

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Машинобудування, електричної інженерії та хімічних технологій
Хімічні технології та хімічне машинобудування

«До захисту
допущено»
Завідувач кафедри
_____ Збиковський Є.І.
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ” _____

2023 р.

Випускна кваліфікаційна робота

_____ магістр

(освітній ступень)

на тему Очищення димових газів установок спалювання твердого палива від оксидів сірки

Виконав: студент II курсу, групи ХТМ-22а

напряму підготовки (спеціальності) 161 «Хімічні технології та інженерія»

(шифр і назва напряму підготовки, спеціальності)

_____ Замковий О. О

Керівник к.т.н., доцент. каф. ХТХМ Каулін В.Ю.

Рецензент к.т.н., доц., доцент каф. ПД ДонНТУ Кутняшенко О.І.

Рецензент _____

*Засвідчую, що у цій дипломній
роботі немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.*

Студент _____

(підпис)

Луцьк – 2023

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: ____ с., ____ рис., ____ табл., 18 посилань.

Об'єкт дослідження: очищення димових газів установок спалювання твердого палива від оксидів сірки.

Метою даної магістерської роботи є вивчення та розробка ефективних методів очищення димових газів установок спалювання твердого палива від оксидів сірки. Висвітлення актуальних технологічних рішень та аналіз їхньої ефективності в контексті зменшення викидів SO_x стане основою для розробки нових стратегій та рекомендацій, спрямованих на покращення екологічної безпеки та сталого розвитку енергетичного сектору.

Проаналізовані недоліки в існуючих процесах очищення .

Були проведенні конструктивні розрахунки на потрібну кількість адсорбенту, який потрібно взяти для вловлювання SO_2 , також розглянуто оптимальний спосіб сіркоочищення, проведено аналіз вже існуючих методів, та виявлення основних факторів, що впливають на ефективність технології.

Розглянуті питання пов'язані з ефективними методами вентиляції.

СІРКООЧИЩЕННЯ, АДСОРБЕНТ, ТЕНДЕНЦІЯ РОЗВИТКУ,
ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ, ДИМОВІ ГАЗИ, ДІОКСИД СІРКИ

ABSTRACT

Explanatory note: ____ p., ____ fig., ____ table, 18 links.

The object of the study: purification of flue gases of solid fuel combustion plants from sulfur oxides.

The purpose of this master's thesis is to study and develop effective methods of cleaning flue gases of solid fuel combustion plants from sulfur oxides. Highlighting current technological solutions and analyzing their effectiveness in the context of reducing SO_x emissions will be the basis for developing new strategies and recommendations aimed at improving environmental safety and sustainable development of the energy sector.

The shortcomings in the existing cleaning processes are analyzed.

Constructive calculations were carried out on the required amount of adsorbent to capture SO₂, the optimal method of sulfur removal was also considered, an analysis of existing methods was carried out, and the main factors affecting the efficiency of the technology were identified.

The considered issues are related to effective methods of ventilation.

SULFUR CLEANING, ADSORBENT, DEVELOPMENT TREND,
TECHNOLOGY OPTIMIZATION, FLUE GASES, SULFUR DIOXIDE

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ВІД ОКСИДІВ СІРКИ	
1.1 Характеристика оксидів сірки в димових газах.....	8
1.2 Застосовані методи очищення та їхні переваги та недоліки.....	14
1.3 Аналіз вже існуючих технологій у сфері сіркоочищення.....	21
1.4 Тенденції розвитку технологій очищення димових газів.....	32
2 ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБУ СІРКООЧИЩЕННЯ	
2.1 Критерії вибору оптимального методу.....	41
2.2 Порівняння різних методів сіркоочищення.....	42
3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ВІД ОКСИДІВ СІРКИ	
3.1 Технічний опис розробленої технології.....	50
3.2 Лабораторне моделювання та експериментальне дослідження.....	53
3.3 Параметри та режими роботи розробленої технології.....	58
3.4 Ефективність та стабільність роботи технології.....	66
4 ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ	
4.1 Виявлення основних факторів, що впливають на ефективність технології.....	68
4.2 Методи оптимізації параметрів та режимів роботи.....	74
4.3 Результати оптимізації та їхні впливи на ефективність.....	75
ВИСНОВКИ.....	78
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81
Додаток А. Розрахунок на MathCad.....	88
Додаток Б. Охорона праці.....	89

ВСТУП

Сучасний етап розвитку людства визначається високим рівнем технологічного прогресу та постійним зростанням потреб у енергії. Значущим джерелом енергії залишається спалювання твердого палива, яке забезпечує значну частку світового виробництва теплової енергії. Однак, разом із зростанням обсягів використання твердого палива, актуальність проблеми забруднення довкілля викидами оксидів сірки (SO_x) у результаті цього процесу надто важлива для ігнорування.

Оксиди сірки, що утворюються під час згорання сірковмісних сполук, є серйозними забруднювачами повітря та є джерелом кислотних дощів, що негативно впливають на якість ґрунту та водойм. Без ефективних технологічних рішень, спрямованих на зменшення викидів SO_x в атмосферу, подальший розвиток сучасних енергетичних систем стає загрозою для довкілля та здоров'я населення.

Ця робота є актуальним внеском у сучасну науку та техніку, оскільки вона спрямована на вирішення нагальної проблеми забруднення атмосфери та вдосконалення енергетичних технологій для забезпечення екологічно чистого та сталого майбутнього.

Метою даної магістерської роботи є вивчення та розробка ефективних методів очищення димових газів установок спалювання твердого палива від оксидів сірки. Висвітлення актуальних технологічних рішень та аналіз їхньої ефективності в контексті зменшення викидів SO_x стане основою для розробки нових стратегій та рекомендацій, спрямованих на покращення екологічної безпеки та сталого розвитку енергетичного сектору.

Предмет дослідження: методи та технології, спрямовані на зменшення викидів оксидів сірки (SO_x) в атмосферу під час спалювання твердого палива в енергетичних установках. Дослідження включає в себе аналіз існуючих технологій очищення димових газів, їхню ефективність, технічні аспекти та вплив на довкілля.

Це дослідження спрямоване на розширення знань у галузі енергетичних технологій та вирішення актуальних екологічних проблем, пов'язаних із забрудненням повітря під час спалювання твердого палива.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконання наступних завдань:

- дослідити методи очищення димових газів від оксидів сірки;
- проаналізувати оптимальний спосіб сіркоочищення;
- розробити технології очищення димових газів від оксидів сірки;
- визначити оптимізацію розробленої технології.

Методи дослідження: Для вивчення очищення димових газів від SO_x використовуються хімічний аналіз процесів реакцій, технічний аналіз обладнання для очищення, оцінка екологічних наслідків та аналіз економічних аспектів.

Теоретична значущість даного дослідження полягає у розширенні наших знань щодо ефективних методів очищення димових газів від оксидів сірки установок спалювання твердого палива. Розуміння хімічних та технічних аспектів цього процесу дозволить вдосконалити існуючі технології та розробити нові стратегії зменшення забруднення повітря, що є важливим в контексті сталого розвитку та збереження екосистеми.

Практична значущість полягає в можливості впровадження отриманих результатів для поліпшення якості повітря та зменшення впливу спалювання твердого палива на довкілля. Розробка більш ефективних та екологічно безпечних технологій очищення може призвести до зменшення здоров'ям шкідливих викидів та сприяти забезпеченню сталої енергетичної системи. Практичні результати дослідження можуть служити основою для впровадження нових стандартів та регулювань в енергетичному секторі з метою зниження викидів SO_x та поліпшення якості довкілля.

Наукова новизна цього дослідження полягає у вивченні та розробці передових технологій очищення димових газів установок спалювання твердого палива від оксидів сірки. Аналіз хімічних та технічних аспектів

дозволяє виявити оптимальні методи та реагенти для ефективного зменшення викидів SO_x . Подальше впровадження отриманих наукових результатів може призвести до створення нових технологічних рішень, які будуть відзначатися високою ефективністю, низьким впливом на довкілля та забезпечать сталість виробництва енергії. Таке дослідження має потенціал стати основою для подальших наукових розробок у сфері енергетичних технологій та охорони довкілля.

1 ОГЛЯД МЕТОДІВ ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ВІД ОКСИДІВ СІРКИ

1.1 Характеристика оксидів сірки в димових газах

Оксиди сірки (SO_x) представляють собою групу хімічних сполук, що становлять важливу частину димових газів, формуючись під час процесу згорання палива у різноманітних промислових та енергетичних установках. Ці сполуки включають діоксид сірки (SO_2) та триоксид сірки (SO_3), кожен з яких має свої унікальні властивості та вплив на навколишнє середовище.

Безперечно, що оксиди сірки відіграють ключову роль у формуванні атмосферних забруднень, і їх вплив на якість повітря та здоров'я людей є надзвичайно важливим аспектом сучасного екологічного дискурсу. Крім того, ці сполуки мають глобальне значення, вносячи суттєвий внесок у процеси глобального потепління та сприяючи формуванню кислотного дощу.

Враховуючи цей контекст, проведення докладного аналізу властивостей та характеристик оксидів сірки в димових газах є необхідним етапом для розуміння масштабів проблеми та розроблення ефективних стратегій боротьби з її негативними наслідками. Детальне вивчення цих сполук дозволить виявити їхню роль у формуванні атмосферного складу, визначити джерела викидів, а також розглянути можливі шляхи зменшення впливу оксидів сірки на довкілля та здоров'я людей.

Оксиди сірки є значущими складовими димових газів, які формуються під час згорання сірки у різних процесах. Дві ключові хімічні сполуки, які складають цю групу, це діоксид сірки (SO_2) та триоксид сірки (SO_3). Кожен з цих оксидів має свої унікальні характеристики та відіграє важливу роль у визначенні якості повітря та впливу на здоров'я екосистем.

