботи з розплавленим металом та обладнанням, спричиняє перенапруження терморегуляційної системи людини та може порушувати тепловий баланс організму. Для видалення конвекційного тепла у цехах впроваджують системи аерації. Наприклад, у будівлях встановлюють аераційні ліхтарі типу КТИС, які монтуються на покрівлі й ефективно відводять надлишкове тепло.

Одним із заходів покращення умов праці є облаштування повітряних душів у місцях, де працюють конвертерники, що дозволяє створити локальні зони зниженого теплового навантаження.

Для оптимізації умов роботи сталевара пропонується встановлювати пости керування, які виконуються тепло- та звукоізольованими. У таких постах подається кондиційоване повітря, що дозволяє підтримувати комфортну температуру. Конструкція стін включає два шари: внутрішній – із червоної вогнетривкої цегли, а зовнішній – зі скловолокна для теплоізоляції.

Опалення цехових будівель також має важливе значення, оскільки, окрім створення комфортного мікроклімату, забезпечує збереження будівельних конструкцій. Недостатній рівень опалення може спричинити вогкість і прискорене руйнування споруд.

Температура повітря у конвертерних цехах залежить від кількості тепла, яке виділяється під час роботи конвертерів, розплавленого металу, ковшів та іншого обладнання. Додатково впливають фактори зовнішнього середовища, такі як сонячна радіація та температура стін і покрівлі будівлі. Комплексний підхід до регулювання мікроклімату дозволяє забезпечити безпечні умови праці для персоналу.

У конвертерних цехах, де виділяється велика кількість тепла, пилу (особливо дрібнодисперсного) та газів, створення комфортних і безпечних умов праці неможливе без ефективної організації повітрообміну. Важливою складовою заходів безпеки є природна вентиляція (аерація), яка здійснюється завдяки різниці температур між внутрішнім середовищем приміщень та зовнішнім повітрям, а також дією вітру. Така вентиляція є основним способом

боротьби з виробничими шкідливостями, оскільки вона дозволяє забезпечити необхідний рівень циркуляції повітря без великих енергетичних витрат.

Аерація ефективна, якщо в теплу пору року вона забезпечує підтримку температури повітря в цеху, яка не перевищує температуру зовнішнього повітря більш ніж на 5 градусів. Взимку важливо організувати систему так, щоб холодне повітря не потрапляло в робочі зони, що може призвести до незручностей для працівників. Управління природною вентиляцією здійснюється за допомогою фрамуг та ліхтарів, що відкриваються, які розташовуються вздовж стін цеху та на даху.

Іншим важливим аспектом для створення безпечних умов праці є належна освітленість. Освітлення у конвертерних цехах може бути як природним, так і штучним. Природне освітлення досягається за допомогою вікон та ліхтарів у даху, що дозволяє забезпечити достатній рівень освітленості на робочих місцях. Водночас важливу роль у цьому процесі відіграє регулярний догляд за склінням, оскільки забруднені вікна і ліхтарі значно знижують пропускну здатність світла.

Штучне освітлення також використовується у конвертерних цехах і поділяється на загальне (освітлення всього приміщення) та місцеве (освітлення окремих ділянок). Крім того, в цехах передбачено аварійне освітлення, яке працює від незалежних джерел у разі відключення основної електроенергії. Такі заходи забезпечують належну видимість навіть у разі непередбачених ситуацій.

Освітленість робочих приміщень також залежить від забарвлення стін, перекриттів і устаткування. Світлі тони поверхонь (біла, сірі, жовті) значно підвищують коефіцієнт віддзеркалення світла, що дозволяє зменшити кількість необхідних джерел світла. З цією метою конструкції та обладнання регулярно фарбуються в світлі кольори, що покращує загальну освітленість у цеху.

Вибір джерел освітлення також є важливим. Перевагу варто надавати газорозрядним лампам, таким як люмінесцентні з покращеною колірною передачею. Світильники повинні мати спеціальні відбивачі з непрозорих матеріалів та захисним кутом не менше 30°. Для безпеки працівників

використовується переносне освітлення з низькою напругою (12-36 В), що дозволяє знизити ризик електричних уражень.