Діоксид сірки, або SO_2 , є однією з ключових хімічних сполук серед оксидів сірки. Ця речовина формується головним чином в результаті неповного згорання сірки у присутності кисню. Цей процес відбувається внаслідок ряду технологічних процесів, таких як спалювання вугілля, нафти та природного газу, що здійснюється в промислових установках та

енергетичних станціях. Більше того, SO₂ може утворюватися під час інших виробничих процесів, таких як виробництво металів, що робить його одним із важливих забруднювачів атмосфери.

Характеризується діоксид сірки характерним гострим та неприємним запахом, а також вираженими кислотними властивостями. Ці особливості роблять його особливо небезпечним для дихальних шляхів та здоров'я людей, оскільки великі концентрації SO₂ можуть викликати ряд респіраторних захворювань та інших проблем зі здоров'ям. Більше того, його взаємодія з атмосферними компонентами сприяє утворенню сульфатних аерозолів, які можуть мати важливий вплив на якість повітря та викликати зміни в екосистемі. Також, його участь у реакціях атмосферної хімії сприяє утворенню кислотного дощу, що робить його одним із факторів атмосферного забруднення, який потребує пристосувань та ефективних заходів контролю.

Послідовність вивчення діоксиду сірки (SO₂) в аспекті його властивостей та впливу представлена в табл. 1.1

Таблиця 1.1 Властивості та вплив діоксиду сірки (SO₂)

Властивість	Вплив
Характеристика утворення SO ₂	Діоксид сірки формується в результаті процесів неповного згоряння сірки у присутності кисню. Ця реакція може відбуватися як у природних умовах, так і внаслідок промислової та енергетичної діяльності, що залежить від споживання палива та інших технологічних процесів.
Вплив на повітря та здоров'я	SO ₂ є надзвичайно шкідливим для дихальних шляхів та легень людини. Високі концентрації діоксиду сірки можуть призвести до розвитку респіраторних захворювань, таких як бронхіт, астма та інші захворювання дихальних шляхів. Крім того, цей газ може спричинити загострення серцево-судинних проблем.
Атмосферна хімія та утворення аерозолів	У взаємодії з іншими компонентами атмосфери, SO ₂ може утворювати сульфатні аерозолі, які мають важливий вплив на якість повітря. Ці аерозолі можуть мати далекосяжні наслідки, такі як зміни в кліматі та вплив на здоров'я екосистем.
Участь у формуванні кислотного дощу	SO ₂ взаємодіє з іншими компонентами атмосфери, сприяючи утворенню кислотного дощу. Цей вид

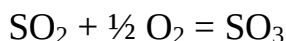
	атмосферного забруднення може впливати на якість ґрунту, водних ресурсів та екосистем в цілому.
Необхідність контролю та зменшення викидів	У зв'язку з серйозним впливом SO ₂ на здоров'я та навколишнє середовище, важливо розробляти та впроваджувати ефективні стратегії контролю викидів, такі як використання очисних установок, що дозволить зменшити концентрації діоксиду сірки у димових газах та поліпшити якість повітря.

Фізичні та хімічні властивості:

Двоокис сірки (SO₂) – безбарвний газ за звичайної температури, обдарований різким амбієнтним запахом, який спричиняє дискомфорт уже при невеликих концентраціях. Він може викликати подразнення слизових оболонок, кашель та ядюху. При тривалому вдиханні навіть невеликих кількостей може викликати запалення слизових оболонок та захворювання дихальних шляхів. Великі концентрації при вдиханні можуть призвести до набряку легень та в крайніх випадках – до смертельного результату.

Розчинність та хімічні реакції:

SO₂ має середню розчинність у воді (9,5% при 20°C). Його розчинення утворює нестійку сірчисту кислоту. Цей газ може піддаватися окисленню киснем повітря, перетворюючись у триоксид сірки згідно з реакцією:



Ступінь небезпеки та регулювання:

Максимально-разова гранично-допустима концентрація (ГДК) для населених пунктів складає 0,5 мг/м³. Двоокис сірки є одним із найпоширеніших забруднювачів промислових газів та відноситься до основних складових атмосфери. З інтенсивним розвитком промисловості, введенням в експлуатацію нових підприємств та активним розвитком енергетики, яка використовує паливо із вмістом сірки, зростає обсяг викидів, що містять діоксид сірки.

Джерела забруднення:

Основними джерелами викидів діоксиду сірки є кольорова металургія, чорна металургія, хімічна промисловість та, зокрема, димові гази електростанцій. Завдяки цим галузям, газ надходить до атмосфери, сприяючи забрудненню та погіршенню якості повітря.

Вплив діоксиду сірки у виробництві металів та електроенергії:

У виробництві кольорових металів, де використовуються сульфідні руди, двоокис сірки (SO_2) виникає під час випалювання руд у процесі видобутку різних металів, які переважно містяться у формі сульфідів:



Особливістю випальних газів кольорової металургії є високий вміст діоксиду сірки, який може сягати до 10% об'єму. Це створює серйозні проблеми для якості повітря та оточуючого середовища.

У чорній металургії, хоча гази аглофабрик є основними забруднювачами атмосфери, вміст діоксиду сірки у них є невеликим і не перевищує 0,5% об'єму.

Найбільш значущим джерелом викидів діоксиду сірки є димові гази електростанцій, де використовується паливо із вмістом сірки. Більше 70% всього діоксиду сірки, що потрапляє в атмосферу через викидні гази, припадає на електростанції. Це висвітлює важливість контролю за викидами з енергетичних джерел для зменшення негативного впливу на довкілля та здоров'я людей.

У 2022 році відзначається рекордно високий рівень викидів вуглекислого газу, що зумовлено зростанням споживання вугілля, нафти та газу, а також відновленням світової економіки після пандемії. Цю інформацію оприлюднила Global Carbon Project. За результатами дослідження прогнозується збільшення обсягу викидів CO_2 на 1%, що призведе до досягнення позначки 37,5 млрд тонн. Найвищий приріст викидів виявлено в США та Індії, де економічна активність та обсяги авіап перевезень швидко відновлюються після пандемійних обмежень.

Цього року вперше з 2016 року в Китаї, найбільшому споживачі вугілля, зафіксовано зменшення викидів на 0,9%, що пов'язують із жорсткою політикою "нульової терпимості" до COVID-19, яку впроваджує влада.

Збільшення використання вугілля в країнах Євросоюзу було урівноважено скороченням використання природного газу через обмеження його постачання з Росії. Викиди CO₂ в країнах спільноти у 2022 році зменшилися на 0,8%.

Триоксид сірки, або SO₃, є іншим важливим оксидом сірки, який утворюється в атмосфері в результаті окиснення діоксиду сірки (SO₂). Цей процес є складною хімічною реакцією, яка виникає за участі різноманітних каталізаторів та факторів, таких як наявність ультрафіолетового випромінювання та взаємодія з іншими атмосферними компонентами.

Послідовність вивчення триоксиду сірки (SO₃) в аспекті його властивостей та впливу представлена в табл. 1.2

Таблиця 1.2 Властивості та вплив діоксиду сірки (SO₂)

Властивість	Вплив
Характеристика утворення SO ₃	Утворення SO ₃ починається з окиснення SO ₂ в атмосфері, що є результатом подальших хімічних перетворень та реакцій, які відбуваються у повітрі. Цей процес є комплексним і вимагає впливу певних умов та каталізаторів для свого виникнення.
Характеристики SO ₃	SO ₃ відзначається меншою стійкістю та меншою поширеністю у природі порівняно з діоксидом сірки (SO ₂). Це пов'язано з його високою реактивністю та швидкою реакцією з водяною парою в атмосфері, що призводить до утворення сульфатних кислот.
Роль у формуванні кислотного дощу	Незважаючи на меншу концентрацію в порівнянні з іншими оксидами сірки, SO ₃ відіграє ключову роль у формуванні кислотного дощу. Взаємодія SO ₃ з водяними паровими в атмосфері призводить до утворення сульфатних кислот, які можуть змінювати рН води та впливати на водні екосистеми та ґрунти.
Екологічні наслідки та необхідність вивчення	Хоча SO ₃ менше стійкий та менше поширений, його роль у формуванні кислотного дощу та інших атмосферних явищах робить його значущим фактором в екологічному контексті. Ретельне вивчення властивостей та впливу SO ₃ дозволяє нам краще розуміти екологічні наслідки викидів оксидів сірки та

	розробляти стратегії зменшення їхнього впливу на навколишнє середовище.
--	---

Оксиди сірки, зокрема діоксид сірки (SO_2) та триоксид сірки (SO_3), представляють собою суттєвий внесок у забруднення атмосфери, викликаючи ряд негативних екологічних наслідків та сприяючи глобальним екологічним проблемам.

Оксиди сірки, як продукти згоряння сірки у різних процесах, вносять суттєвий внесок у забруднення атмосфери. Викиди цих сполук під час промислових та енергетичних процесів створюють атмосферний коктейль, що містить SO_2 та інші забруднюючі речовини.

Оксиди сірки, особливо SO_2 , можуть мати вплив на клімат, створюючи аерозольні частки та аерозольні сірковмісні хмари. Ці аерозолі можуть відбивати сонячне випромінювання, сприяючи охолодженню атмосфери, але водночас вони можуть також взаємодіяти з іншими атмосферними компонентами та мати складний вплив на енергетичний баланс планети.

Оксиди сірки входять до складу атмосферних забруднень, що можуть мати серйозний вплив на якість повітря. Високі концентрації SO_2 можуть призводити до різноманітних проблем зі здоров'ям, таких як респіраторні захворювання та іритація органів дихання.

Загальною характеристикою оксидів сірки є їхня суттєва роль у забрудненні атмосфери та сприяння глобальним екологічним проблемам, включаючи зміну клімату та забруднення повітря. Розуміння їхнього впливу та вжиття ефективних заходів для зменшення викидів є ключовими завданнями для збереження якості навколишнього середовища та забезпечення сталого розвитку.