Не менш важливою є постійна перевірка та вдосконалення системи освітлення та вентиляції, що дозволяє підтримувати оптимальні умови праці. У цехах, де існують підвищені температури, пил та інші шкідливі фактори, необхідно постійно оновлювати та вдосконалювати технічні засоби захисту, що дозволяє зберегти здоров’я працівників і забезпечити належний рівень безпеки на виробництві.

3.3 Заходи з електробезпеки в конвертерному виробництві

Електричне устаткування конвертерного цеху та заходи безпеки. Конвертерний цех оснащений різноманітним електроустаткуванням, включаючи синхронні та асинхронні електродвигуни змінного струму, обладнання з напругою понад 1000 В, електродвигуни, апарати керування, кранове устаткування та внутрішньоцехові електричні мережі з напругою до 1000 В. Основні елементи електричної системи включають автоматичні вимикачі, пічні трансформатори, мережі короткого замикання та автоматичні регулятори, що контролюють рух кисневої фурми.

Оскільки в конвертерному цеху використовується велика кількість потужного електроустаткування, а також через специфіку робочого середовища, цех відноситься до категорії особливо небезпечних приміщень за ступенем ураження людей електричним струмом. Виробничі приміщення характеризуються підвищеною температурою, значним вмістом електропровідного пилу, наявністю струмопровідних підлог і постійною загрозою одночасного контакту людини з металоконструкціями та частинами електроустаткування.

Небезпеки, пов’язані з електричними установками**.** У конвертерному цеху є багато джерел небезпеки для працівників, пов'язаних із можливістю ураження електричним струмом. До таких джерел належать електричний привід,

підйомно-транспортне обладнання, електрифіковані транспортні засоби, зварювальні апарати, освітлення та інші електричні прилади, включаючи ручний інструмент. В окремих випадках, під час експлуатації електродвигунів замкнутого типу, може статися випадковий дотик до проводів, що передають електричний струм. Це особливо небезпечно, коли клеми електродвигуна не захищені належним чином.

Велике значення має використання переносних електродвигунів, які живлять електричні інструменти. Якщо корпус такого двигуна опиняється під напругою, можливий серйозний ризик електричних уражень через великий контакт з поверхнею.

Схеми підключення та заходи захисту від електричних поразок. У конвертерному цеху для мереж з напругою до 1000 В застосовуються чотиридротові системи з глухозаземленою нейтраллю (для трифазного струму 380/220 В). Для систем з напругою понад 1000 В використовуються тридротові мережі з ізольованою нейтраллю.

Для захисту працівників від ураження електричним струмом застосовуються різноманітні ізоляційні засоби. Це включає ізолюючі штанги для роботи під напругою з роз'єднувачами високої напруги, діелектричні кліщі для підключення запобіжників, а також спеціальні діелектричні килимки, що використовуються для встановлення обладнання при різних рівнях напруги. Килимки мають товщину 3-5 мм для мереж до 1000 В і 7-8 мм для мереж понад 1000 В.

Всі металеві частини конструкцій повинні бути заземлені для зниження ризику ураження струмом. Це є важливим заходом безпеки відповідно до вимог нормативних документів, що забезпечує належний рівень захисту від електричних поразок.

3.4 Заходи з пожежної та техногенної безпеки

Безпека в конвертерному цеху: вибухова та пожежна небезпека.

Конвертерний цех, включаючи розливний проліт, відноситься до категорії А за вибуховою, вибухопожежною та пожежною небезпекою. Система газоочищення, міксерне відділення та завантажувальний проліт належать до категорії Б, а відділення підготовки шихти — до категорії Г. Вибухи в цеху можуть відбуватися при контакті розплавленого металу або шлаку з водою чи вологими матеріалами, а також внаслідок інтенсивних хімічних реакцій, які відбуваються під час продування, розкислювання або розливання сталі. Найбільшу небезпеку становлять вибухи у фурмах, коли під високим тиском відкривається склепіння, і через отвір викидаються розжарені кокс і гази, що можуть запалюватися, утворюючи тривалі язики полум’я.

Для запобігання поширенню вогню в цеху використовуються вогнестійкі матеріали, такі як спеціальні ізоляційні перегородки та дренажні системи, що обмежують проникнення газів у підвальні приміщення. Пожежне депо розташоване на відстані 4 км від основного цеху, що дозволяє оперативно реагувати на виникнення пожеж. Протипожежні перешкоди включають стіни з межею вогнестійкості до 2,5 годин, а також спеціальні двері, вікна та ворота, що забезпечують безпеку при виникненні надзвичайних ситуацій.

Засоби виявлення та гасіння пожеж у цеху. Для своєчасного виявлення пожежі в цеху встановлені теплові та димові сповіщувачі марок С-2000-СМК. Крім того, на зовнішніх виходах передбачено встановлення ручних пожежних сповіщувачів марки БолідИПР-513-3А. Всі сповіщувачі підключені до системи автоматичної пожежної сигналізації, яка подає звукові та світлові сигнали про загрозу, дозволяючи оперативно повідомляти черговий персонал про початок пожежі.

Автоматичні системи пожежогасіння, включаючи аерозольне і порошкове гасіння, встановлені в приміщеннях з електричним устаткуванням. Ці системи призначені для швидкого виявлення осередку пожежі, подачі сигналу про її наявність та автоматичної подачі вогнегасячої речовини для локалізації та ліквідації вогню на ранній стадії.

Захист кабельних споруджень та протипожежні заходи. Особливу увагу

приділено захисту кабельних споруджень, що є важливою частиною протипожежної безпеки. В кабельних тунелях та підвалах встановлені протипожежні бар'єри, включаючи неспаленні перегородки та системи автоматичної пожежної сигналізації, що складаються з датчиків, лінійної мережі та прийомних станцій. Ці датчики можуть бути тепловими або димовими, і вони розміщуються на стелях приміщень для забезпечення ефективного моніторингу.

Для гасіння пожеж використовуються хімічні пінні та вуглекислотні вогнегасники різних марок, такі як ОХП-10 та ВВ-2, ВВ-5, ВВ-8, а також пересувні ВВ-25 і ВВ-80. Всі ці вогнегасники відповідають вимогам НАПБ Б.01.008-2004.

Блискавкозахист та евакуаційні виходи. Блискавкозахист будівель конвертерного цеху забезпечується за допомогою залізобетонних фундаментів та сталевої сітки, що монтується на покрівлі будівель. Це дозволяє ефективно відводити електричні розряди в землю, мінімізуючи ризик пошкодження споруд.

Виробничі будівлі обладнані евакуаційними виходами для забезпечення безпеки працівників у випадку пожежі або аварії. Для кожної будівлі передбачено не менше двох евакуаційних виходів з шириною дверей більше 0,8 м, що відповідає вимогам безпеки та нормам для евакуації людей у надзвичайних ситуаціях.

Таким чином, процеси виплавки сталі – це комплекс технологічних викликів, які потребують не лише точного дотримання технологій, але й ефективних заходів захисту працівників. Сучасні засоби безпеки та регулярний моніторинг умов праці допоможуть мінімізувати ризики та зберегти здоров’я робітників.

4 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

4.1 Аналіз економічної доцільності. Визначення капітальних витрат на систему очищення газів

Розмір інвестицій у основні фонди визначається через прямий розрахунок кожного з елементів витрат. Для цього здійснюється оцінка окремих складових, які входять до загальної вартості вкладень.

Серед основних витрат на обладнання, яке необхідне для проєкту, вказана вартість устаткування, що включена в табл. 4.1. Цей підхід дозволяє точніше визначити потреби в інвестиціях та обґрунтувати економічну ефективність проекту.

Вартість приладів для контролю та вимірювання становитиме 25% від загальної вартості газоочисного обладнання:

$$C_{КВП} = 0{,}25 \cdot C_{ОСН.У.},$$

Витрати на установку та монтаж обладнання: См.у. = 0,3·(Сосн.у.с,+Сквп) грн.;

См.к. – вартість монтажу комунікацій, См.к. = 0,15·Ском., грн..;

Сн. – накладні витрати, якщо монтаж здійснюється спеціалізованими організаціями, Сн = 0,2·Су., грн..;

Визначаємо капітальні витрати через питомі показники, які розраховуються на 1000 м³ газу (грн./1000 м³).

$$C_К = (C_{ОСН.У.} + C_М + C_Н + C_{ЗД} + C_{М.К.}) \cdot \frac{1000}{3600 \cdot Q_С \cdot \tau},$$

де $Q_с$ – секундна витрата газів, що очищуються, за н.у., м^3/с;

τ – ефективний час роботи газоочистки за рік, год.