Діоксид сірки (SO_2) та триоксид сірки (SO_3) мають важливий вплив на навколишнє середовище. SO_2 викидається під час згоряння палива та промислових процесів, що може викликати забруднення повітря та сприяти утворенню кислотних дощів. Високі концентрації SO_2 можуть викликати проблеми здоров'я людей та шкодити рослинам. Також, SO_2 може сприяти

утворенню сульфатних аерозолів, що впливають на клімат та атмосферні процеси.

Триоксид сірки (SO_3) утворюється в атмосфері в результаті окиснення SO_2 . Його атмосферна реакція може сприяти утворенню кислотного дощу та інших атмосферних явищ. SO_3 може також реагувати з іншими компонентами атмосфери, викликаючи хімічні зміни та впливаючи на склад атмосфери. У формі аерозолів, SO_3 може впливати на якість повітря та видимість.

Таким чином, викиди SO_2 та SO_3 мають серйозний екологічний вплив, викликаючи проблеми для повітря, води та ґрунтів, і створюючи виклики для збереження навколишнього середовища та здоров'я людей.

1.2. Застосовані методи очищення та їхні переваги та недоліки

У сучасному світі оксиди сірки, зокрема діоксид сірки (SO_2) та триоксид сірки (SO_3), є серйозними забруднювачами атмосфери, які виникають внаслідок промислової та енергетичної діяльності. Викиди цих речовин негативно впливають на якість повітря і становлять загрозу для здоров'я людей і екології загалом. Розв'язання цієї проблеми передбачає розробку та впровадження ефективних методів очищення, спрямованих на зменшення викидів оксидів сірки та поліпшення стану довкілля.

Використання передових технологій та інженерних рішень є ключовим етапом у боротьбі з забрудненням повітря оксидами сірки. Важливо розглядати не лише методи зменшення викидів, але й їхню взаємодію з атмосферним середовищем та можливі наслідки для здоров'я людей та природи.

У цьому контексті особливо актуальною є проблема розробки та впровадження технологій, спрямованих на ефективне зменшення викидів SO_2 та SO_3 , а також на забезпечення сталого розвитку, який враховує потреби сучасного суспільства, не порушуючи екологічну рівновагу. Такі заходи мають на меті не тільки зниження впливу оксидів сірки на навколишнє

середовище, але й створення сприятливих умов для здоров'я та комфортного існування людей.

Методи очищення газів від двоокису сірки (SO_2) можна розподілити за кількома основними критеріями, такими як фізичний принцип дії, застосовані засоби та технічні аспекти. Основні класифікації включають:

а) Фізичний принцип дії:

- Абсорбційні методи: Газы прокручуються через розчин поглинача (наприклад, розчин соди або аміаку), де відбувається поглиблення SO_2 , призводячи до утворення солей або інших хімічних сполук.

- Адсорбційні методи: Газы проходять через твердий сорбент, який здатний утримувати SO_2 на своїй поверхні.

б) Засоби очищення:

- Мокрі методи: Основані на використанні рідини або розчину для видалення SO_2 . Вони включають абсорбційні та мокрі методи очищення газів.

- Сухі методи: Використовують тверді сорбенти або інші матеріали без застосування рідини.

в) Технічні аспекти:

- Континуальні методи: Процес очищення відбувається безперервно.

- Дискретні методи: Очищення газів відбувається в певні проміжки часу чи при певних умовах.

г) Використання каталізаторів:

- Каталітичні методи: Застосовують каталізатори для зниження концентрації SO_2 .

д) Спеціалізовані методи:

- Електрофільтрація: Використовує електричне поле для видалення твердих частинок та SO_2 .

- Флотація: Застосовується для видалення SO_2 шляхом відокремлення газової фази.

Ця система класифікації допомагає глибше зрозуміти різноманітність методів очищення газів від SO_2 і вибирати оптимальний підхід залежно від конкретних умов виробництва та вимог до якості очищених газів.

Абсорбційні методи, які використовують розчини з поглиначами, такими як розчин соди або аміаку, представляють собою один із способів очищення газів від двоокису сірки (SO_2). У цих методах гарячі гази, що містять SO_2 , проходять через розчин, де відбувається абсорбція — процес розчинення SO_2 у рідині під впливом поглинача.

Однією з переваг абсорбційних методів є їхня висока ефективність у видаленні SO_2 та інших забруднюючих речовин з газів. Швидкість реакції в рідинній фазі дозволяє досягти високого рівня очищення. Крім того, їхнє проектування та експлуатація відзначаються простотою, що робить їх привабливими для використання в промислових процесах.

Проте існують недоліки цих методів. Наприклад, велика кількість використовуваної рідини може викликати проблеми з управлінням відходами. Крім того, зниження температури газів може вплинути на ефективність процесу. Утворені вторинні продукти, такі як солі, також вимагають подальшої обробки чи використання відповідно до екологічних стандартів.

З урахуванням цих факторів вибір між абсорбційними методами є ключовим для досягнення оптимальних результатів у зменшенні викидів SO_2 та покращенні якості повітря в промислових областях.

Адсорбційні методи очищення газів від двоокису сірки (SO_2) представляють собою технологічний підхід, що використовує твердий сорбент для видалення забруднюючих речовин із газової суміші. Процес адсорбції передбачає взаємодію молекул SO_2 з поверхнею сорбента, де вони утримуються, а очищений газ подається далі.

Адсорбційні методи мають кілька переваг. По-перше, вони не потребують значної кількості рідини, що робить їх менш проблематичними для обробки відходів. Крім того, зберігання та використання твердих сорбентів може бути більш енергоефективним у порівнянні з рідкими

розчинниками. Також можливість регенерації сорбента надає можливість подовжувати його ефективність у довгостроковій перспективі.

З іншого боку, адсорбційні методи також мають свої обмеження. Наприклад, залежно від умов процесу може знадобитися додаткова робота для регенерації сорбента, і ефективність процесу може зменшитися при великих концентраціях SO_2 . Також важливо приділяти увагу відновленню та обслуговуванню сорбента для забезпечення тривалої та стабільної ефективності очищення газів.

Очищення газів від двоокису сірки (SO_2) є важливим завданням, спрямованим на зменшення викидів цього токсичного газу та поліпшення якості повітря. Усі існуючі методи очищення можна систематизувати за принципом використання вологи, і вони поділяються на мокрі та сухі.

У методах, заснованих на абсорбції та відомих як "мокрі", гарячі гази пропускаються через процес промивання розчинами поглиначів. Ця процедура призводить до видалення SO_2 та паралельно призводить до охолодження газу до точки роси. Головною перевагою "мокрих" методів є те, що реакції між компонентом, який уловлюється, та розчином абсорбенту відбуваються у рідинній фазі, у розчиненому стані, що сприяє прискоренню ходу реакції, часто до миттєвого. Це гарантує високу швидкість процесу та ефективність очищення. "Мокрі" методи також відзначаються простотою газоочисних систем та надійною їхньою роботою.

Проте важливим недоліком є те, що гарячі гази зазвичай промиваються холодною рідиною, що може спричинити випаровування частини рідини та насичення газів водяною парою. Це може привести до значного зниження температури до $40\text{--}60^\circ\text{C}$, що в свою чергу веде до суттєвого зменшення піднімальної сили газу. Це може ускладнити евакуацію газів через димові труби та спричинити швидке осідання біля труби, що різко зменшує розподіл газів у повітрі.

У "сухих" методах, що ґрунтуються на адсорбції, очищення газів відбувається за допомогою твердих сорбентів без істотного зниження

температури. Останнім часом виникло нове напрямок, яким є зменшення вмісту діоксиду сірки у димових газах теплових електростанцій через спалювання палива з добавками, які зв'язують сірку у псевдозрідженому шарі.

Цей інноваційний підхід використовує спалювання палива з особливими домішками, що взаємодіють із сіркою у газоподібній фазі. У результаті такої реакції утворюється псевдозріджений шар, який адсорбує діоксид сірки та інші забруднюючі речовини. Цей процес дозволяє ефективно зменшити викиди SO_2 , уникаючи при цьому значного охолодження газів.

Перевагою "сухих" методів є те, що вони не вимагають роботи з холодною рідиною, тому не виникає проблем із зниженням температури газів та падінням їхнього тиску. Це забезпечує більш стабільні умови для евакуації газів через димові труби та уникнення швидкого осідання біля виходу, що покращує розсіювання забруднюючих речовин у повітрі.

Важливо враховувати, що при виборі між "мокрими" та "сухими" методами очищення газів слід враховувати конкретні умови виробництва, фінансові аспекти та екологічні вимоги, щоб обрати оптимальний метод для конкретної ситуації.

Технічно методи очищення газів від двоокису сірки (SO_2) можна класифікувати в залежності від режиму їхньої реалізації. Континуальні методи - це технології, в яких процес очищення відбувається безперервно, без перерв або планових зупинок. У такому випадку газова суміш із SO_2 постійно проходить через систему очищення, що забезпечує стабільний процес видалення забруднюючих речовин.

Навпаки, дискретні методи передбачають, що очищення газів відбувається у визначені проміжки часу чи за певних умов. Це може бути здійснене в реакції на певні події, такі як зміна концентрації SO_2 , температури чи інших факторів.

Переваги та недоліки цих методів визначаються їхнім використанням у конкретних умовах експлуатації. Континуальні методи часто відзначаються стабільністю та неперервністю процесу, що дозволяє забезпечити постійний

ступінь очищення газів. З іншого боку, вони можуть вимагати більших енергетичних ресурсів.

Дискретні методи можуть бути ефективними в умовах, де викиди SO_2 змінюються в часі або в залежності від конкретних умов. Однак вони можуть потребувати більше управління та регулювання, щоб забезпечити ефективність очищення у визначені моменти.

Використання каталізаторів у методах очищення газів від двоокису сірки (SO_2) включає в себе специфічний напрямок, де процес очищення відбувається за участі спеціальних речовин, що виступають каталізаторами.

Каталітичні методи передбачають використання каталізаторів для контролю хімічних реакцій, спрямованих на зменшення концентрації SO_2 у газовій суміші. Каталізатори сприяють хімічним перетворенням SO_2 , переважно у менш токсичні або менш забруднюючі сполуки.

Переваги каталітичних методів включають ефективність зниження концентрації SO_2 при нижчих температурах та умовах, порівняно з іншими методами очищення. Крім того, вони можуть бути економічно вигідними та екологічно безпечними, оскільки допомагають зменшити вплив шкідливих речовин на навколишнє середовище.

Недоліки каталітичних методів можуть включати високі витрати на виробництво та установку каталізаторів, а також їхню обмежену тривалість служби. Крім того, вони можуть виявитися чутливими до забруднень і кислотності газів, які проходять через систему очищення.

Електрофільтрація та флотація є двома спеціалізованими методами очищення газів від двоокису сірки (SO_2), кожен з яких використовується для конкретних цілей та має свої переваги та недоліки.

Електрофільтрація використовує електричне поле для видалення твердих частинок та SO_2 з газової суміші. Газу пропускаються через систему фільтрів, де тверді частинки та SO_2 наводяться на заряд електричним полем, і їх ефективно видаляють за допомогою фільтрації.

Переваги електрофільтрації включають високий ступінь видалення твердих частинок та SO₂, а також можливість використання у різноманітних умовах. Однак цей метод може вимагати значних енергетичних витрат, особливо при великих об'ємах газів.

Флотація використовується для видалення SO₂, розділяючи його з газової фази. Газ проходить через розчин, де додані реагенти або бульбашки створюють умови для відокремлення SO₂. Очищений газ виводиться, а SO₂ збирається або обробляється для подальшого використання.

Переваги флотації включають високий ступінь видалення SO₂ та здатність працювати з різними видами газів. Однак цей метод може бути витратним та вимагати уваги до підтримання оптимальних умов процесу. Кожен із цих методів може бути обраний в залежності від конкретних потреб і умов конкретної установки.

Усе вищевказане свідчить про наявність різноманітних методів очищення газів від двоокису сірки (SO₂), кожен з яких має свої переваги та недоліки. Вибір конкретного методу залежить від специфічних умов, вимог ефективності та характеристик самого процесу очищення.

Мокрі методи, такі як абсорбція, виявляються ефективними при великих концентраціях SO₂ та дозволяють досягти високого ступеня очищення. Однак вони можуть потребувати значних обсягів розчину поглинача та стикатися з питаннями, пов'язаними із зниженням температури газів.

Сухі методи, такі як адсорбція, ефективні при менших концентраціях SO₂ та зазвичай вимагають менше енергії. Однак їхня регенерація та обслуговування можуть становити виклик.

Технічні аспекти, такі як континуальні та дискретні методи, дозволяють адаптувати процес очищення до конкретних умов і обсягів викидів.

Використання каталізаторів є додатковим напрямком для зменшення концентрації SO₂, але вимагає уваги до вибору та підтримання каталізаторів.

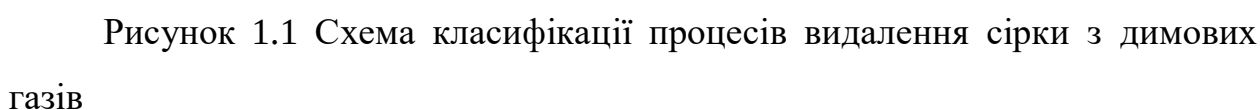
Спеціалізовані методи, такі як електрофільтрація та флотація, виявляються ефективними в окремих умовах, проте можуть вимагати специфічних умов експлуатації та уваги до деталей процесу.

Отже, розгляд різноманітних методів очищення газів від SO₂ підкреслює необхідність вибору та оптимізації методології очищення, враховуючи конкретні потреби та умови кожної ситуації.

1.3. Аналіз вже існуючих технологій у сфері сіркоочищення

Десульфуризація димових газів є важливою сферою у сфері охорони навколишнього середовища. У розвинених країнах з інтенсивним розвитком промисловості, процес десульфуризації димових газів став окремим галузевим напрямом з великими інвестиціями, управлінським, науково-технічним та виробничим потенціалом, а також регулюються законодавством і нормативами, що стосуються проектування та експлуатації газочисткових установок для видалення оксидів сірки. З'явилося численне число великих машинобудівних та приладобудівних компаній, які спеціалізуються на розробці та виробництві обладнання та приладів для цих потреб.

Класифікація методів десульфуризації димових газів, які містять SO₂, може бути виконана за різними критеріями: за типом і характером процесу, видом використовуваного сорбента, характером отриманого продукту і т.д. Згідно з класифікацією, прийнятою в Європейській економічній комісії ООН, всі методи десульфуризації можна поділити на регенеративні (циклічні) та нерегенеративні (не циклічні). З урахуванням фізико-хімічної суті процесу та його технологічних особливостей, розглядається найбільш раціональна класифікаційна схема методів десульфуризації димових газів, яка може бути представлена наступним чином (рис. 1.1).



Початкова постановка завдання щодо десульфуризації газів, зокрема димових газів теплових та електростанцій, виходила переважно із завдання зменшення викидів SO₂ у промислових регіонах. Такий односторонній підхід до проблеми призвів до того, що для досягнення цієї мети найбільше розповсюдилися технології десульфуризації, що базуються на рідкофазних методах абсорбційного очищення газів, особливо в країнах Центральної Європи, США та Японії, у кінці 60-х - початку 70-х років. Це, в свою чергу, породило нові проблеми, пов'язані з охороною навколишнього середовища.

Використання лужних, подвійних лужних, вапнякових чи вапняних методів очищення (установки першого покоління) супроводжується значним утворенням твердих і рідких відходів, які потребують спеціальних площ для зберігання. У деяких випадках ці продукти повинні бути закладені у ґрунт, що може призвести до забруднення ґрунтових вод. Під час процесу десульфурації димових газів на електростанціях застосуванням рідкофазних методів, можливі різні продукти залежно від типу технології. Наприклад, для електростанції з потужністю 500 МВт, яка використовує вугілля із вмістом сірки 3,5% і досягає ступеню вилучення сірки з газу на рівні 95%, можливі наступні годинні виробничі результати: 90 тонн сульфітно-сульфатної пульпи,

45 тонн гіпсу, 31 тонн сульфату амонію, 23 тонни сірчаної кислоти, 15 тонн діоксиду сірки або 7,5 тонн сірки. За новим підходом до проблеми десульфуризації газів, можливість використання отриманих продуктів визначає, яка з традиційних технологій очищення димових газів може бути ефективною в конкретній ситуації. В наш час, навіть при наявності інтенсивних досліджень у всьому світі з очищення газів від діоксиду сірки, найбільш розповсюдженими для цієї мети стали рідкофазні (мокрі) технології. Зокрема, серед них відзначаються не регенераційний вапняний метод і регенераційний сульфід-бісульфіднатрієвий метод [41].

Нижче розглядаються процеси, які ґрунтуються на різних абсорбентах із відсутністю їхньої регенерації після поглиблення діоксиду сірки. Це спрощує технологічні схеми у порівнянні з регенераційними методами. Незважаючи на широке освітлення подібних технологій у науковій та технічній літературі, розглянемо їхні особливості досить стисло.

Для очищення невеликих обсягів димових газів від SO_2 використовують водні розчини лужних солей натрію як абсорбент. Багаторазове використання абсорбента залежить від його концентрації та концентрації діоксиду сірки в очищуваному газі. Електроенергія, необхідна для даного процесу, становить 2-3% від виробленої котлоагрегатом (включаючи підігрів очищеного газу) [39].

Процеси подвійного лужного очищення [42] базуються на використанні розчину гідроксиду натрію як абсорбента, за яким слідує обробка розчину, що містить поглиблений діоксид сірки, гідроксидом кальцію. В результаті цієї додаткової обробки можна отримати суміш сухих солей кальцію або гіпсу з осадом.

Серед традиційних методів десульфуризації газів з низьким вмістом SO_2 , що побудовані у найбільшій кількості установок, виділяються технології, які використовують вапняк чи вапно. Ці методи застосовуються в більш як 80% установок десульфуризації по всьому світу [39]. На рисунку 1.2. наведено типову схему системи вологого способу десульфурації димових газів з

використанням вапна чи вапняку.

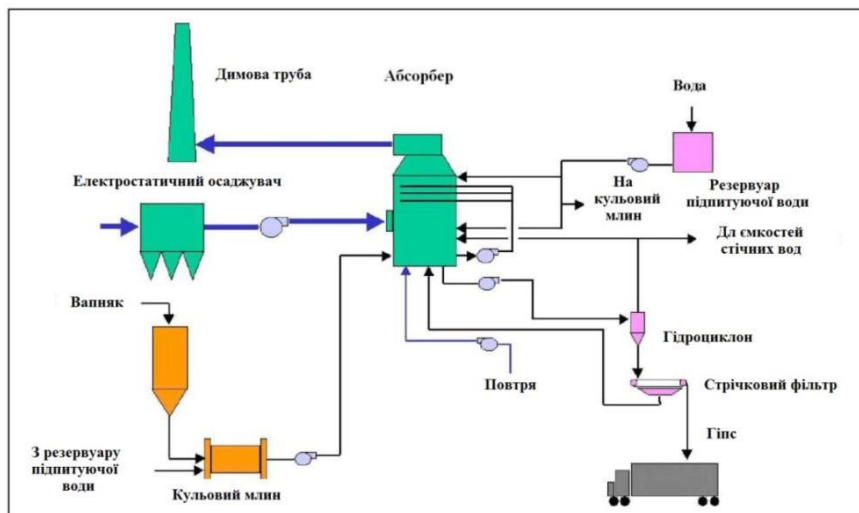


Рисунок 1.2 Схема проходження вологого процесу скруббування у процесі десульфурації з використанням вапна

Слід зазначити, що у ранніх системах десульфурації в якості сорбента використовувалось вапно через його більшу лужність та, отже, ефективність як реагента, порівняно з вапняком (CaCO_3). Однак подальше дослідження вказало на те, що ефективне очищення газу від SO_2 можна досягти, використовуючи більш доступний та економічний сорбент - вапняк.