Результати розрахунків заносимо до табл.5.1.

Таблиця 4.1 – Капітальні вкладення в системи газоочищення конвертерного цеху

№	Показники	Базовий варіант			Проектний варіант		
		Кільк., один.	Ціна за од.. грн	Сума, тис грн	Кільк., один.	Ціна за од. грн	Сума, тис грн
1	Котел-утилізатор	1	1200000	1200,0	1	1200000	1200,0
	Блок труб Вентурі	2х4	1900000	1900,0	1	1900000	1900,0
	Насоси	1	250000	250,0	1	250000	250,0
	Вентилятор	1	350000	350,0	1	350000	350,0
	Шламове господарство	0	4000000	4000,0	1	4000000	4000,0
	Газгольдер	8	0	0,0	1	3000000	3000,0
	Циклон-краплевловлювач		120000	9600,0	8	1200000	9600,0
Загальна вартість основного обладнання				17300,0			20300,0
	Димова труба	0	490000	490,0			
Вартість основних споруд							
			17790,0			**20790,0**	
3	КВП		4325,0				5075,0
	Всього		22575,0			26465,0	
4	Витрати монтажу обладнання та споруд		6772,5			7759,5	
5	Вартість монтажу комунікацій		69,0			90,0	
6	Витрати на будинки		467,5			660,0	
7	Накладні витрати		4515			5293,000	
Загальні капітальні вкладення			34399,000			40267,500	
Всього капітальних вкладень на 1000 м³ газа			**40,951**			**47,938**	

4.2 Експлуатаційні витрати на очищення газу і вловлювання пилу

Щорічні витрати на експлуатацію системи очищення газів, грн./рік:

$$C = \sum_{i=1}^{n} C_i = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5 + C_6 + C_7,$$

де C_1 – витрати на електроенергію, грн.;

C_2 – витрати на основні та допоміжні матеріали, грн.;

C_3 – амортизаційні відрахування від основного та ремонтного фондів, грн.;

C_4 – основна і додаткова зарплата виробничих робітників, грн.;

C_5 – єдиний соціальний внесок, 22% від вартості основних фондів, грн.;

C_6 – витрати на поточний ремонт та утримання основних фондів, грн.;

C_7 – загальновиробничі витрати, грн.

Витрати на електроенергію:

$$C_1 = r \cdot l \cdot N \cdot \tau,$$

де r – вартість електроенергії, для промислових підприємств, у звичайні години та у годину пік, грн./кВт·год. ;

l – коефіцієнт, що враховує утримання обслуговуючого персоналу;

N – сумарна потужність електродвигунів до димососів та агрегатам живлення, кВт;

Амортизаційні нарахування на основні фонди (С3) розраховуються шляхом множення їх вартості на встановлені норми амортизації:

- для обладнання – 15%;
- для будівель і споруд – 5%;
- для мереж і комунікацій – 5%;
- для контрольно-вимірювальних приладів – 25%.

Результати розрахунку заносимо до табл. 5.2.

Витрати на технічне обслуговування та поточний ремонт основних засобів складають 15% від суми амортизаційних нарахувань:

$$Сп.р. = 0{,}15 \cdot С_{заг},$$

де $С_{заг}$ – амортизаційні відрахування від основних фондів, грн

Отжеі амортизаційні витрати становлять:

$$С_3 = С_{заг} + Сп.р.$$

Загальновиробничі витрати розраховуються як 30% від загальної суми основної та додаткової заробітної плати працівників, задіяних у виробничому процесі.

Додатковий дохід отримується завдяки утилізації продуктів, які виділяються в ході очищення газів.

$$E_y = Q_{ут} \cdot Ц,$$

де $Q_{ут}$ – кількість утилізованого продукту, т/рік;

Ц – ціна за одиницю продукції за 1т, Ц = 350 грн.