В обох хемосорбентах існує багато спільних аспектів, таких як хімічні реакції, технологічні схеми та характеристика твердих продуктів газоочистки. Проте варто відзначити різниці. В переваги вапняної суспензії входять висока реакційна здатність, що забезпечує ефективну абсорбцію при малому співвідношенні абсорбент/газ, компактні розміри абсорберів та капітальні витрати, менший обсяг твердого осаду відпрацьованого абсорбенту та менше споживання води.

Переваги використання вапнякової суспензії виявляються в її економічності та легкій доступності, а також у високій енергоефективності, особливо при врахуванні вузла випалу вапняку в процесі виробництва вапна.

Системи мокрої десульфурації, які використовують вапняк, піддані впливу агресивних властивостей середовища, що може призводити до корозії, ерозії та абразивного зносу. Елементи теплотехнічної схеми, такі як вхідний

канал, абсорбер, вихідний канал, система нагріву і канали димової труби, вимагають захисту, наприклад, від гуми або футеровки, щоб запобігти впливу кислот, які утворюються внаслідок адіабатичного охолодження та насичення газів. Компоненти конкретної схеми, такі як розпилювальні сопла абсорбера, резервуари, насоси, труби, клапани та інше обладнання для дегідратації, схильні до корозії та абразивного зносу.

Напівсухі методи десульфуризації газів, введені наприкінці 80-х років, виявилися привабливими для використання з малосірчистим вугіллям та за умови помірної вимоги до ефективності уловлювання SO_2 на рівні 70-80%. Більшість рідкофазних (скрубєрних) установок десульфуризації газів, побудованих до 1978 року, були розроблені з урахуванням ефективності очищення 70-80%. Законодавчі стандарти щодо викидів діоксиду сірки діяли до кінця 1990 року в США і більшості країн Європейського Союзу (ЄС). Ураховуючи умови того періоду, введення нових напівсухих технологій, які дозволяли зменшити капітальні витрати на будівництво установок, зберігаючи при цьому рівень уловлювання SO_2 , виявилось логічним кроком.

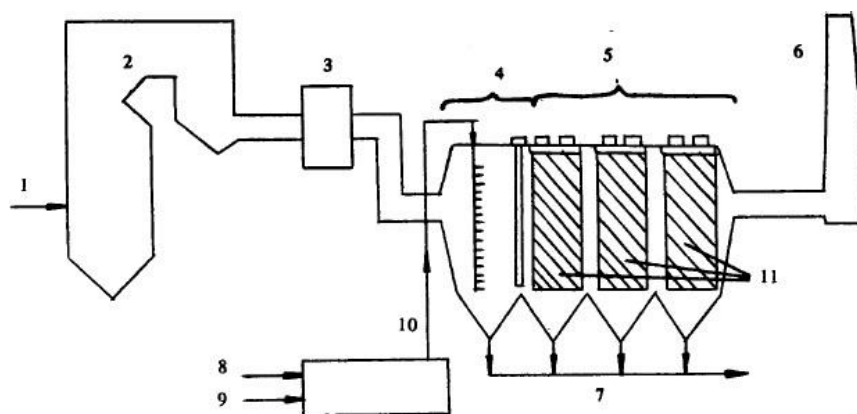
Переваги напівсухих систем включають можливість використання економічних конструкційних матеріалів, зменшення обсягу витрати води, легкість експлуатації та обслуговування. З іншого боку, вартість реагентів у напівсухих системах, як правило, вища, а ступінь уловлювання SO_2 нижча (на одиницю сорбенту, що витрачається), ніж у мокрих системах.

Суть цих процесів полягає в тонкому розпиленні високоактивного абсорбенту (суспензія дрібнорозмоленого вапна, розчин соди, розчин гідроксиду натрію тощо) в потоці гарячого газу, що проходить очищення. Процес включає не лише очищення газів від діоксиду сірки, але й повне випаровування вологи з абсорбенту за рахунок тепла димових газів. У процесі частину води перетворюється в тверду фазу у вигляді кристалогідратів сульфату і сульфіту кальцію. Сухі солі, що утворюються, відокремлюються у електрофільтрі або рукавному фільтрі.

Основні енергетичні витрати під час очищення газів визначаються

процесом розпилення абсорбенту, оскільки необхідний розмір крапель становить 30-50 мікрометрів. Для цього використовуються два типи розпилювачів: механічний обертовий, який працює на відцентровому ефекті, і пневматичний, що використовує стиснуте повітря. Вибір конкретного типу розпилювача залежить від розмірів реактора, тобто обсягу очищуваних газів.

Метод E-S SO_x [45, 47], розроблений компанією Babcock & Wilcox McDermott, базується на напівсухому процесі і його схема подана на рис. 1.3.



1 – вугілля; 2 – котел; 3 – повітряпідігрівач; 4 – реактор; 5 – електрофільтр; 6 – димова труба; 7 – сухі відходи; 8 – вапно; 9 – вода; 10 – суспензія; 11 – електрополя

Рисунок 1.3 Схема процесу E-S SO_x

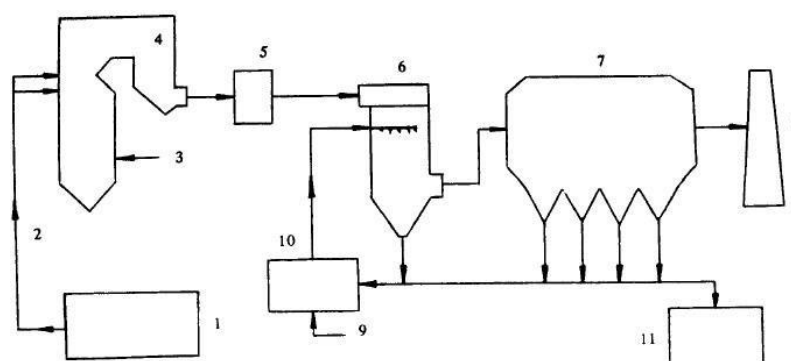
При впровадженні цієї системи використовується частина електрофільтра як камери для розпилення сорбенту, що стало можливим завдяки тому, що багато електрофільтрів у подібних системах розроблені з надлишковою місткістю, дозволяючи використовувати простір одного з електричних полів.

Після видалення першого поля утворюється вільний об'єм, який заповнюється вапняною суспензією. Діоксид сірки реагує з вапном, що міститься в краплях цієї суспензії, після чого краплі висихають, а сухі частинки осідають на електрофільтрових полях.

В ході впровадження процесу E-S SO_x на теплоелектростанції Р.Е.

Бюргер в штаті Огайо, що належить компанії Edison, було досягнуто запланованого видалення понад 50% сірки.

Метод LIDS, описаний у роботі [45, 48], об'єднує елементи технології LIMB, включаючи модифікацію пальників, введення вапна в топку та зволоження потоку димових газів, з модифікованим напівсухим процесом. Розроблений також компанією Babcock & Wilcox McDermott, метод LIDS зображено на технологічній схемі процесу на рисунку 1.4.



1 – отримання та приготування вапняку; 2 – топка, введення вапняку та кальцинування; 3 – вугілля; 5 – повітряпідігрівач; 6 – реактор напівсухої очистки; 7 – золовловлювач; 8 – димова труба; 9 – вода; 10 – система подачі суспензії; 11 – відходи на зберігання

Рисунок 1.4 Система LIDS, яка об'єднує введення вапняку (LIMB) та напівсухий процес очищення від сірки (E-S SO_x)

Вапняк вводять у верхню частину топки, де він перетворюється в оксид кальцію і частково реагує з SO_2 . Ефективність видалення SO_2 в цьому етапі становить 25-40%. Оксид кальцію і безводний сульфат кальцію переносяться димовими газами через котел, економайзер і повітряпідігрівач до напівсухого реактора, де сухі частинки CaO взаємодіють з водяною парою і SO_2 . Ці сухі частинки поглиблюють від 6 до 20% SO_2 , що міститься в газі.

Потім димові гази проймають через пиловловлювач, де відбувається уловлення летючої золи, сухих продуктів сірковидалення та nereagovanogo

CaO. Рукавний фільтр виступає в ролі золовловлювача, оскільки значна кількість SO_2 може бути зв'язана надмірною кількістю осаду на поверхні рукавів вапна. Однак у більшості випадків в якості пиловловлювачів використовуються електрофільтри, які дозволяють вловлювати до 20% SO_2 .

Останнім етапом в цьому процесі є збір уловленого твердого матеріалу і його гашення. Осад направляють до напіvsухого реактора, де його тонко розпилюють. Загальний рівень видалення SO_2 за технологією LIDS з використанням електрофільтра може складати 85% і більше за умови $Ca/S = 2$ та вихідної температури, приблизно на 10 °C вищої за температуру точки роси водяної пари. З рукавним фільтром досягається видалення більше 92% SO_2 за аналогічної стехіометрії і температури [48].