Результати розрахунку заносимо до табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Експлуатаційні витрати

№	Найменування	Од. вим.	Ціна, грн		Баз варіант		Проект. варіант	
					Величина витрат, грн/ 1000м³	Витрати на рік	Величина витрат, грн/1000 м³	Витрати на рік
1	Вода технічна	м³			3,96	3326400,0	3,96	3326400,00
2	Електроенергія	кВт· год	1,696	3,397	30,33	25480455,0	29,60	24850443,75
3	Амортизаційні відрахування	грн			4,46	3747125,0	5,24	4401250,00
4	ЗП основних робітників							
	- основна	грн			0,59524	500000,0	0,60	500000,00
	- додаткова	грн			0,26190	220000,0	0,26	220000,00
5	Економія від утилізації пилу	грн				4233361,9		4233361,9
6	Економія від утилізації тепла та хімічної енергії газу				0,9	800000	3,1	5600000
7	Загальні експлуатаційні витрати	тис. грн				29977,086		28219,32
8	Загальні експлуатаційні витрати з урахуванням утилізації пилу та енергії газу	тис. грн				24043,73		18385,72

4.3 Техніко-економічне обґрунтування рішень, які прийняті у проекті

Річний економічний ефект від впровадження системи газоочищення:

$$E = [(C_б + E_н K_б) – (C_{пр} + E_н K_{пр})]Q_{пр},$$

Отже

$$E = [(C_б - C_{пр}) - E_н(K_б - K_{пр})]Q_{пр},$$

Де $С_б$ і $С_{пр}$ – собівартість одиниці продукції відповідно базової й нової техніки, грн, табл. 4.2;

$К_б$ і $К_{пр}$ – питомі капітальні вкладення на одиницю продукції в базову й нову техніку, грн, табл. 4.1;

$Е_н$ – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних вкладень, для природоохоронних заходів $Е_н = 0,17$;

$Q_{пр}$ – річний об'єм конвертерних газів, тис.м^3.

Строк окупності капітальних вкладень в будівництво системи газоочищення:

$$Т_{окуп}= (К_{пр} - К_б)/(С_б - С_{пр}),$$

де $С_б$ і $С_{пр}$ – собівартість річного випуску продукції відповідно по базовому й проектному варіанту, грн;

$К_б$ і $К_{пр}$ – капітальні вкладення по базовому й проектному варіантах, грн;

Коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень становить:

$$E_{пр} = \frac{1}{T_{ок}} = \frac{E_y}{K}$$

Результати розрахунків заносимо до табл. 4.3.

Таким чином, розрахований термін окупності менший ніж нормативний.

Отже, запропонована схема очистки газів від конвертерів з частковим допалювання та з утилізацією вловленого пилу, теплоти газу та використання конвертерного газу як паливоа є економічно вигідним. Строк окупності запроєктованої системи очистки становить 4,6 роки.

Таблиця 4.3 – Основні техніко-економічні показники запроектованої установки

Показники	Одиниці виміру	Базовий	Проектний
Річна продуктивність газоочисної установки	млн. $м^3$	1344	1344
Початкова запиленість	$г/м^3$	80	80
Кінцева запиленість	$г/м^3$	0,009	0,009
Кількість вловленого пилу	т/рік	215007,11	215007,11
Кількість утилізованого пилу	т/рік	193506,4	193506,4
Капітальні вкладення	тис. грн	34399	40267,5
Електроенергія	тис.грн/рік	25480,46	24850,44
Водопостачання	тис.грн/рік	3326,4	3326,4
Економія від утилізації пилу	тис.грн/рік	4233,36	4233,6
Економія від утилізації тепла та хімічної енергії газу	млн.грн/рік	0,8	5,600
Загальні експлуатаційні витрати	тис. грн	29977,086	28219,32
Загальні експлуатаційні витрати з урахуванням утилізації пилу та газу	тис. грн	24043,73	18385,72
Термін окупності капітальних вкладень	рік	–	4,6
Коефіцієнт економічної ефективності капітальних вкладень	грн/(грн рік)	–	0,22

ВИСНОВКИ

В результаті теоретичних досліджень та розрахунків в кваліфікаційній роботі було зроблені наступні висновки:

1. При проєктуванні систем газоочищень перш за все необхідно забезпечити ефективне вловлювання пилу. При можливості, також необхідно розглянути можливість використання теплової та хімічної енергії відхідних газів від технологічних агрегатів.

2. Системи з частковим допалюванням – підтримується мінімальне розрідження в зазорі, що дозволяє підсмоктувати обмежену кількість повітря, необхідну для часткового допалювання оксиду вуглецю. Такий підхід дозволяє уникнути викидів газу в цех і підтримувати стабільну роботу системи. Є можливість використовувати теплоту та хімічну енергію конвертерного газу

3. Найкращою є система очищення конвертерного газу, що складається з таких складових: устаткування газовідведення з частковим допалюванням оксиду вуглецю, котла-утилізатора, порожнистого скрубера, скрубера Вентурі (першого та другого ступеня), димотяга, газгольдера та димової труби.

4. Застосування котла-утилізатора дозволяє ефективно використовувати тепло конвертерних газів, отримуючи до 250 тонн на годину гострого пару.

5. Друга ступінь очищення, представлена скрубером Вентурі, необхідна для забезпечення якості конвертерного газу, який використовується як паливо. Початкова концентрація пилу в газі після котла-утилізатора становить 30 г/м³, а після другої ступені очищення знижується до 9 мг/м³.

6. Якщо вміст оксиду вуглецю (CO) у конвертерному газі опускається нижче 35%, газ спрямовується не до газгольдера, а до димової труби та спалюється на свічці.

7. Стічні води від очищення конвертерного газу забруднені зваженими твердими частками та розчиненими хімічними сполуками. Для системи водопостачання газоочисток конвертерів використовується оборотний цикл. Процес включає попереднє вловлювання твердих часток розміром понад 500

мкм, віддувку вільного оксиду вуглецю (за необхідності), освітлення води у радіальних відстійниках і подальше охолодження у градирнях.

8. Розрахунок основних техніко-економічних показників показав, що термін окупності інвестицій становить 4,6 року, а коефіцієнт ефективності капіталовкладень дорівнює 0,22 грн/грн на рік.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Машини і агрегати киснево-конвертерних і електро-сталеплавильних цехів. URL: https://vukladach.pp.ua/MyWeb/manual/pidruchnuku13122023/Mahunu_i_agregatu_ztaleplavelnuh_cehiv/2_2/2_2.htm#%D0%BF2216 (дата звернення 02.10.2024).

2. Металургія : проблеми, теорія, технологія, якість : підручник / П. С., Харлаки, Г. С. Єршов, В. П. Тарасов [та ін.]. Донецьк : Норд-комп'ютер, 2005. 724 с.

3. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підруч. для металург. спец. вищ. навч. закл. /Д. Ф. Чернега [та ін.]. Київ : Вища шк., 2006. 503 с.

4. Конспект лекцій з дисципліни «Технологія виплавки сталі» (розд. «Конвертерні процеси») для студентів спеціальності 6.050400 «Металургія чорних металів» (усіх форм навчання) / Полєтаєв В. В. Дніпродзержинськ : ДДТУ, 2012. 104 с.

5. Верховлюк А. М., Нарівський А. В., Могилатенко В. Г. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва : навч. посіб. / за ред. В. Л. Найдека. Київ : Вініченко, 2016. 224 с.

6. Воденніков С. А., Тарасов В. К., Воденнікова О. С. Конструкції агрегатів чорної металургії : навч. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 192 с.

7. Каталог продукції ТОВ «Беленергомаш-БЗЕМ»: веб-сайт. URL: www.truboprovody.com/upload/iblock/06a/util.pdf (дата звернення: 03.12.2018).

8. Павлюк Ю.С. Повітродувні та насосні станції: Методичні вказівки до розрахунково-графічної роботи для студ. ЗДІА спец. 7.090401 спец. "Екологіч. аудит та охорона навколиш. середовища" всіх форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2007. 30 с.

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. Державні санітарні норми. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку/ М-во охорони здоров`я України. Головне сан.-епідем. упр. Київ, 1999. 34 с.

11. 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.

12. Бєлоконь К.В., Манідіна Є.А. Методичні вказівки до виконання дипломних робіт (проектів) за освітньо-кваліфікаційним рівнем «Магістр» для студентів ЗДІА спеціальності 183 «Технології захисту навколишнього середовища» денної та заочної форми навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 64 с.

13. Беренда Н.В., Троїцька О.О, Манідіна Є.А. Техніко-економічне обґрунтування проектних рішень: навч.-метод. посібник для студ. ЗДІА спец. 183 "Технології захисту навколишнього середовища", 263 "Цивільна безпека" всіх форм навчання. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 196 с.