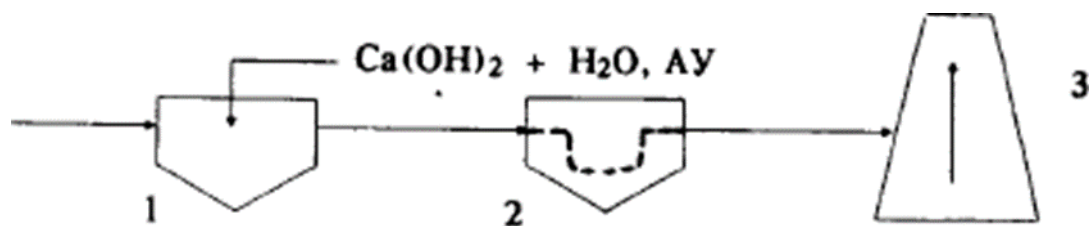
Технології E-S SO_x і LIDS, що розглядалися раніше, представляють собою нові системи для модернізації рідиннофазних установок десульфуризації, які базуються на використанні вапняку або вапнякових методів. Ці системи взаємодіють з SO_2 при значно зменшених витратах на тонну поглинутого S SO_2 , порівняно з традиційними рідиннофазними системами вапнякової очистки, і вимагають менших капітальних витрат.

Метод із циркулюючим киплячим шаром сорбенту від компанії "Лургі" був розроблений як альтернатива розпилювальній абсорбції. У цьому методі димові гази з температурою 140-160 °C проходять через циркулюючий киплячий шар подрібненого реагенту, такого як гідрат оксиду кальцію. Головною перевагою цього методу порівняно з напіvsухою розпилювальною абсорбцією є зменшення розмірів обладнання. Наприклад, реактор із циркулюючим киплячим шаром сорбенту діаметром 9 м може обробляти понад 600 тис. м³/год, забезпечуючи ефективність очищення на рівні 95%.

Використання циркулюючого киплячого шару для очищення газу від SO_2 призводить до гідравлічного опору апарата на рівні 2-3 кПа. Процес знепилювання перед введенням газу в реактор визначається вимогами до продукту, а введення вапна може проводитися як у вигляді суспензії, так і в сухому стані з подальшим додаванням води.

Загалом можна відзначити, що намагання скоротити капітальні витрати при десульфурації газів призвели до розробки в різних країнах систем напівсухого очищення. Ці процеси були розроблені, перевірені та впроваджені різними компаніями, такими як "Ніро Атомайзер" (Данія, Швеція), "Флект" (Фінляндія, Швеція), "Лургі" (Німеччина), "Роквелл Інтернешнл" (США), "Джой Манафактурінг" (США), "Дженерал Електрик" (США) та інші [39]. Адсорбційно-абсорбційні методи відрізняються від розглянутих напівсухих абсорбційних методів додатковою фазою, яка включає адсорбцію супутніх SO_2 домішок, таких як HCl , HF , діоксини і інші.

Процес "Semi-Dry" [49-55], розроблений компанією "Lurgi Energie und Umwelt GmbH" (Франкфурт, Німеччина), представляє собою поєднання напівсухого абсорбційного методу з використанням вапняку та адсорбційного методу з використанням активованого вугілля (АУ) як сорбента. Унікальність цього процесу полягає в тому, що, крім SO_x , він затримує сполуки ртуті, хлору, фтору і діоксини з димових газів. Робочі температури процесу коливаються в межах 120–150 °С, час контакту становить 6-25 секунд, а діаметр крапель сорбційної суспензії - від 20 до 80 мікрометрів. Згідно з технологічною схемою процесу, яка представлена на рисунку 1.5, цей процес включає два основні апарати: реактор розпилювальної сухої сорбції, де відбувається атомізація суспензії, і барабанний матерчатий фільтр від "Lurgi", де виділяється сухий залишок.



1 – розпилюючий абсорбер; 2 – матерчатий фільтр; 3 – димова труба

Рисунок 1.5 Принципова технологічна схема розпилювання сухої сорбції

Матерчатий фільтр не лише виконує роль фільтрації, але також сприяє

збільшенню періоду контакту між газом та сорбентом, що призводить до підвищення ефективності абсорбції. Загальний технологічний процес включає такі етапи: розчинення сорбенту, етап абсорбції, окиснення сульфіту, етап осадження та етап адсорбції.

Основні переваги процесу Semi-Dry включають безперервний хід процесу, який не вимагає обробки газу водою, легко доступні сорбенти, такі як $\text{Ca}(\text{OH})_2$ і активоване вугілля, одночасне видалення HCl , NO_x , твердих часток, важких металів, діоксинів, низькі капітальні та експлуатаційні витрати, можливість подальшого удосконалення процесу очищення за рахунок використання рідинного скрубера (з упарюванням рідини в абсорбері), тобто процес залишається напівсухим, і можливість тривалої експлуатації установки.

Процес NID базується на абсорбції SO_2 сухим реагентом, що містить вапно (CaO) або сухим гашенням вапна $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Може використовуватися будь-який із цих реагентів, також, наприклад, летюча зола, яка містить відповідну кількість лугу. У наявному напівсухому процесі десульфурації вапно подається у вигляді суспензії, тоді як у технології NID використовується зола з кількома відсотками вмісту вологи.

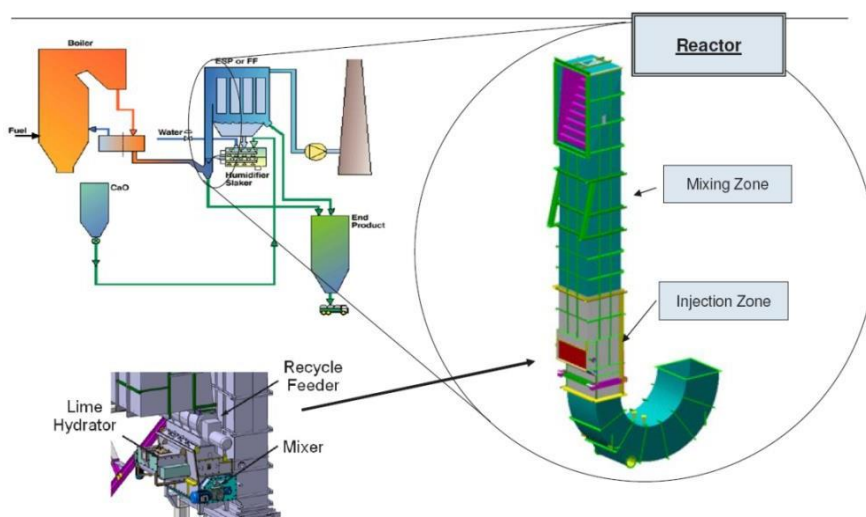


Рисунок 1.6 NID процес компанії Alstom

Цей розділ розглядає технологію NID, яка представляє собою важливий підхід до десульфурації газів. Вміст вологи вистачає для активації вапна для поглибленої абсорбції SO_2 при звичайних температурах напісного методу, яка зазвичай перевищує точку насичення на 10-20 °C. Практично діапазон температур зазвичай знаходиться від 65 до 75 °C.

Процес додає воду до реагента в зволожувачі перед введенням його в очищені гази. Зволожена зола рециркулюється для швидкого охолодження та зволоження в гарячих очищених газах, використовуючи інтегрований дифузор пиловловлювача. Об'єм реактора зменшено, використовуючи інтегрований дифузор пиловловлювача, на 20% менше, ніж у традиційних напісних методах. Це призводить до меншого часу реакції, менше ніж 2 секунди.

Унікальність технології NID полягає в подачі всіх реагентів в зволожувач окремо для максимального використання рециркулюючого абсорбента та мінімізації зносу зволожувача. Патентований міксер/зволожувач є ключовим елементом цього процесу. Рівноважна вологість золи після пиловловлювача зростає за рахунок постійного впорскування води у вхідний потік.

Твердий порошок, змочений у змішувачі, формує нелипку суміш для рівномірного розподілу в гарячих димових газах для ефективної абсорбції SO_2 . Після проходження через дифузор і пиловловлювач вологість золи зменшується до менше 3%. У цьому контексті процес NID є значно "сухішим" порівняно із існуючим напісним методом, таким як Dyras.

Реагентом у цьому процесі є вапно (CaO), яке гаситься в гідратоване вапно ($Ca(OH)_2$) сухим способом. Оскільки рециркуляційний матеріал містить 95% або більше твердих речовин, досягається високий ступінь рециркуляції, що перевищує традиційні показники в 30–50 разів, забезпечуючи високий ступінь використання вапна.

Після ретельного аналізу методів очищення димових газів від SO_2 визначено, що найбільш доступним та ефективним варіантом є напісний метод. Вартість експлуатації очищення димових газів цим методом може бути

знижена до узгоджених 0,2-0,6 гривень за кВт. Високий рівень ефективності досягається завдяки поєднанню напівсухого методу очищення в апаратах, що забезпечує максимальний час для взаємодії часток діоксиду сірки з адсорбентом. Це досягається через багаторазову сепарацію та фільтрацію за допомогою саморегенеруючого пилового шару у відцентрових фільтрах із системою послідовно розташованих криволінійних каналів.

1.4. Тенденції розвитку технологій очищення димових газів

Сучасний розвиток промисловості та енергетичних систем висуває перед суспільством нагальне завдання зниження викидів сірки в атмосферу. Зростаюча необхідність у впровадженні ефективних технологій очищення димових газів від сірки обумовлена серйозною проблемою, яку становлять викиди сірководню та діоксиду сірки. Ці речовини є основними забруднювачами повітря та становлять серйозну загрозу для якості довкілля та здоров'я людей.

Сучасні виробництва та енергетичні установки стають джерелами значних обсягів викидів сірки, що породжує негативний вплив на атмосферне повітря та екосистеми. З метою протидії забрудненню довкілля та відповідно до суворих екологічних стандартів, розвиток технологій очищення димових газів від сірки стає важливою стратегічною задачею.

Необхідність у вдосконаленні систем очищення обумовлена не лише регуляторними вимогами, але й турботою про збереження екосистем та здоров'я населення. Зменшення впливу викидів сірки на атмосферу та навколишнє середовище вимагає інноваційних рішень та застосування передових технологій у сфері очищення димових газів. Розвиток цих технологій є важливим етапом у створенні сталої та екологічно безпечної енергетичної інфраструктури, спрямованої на забезпечення сталого розвитку та збереження природних ресурсів для майбутніх поколінь.

Сучасні технології в сфері очищення димових газів орієнтовані на впровадження інноваційних методів сіркоочищення з метою ефективного зменшення викидів сірководню та діоксиду сірки. Одним із ключових напрямків є використання високоефективних каталізаторів та абсорбентів, що відкриває нові можливості для поліпшення процесів конверсії та абсорбції сірководню.

Сучасні інженерні рішення орієнтовані на застосування каталізаторів на основі рідкометалевих сполук для поліпшення конверсії сірководню в безшкідливі продукти. Наприклад, каталізatori на основі платини (Pt) або паладію (Pd) виявляють велику каталітичну активність у процесах конверсії сірководню у сульфіді або інші стійкі сполуки. Ці каталізatori допомагають підвищити ефективність сіркоочищення та знизити викиди в атмосферу.

Дослідження у сфері сіркоочищення включає розробку та вивчення нових абсорбентів з високою ефективністю та універсальністю за різних умов. Наприклад, використання активованого вугілля, зокрема вугілля, змішаного з оксидами металів, може служити як ефективний абсорбент для видалення сірководню та діоксиду сірки. Ці матеріали дозволяють ефективно взаємодіяти з сірконосними сполуками та забезпечують стабільні результати у широкому спектрі експлуатаційних умов.

Наприклад, компанія Johnson Matthey розробила технологію Katalco SCR (Selective Catalytic Reduction), яка використовує каталізatori на основі ванадію для ефективного видалення оксидів азоту та сірководню з димових газів.

Компанія SaarGummi використовує інноваційні абсорбенти, такі як гібридні матеріали на основі метал-органічних структур (MOF), для очищення сірководню з промислових викидів.

Ці приклади вказують на те, що впровадження інновацій у сфері сіркоочищення веде до створення ефективних та стійких технологій, спроможних ефективно знижувати викиди сірки та сприяти сталому розвитку.

Сучасний розвиток технологій у галузі очищення димових газів орієнтований на впровадження комплексних систем, що поєднують різні методи сіркоочищення. Це включає в себе використання як мокрого, так і сухого сіркоочищення для досягнення максимальної ефективності у видаленні сірки з димових газів.

Комплексні системи очищення спрямовані на оптимізацію процесів сіркоочищення для досягнення найвищого рівня ефективності. Це охоплює вдосконалення реакційних умов у мокрих та сухих сіркоочисних установках, а також оптимізацію параметрів абсорбції та конверсії сірководню.

Ключовим елементом комплексних систем є використання різних видів абсорбентів, які підходять для різних умов та типів сіркоочищення. Наприклад, в мокрих системах можуть застосовуватися аміачні або амінні розчини, тоді як у сухих системах можуть використовуватися абсорбенти на основі вапняку чи натрію бікарбонату. Використання різноманітних абсорбентів дозволяє досягти максимального видалення сірки та адаптувати систему до конкретних умов експлуатації.

Компанія DuPont розробила технологію DynaWave®, яка поєднує мокре сіркоочищення з використанням каталізаторів, що сприяє ефективному видаленню сірки та інших забруднювачів.

Система DFGD від Hitachi Zosen Inova комбінує сухе сіркоочищення з використанням високоефективних абсорбентів для оптимального видалення сірки з димових газів.

Ці приклади ілюструють, як розробка та впровадження комплексних систем очищення допомагає досягти максимальної ефективності у видаленні сірки, зменшуючи негативний вплив на довкілля та сприяючи сталому розвитку.

Застосування наноматеріалів у технологіях сіркоочищення представляє собою перспективний напрямок, спрямований на впровадження інновацій та поліпшення ефективності процесів. Використання наночастинок у

сіркоочищенні зокрема стає ключовим фактором, сприяючи розвитку ефективних та стійких технологій.

Наноматеріали визначаються своїми унікальними фізичними та хімічними властивостями, які можуть істотно покращити каталітичні процеси в сіркоочищенні. Застосування наночастинок дозволяє створити каталізатори з вищою поверхневою активністю, що призводить до збільшення кількості активних центрів реакції та зниження енергії активації.

Наночастинки дозволяють покращити каталітичні властивості матеріалів, що використовуються для конвертації сірководню. Висока поверхнева площа наноматеріалів та їхні унікальні електронні властивості сприяють більш ефективному взаємодії з сірководнем, що в результаті призводить до більш швидких та ефективних реакцій конверсії.

Перспективи використання наноматеріалів включають розробку нових синтетичних методів виробництва нанокаталізаторів, а також оптимізацію їхніх фізичних та хімічних властивостей. Застосування нанотехнологій у сіркоочищенні може призвести до створення більш стійких до деградації та довших застосувань каталізаторів.

Використання нанокаталізаторів на основі золота в каталізаторах для конвертації сірководню у сульфід, що виявляється ефективним для деяких промислових застосувань.

Розробка комплексних нанокомпозитів, що включають наночастинки різних металів та оксидів, для оптимізації каталітичних реакцій у процесах сіркоочищення.

Ці приклади свідчать про те, як використання наноматеріалів у технологіях сіркоочищення може стати ключовим фактором у розвитку більш ефективних та екологічно чистих процесів очищення димових газів від сірки.

Використання інтелектуальних каталізаторів, які реагують на змінні умови експлуатації, представляє собою одну з перспективних тенденцій у сфері технологій сіркоочищення. Цей підхід дозволяє створювати більш гнучкі та ефективні системи очищення, спроможні адаптуватися до змінних

умов та оптимізувати процеси в реальному часі, що в результаті призводить до зменшення споживання ресурсів та покращення екологічної ефективності.

Інтелектуальні каталізатори базуються на передових технологіях, таких як сенсори, мікроконтролери та системи штучного інтелекту. Вони здатні динамічно адаптуватися до змінних умов експлуатації, таких як температура, тиск, концентрація реагентів тощо. Це дозволяє підтримувати оптимальні умови для каталізу реакцій сіркоочищення та максимізувати їхню ефективність.

Інтелектуальні каталізатори забезпечують можливість оптимізації процесів сіркоочищення в реальному часі. За допомогою навчання машин та алгоритмів штучного інтелекту, ці системи можуть аналізувати дані про умови експлуатації та автоматично регулювати параметри роботи каталізатора для досягнення оптимальних результатів.

Інтелектуальні каталізатори спрямовані на ефективне використання реагентів та зменшення втрат при очищенні димових газів від сірки. Адаптація до змінних умов дозволяє уникати надмірного споживання ресурсів та ефективно використовувати каталізатори в умовах, що їм найбільше властиві.

Інтеграція сенсорів та систем автоматичного регулювання, які реагують на зміни умов експлуатації та забезпечують оптимальну роботу каталізатора.

Ці перспективи використання інтелектуальних каталізаторів свідчать про те, що цей підхід має великий потенціал для подальшого розвитку та впровадження в сучасні технології сіркоочищення, сприяючи ефективному використанню ресурсів та зниженню впливу на довкілля.

Розвиток технологій сіркоочищення сьогодні включає стратегічну інтеграцію з відновлювальними джерелами енергії. Цей підхід не лише допомагає вирішувати проблему викидів сірки в атмосферу, але й сприяє створенню більш сталих та екологічно чистих систем виробництва енергії.

Інтеграція технологій сіркоочищення з відновлювальними джерелами енергії дозволяє зменшити залежність від традиційних джерел енергії, зокрема від вугілля, що є основним джерелом викидів сірки у повітря.

Сучасні технології сіркоочищення можуть використовувати енергію з відновлювальних джерел, таких як сонячна та вітрова енергія. Це дозволяє оптимізувати роботу систем очищення та забезпечує стабільний енергетичний підхід до процесу.

Застосування сучасних технологій сіркоочищення сприяє створенню екологічно чистих систем виробництва енергії. Інтеграція з відновлювальними джерелами дозволяє мінімізувати вплив на довкілля та створювати енергетичні рішення, які відповідають сучасним екологічним стандартам.

Інтеграція технологій сіркоочищення допомагає збільшити ефективність використання відновлювальних джерел енергії. Системи, які забезпечують ефективне сіркоочищення, дозволяють оптимально використовувати енергію з відновлювальних джерел, забезпечуючи високий рівень чистоти в енергетичному виробництві.

Використання сонячної енергії для забезпечення енергії, необхідної для процесів сіркоочищення, що реалізується у деяких великих енергетичних об'єктах.

Впровадження вітрових електростанцій, обладнаних сучасними технологіями сіркоочищення для мінімізації викидів сірки під час електроенергетичного виробництва.

Ці приклади ілюструють, як інтеграція технологій сіркоочищення з відновлювальними джерелами енергії сприяє створенню сталих та екологічно чистих систем виробництва енергії.

Розвиток технологій очищення димових газів від сірки визначає ключові напрямки наукових досліджень, що вирізняються актуальністю та перспективністю. Інтеграція інноваційних методів, застосування новітніх матеріалів та впровадження комплексних систем очищення представляють собою основні тенденції розвитку в цій області, спрямовані на створення сталого та ефективного середовища.

Розвиток сучасних технологій сіркоочищення включає в себе постійну інтеграцію інноваційних методів, спрямованих на вдосконалення процесів

видалення сірки з димових газів. Використання високоефективних каталізаторів, наноматеріалів та інтелектуальних систем управління дозволяє досягати значних покращень у чистоті викидів та ефективності очищення.

Спрямування на застосування новітніх матеріалів, таких як високоефективні каталізатори та наночастинки, дозволяє підвищити ефективність процесів сіркоочищення. Інженерні рішення, спрямовані на оптимізацію фізико-хімічних властивостей матеріалів, грають важливу роль у підвищенні конверсії сірководню та діоксиду сірки.

Розвиток технологій орієнтований на впровадження комплексних систем очищення, які комбінують різні методи, такі як мокре і сухе сіркоочищення. Це сприяє досягненню максимальної ефективності та оптимізації процесів видалення сірки з димових газів, зменшуючи вплив на навколишнє середовище.

Загальним напрямком розвитку є створення сталого та ефективного середовища. Інтеграція сучасних технологій сіркоочищення з відновлювальними джерелами енергії допомагає зменшити вплив на довкілля та створювати енергетичні системи, які враховують вимоги сталого розвитку.

У цілому, розвиток технологій очищення димових газів від сірки визначається стрімкими науковими досягненнями та високим рівнем інновацій, спрямованих на забезпечення чистого, сталого та ефективного виробництва енергії.

Висновки до розділу 1

У першому розділі нашого дослідження ми провели комплексний аналіз методів очищення димових газів від оксидів сірки, починаючи з характеристики самих оксидів сірки у димових газах. Ми детально розглянули застосовані методи очищення, проаналізувавши їхні переваги та недоліки. Здійснили огляд існуючих технологій у сфері сіркоочищення, де врахували як позитивні аспекти, так і можливі обмеження.

Дослідження дозволило виявити важливі тенденції у розвитку технологій очищення димових газів, що спрямовані на поліпшення ефективності, зменшення впливу на навколишнє середовище та відповідність сучасним екологічним стандартам.

Основні висновки з розділу 1 свідчать про важливість глибокого розуміння характеристик оксидів сірки та переваг та недоліків різних методів очищення для подальшого вибору оптимального підходу у вирішенні екологічних проблем, пов'язаних із сірководнеговими викидами в атмосферу. Розділ став важливим кроком у побудові наукового фундаменту для нашого дослідження та визначення напрямків подальших етапів дослідження.

Спираючись на отримані дані щодо тенденцій розвитку технологій очищення димових газів від оксидів сірки, ми визначили області, які потребують подальшого дослідження та удосконалення. Один із перспективних напрямків – це розвиток ефективних і екологічно безпечних методів, які одночасно забезпечують високий рівень очищення від сірководневих сполук та мінімізують вплив на навколишнє середовище.

Аналіз існуючих технологій дав змогу виявити прогалини та можливості для оптимізації існуючих методів та впровадження новаторських рішень. Зокрема, звертає на себе увагу необхідність подальшого дослідження в сфері економічної доцільності та витрат на впровадження різних технологій, оцінка їхнього впливу на бізнес-процеси підприємств та їхню спроможність виконувати стандарти сталого розвитку.

У подальших розділах дослідження ми плануємо глибше розглянути вибір оптимального методу сіркоочищення, зосереджуючись на аспектах ефективності, економічної доцільності та екологічної безпеки. Наша мета полягає в розробці рекомендацій для підприємств із зменшення викидів сірководневих сполук, сприяючи тим самим сталому розвитку та збереженню екологічно чистого середовища.

2 ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО СПОСОБУ СІРКООЧИЩЕННЯ

2.1. Критерії вибору оптимального методу

Сучасна промисловість, розвиваючись і нарощуючи свої потужності, водночас стикається з наростаючим числом серйозних екологічних проблем. Однією із найактуальніших проблем є викиди сірководневодних сполук у відкрите повітря. Це є наслідком складних технологічних процесів та використання палив з високим вмістом сірки, що в результаті призводить до погіршення якості атмосферного повітря.

Особливо негативний вплив на довкілля мають сірководневодні з'єднання, що викидаються у великих кількостях. Вони є основною причиною формування кислих дощів, які сприяють кислотному навантаженню ґрунтів та водних ресурсів. Крім того, високий вміст сірки в атмосфері призводить до утворення сульфатів та інших сірчистих сполук, що негативно впливають на флору та фауну, а також сприяють процесам корозії.

Неспроможність ефективно контролювати та зменшувати викиди сірководневодних сполук може мати серйозні наслідки для довкілля та грожити здоров'ю людини. Тому вирішення цієї проблеми вимагає комплексного підходу, який включає в себе вибір оптимального методу сіркоочищення.

Здійснення такого вибору стає вирішальним етапом у забезпеченні сталого розвитку та збереженні екологічної рівноваги. Оптимальний метод сіркоочищення повинен бути не лише ефективним у зменшенні викидів, але й економічно доцільним для підприємства. Його впровадження повинно забезпечити збалансованість між захистом довкілля та економічною продуктивністю, щоб забезпечити тривалий і стабільний розвиток як промислових, так і екологічних секторів суспільства.

Ефективність очищення визначається як перший і фундаментальний критерій у виборі оптимального методу сіркоочищення. Цей аспект визначає, наскільки успішно обраний метод може зменшувати вміст сірководневодних сполук у викидах промислового об'єкта. Дана властивість надзвичайно

важлива, оскільки прямо впливає на ефективність процесу екологічного очищення та його вплив на природне середовище.

Для об'єктивного порівняння різних методів сіркоочищення і визначення їхньої ефективності, використання лабораторних досліджень та польових випробувань стає невід'ємною частиною досліджень. Лабораторії дозволяють вивчити різні аспекти очищення, такі як ефективність видалення сірководневодних сполук, стабільність методу в різних умовах, та його можливі обмеження.

Польові випробування, у свою чергу, дозволяють перевірити працездатність обраного методу в реальних умовах, враховуючи фактори, які можуть впливати на процес сіркоочищення на виробничому майданчику. Це може включати в себе фактори, такі як варіації складу викидів, температурні коливання, та інші зовнішні впливи.

Такий підхід до вивчення ефективності дозволяє здійснити об'єктивну оцінку та порівняння різних методів сіркоочищення, забезпечуючи науковий підхід до вибору оптимального методу, який враховує специфіку та умови конкретного виробництва чи об'єкта.

2.2. Порівняння різних методів сіркоочищення

Існуючий газоочисний обладнання на теплових електростанціях (ТЕС) в Україні включає лише сухі електрофільтри та мокрі зололовлювачі, які були введені в експлуатацію одночасно з основним устаткуванням енергоблоків. Їхні початкові показники ефективності відповідають екологічним стандартам, які були встановлені 40–60 років тому, але внаслідок тривалого періоду служби вони морально та фізично застаріли, що призвело до значного зниження їхньої продуктивності [11]. На жодній ТЕС в Україні не встановлено системи очищення димових газів від діоксиду сірки. Більшість вугільних ТЕС в Україні мають котли з рідким виведенням шлаку (РШВ), ефективність внутрішнього зв'язування сірки в яких складає 5,0%.

Єдиний енергоблок на Старобешівській ТЕС з котлом циркулюючого киплячого шару досяг європейських стандартів щодо викидів $N SO_x$ та $S SO_x$ ($< 200 \text{ мг/м}^3$), втрат теплоти через механічний недопал вугілля ($q_4 < 4\%$) та витрат умовного палива (345 г/кВтг відпущеної електроенергії) [8; 9]. Завдяки низькій робочій температурі горіння та введенню вапняку разом із зольовим вугіллям досягається мінімізація викидів оксидів азоту та сірки, а велика частина летючої золи та твердих продуктів десульфурації ефективно збирається сучасним електрофільтром.

Установки для сіркоочищення димових газів від сірки в Україні представлені дослідно-промисловими системами сухої десульфурації, які експлуатуються на енергоблоці №1 Зуївської ТЕС та енергоблоці №7 Курахівської ТЕС і досягають ефективності приблизно 60% при використанні вапна та близько 30% при використанні вапняку. Крім того, часткове видалення SO_2 з димових газів відбувається в мокрих зололовлювачах. В сучасних мокрих зололовлювачах уловлюється від 7 до 10% діоксиду сірки завдяки лужноземельним компонентам золи.

У процесі реконструкції або заміни значної частини потужностей вугільних енергоблоків теплових електростанцій (ТЕС) в Україні [8; 9], важливим етапом стає впровадження систем десульфуризації димових газів (ДДГ). На сьогоднішній день лише близько 20% вугільних енергоблоків ТЕС було реконструйовано, але ці заходи вирішили не всі екологічні питання, орієнтовані на сучасні стандарти. Решта енергоблоків утримуються в робочому стані завдяки капітальним та поточним ремонтам, але їхнє зношення постійно зростає, досягаючи критичних рівнів, які загрожують можливістю подальшої експлуатації без проведення реконструкції. В планах на реконструкцію на 2019 рік передбачено лише один пілотний проект щодо будівництва сіркоочисної установки на енергоблоці №2 Трипільської ТЕС, де планується використання технології напівсухої сіркоочистки ЦКШ Rafako [8].

При виборі конкретних технологій газоочищення важливо керуватися принципами технічної, економічної та екологічної доцільності, враховуючи

критерій "Найкращі доступні технології", які мають бути екологічно ефективними, економічно доступними і випробуваними в промислових умовах. Однак для зменшення негативного впливу на навколишнє середовище, ТЕС у всьому світі протягом понад 60 років розробляють та впроваджують системи очищення димових газів [8]. В Україні пріоритетом для теплоенергетики мають бути технології сіркоочищення, які вже пройшли промислове тестування на енергоблоках розвинених країн світу.

Димові гази виникають під час високотемпературної взаємодії складових палива з киснем повітря, тобто під час горіння. Основні складові димових газів - вуглекислий газ (CO_2), водяна пара (H_2O), діоксид сірки (SO_2) та молекулярний азот (N_2). Сірка, у вигляді різних сполук, входить до складу всіх твердих горючих вугільних копалин, зокрема вугільних пластів Донбасу, які містять середньосірчисте ($\text{Sd} — 1,6—2,5\%$) та сірчисте вугілля ($\text{Sd} — 2,6—4,0\%$) [10; 11]. Мінеральні сірчані сполуки, такі як пірит FeS_2 та сульфатна сірка, також присутні в вугільних шарах, іноді зустрічається елементарна сірка. Крім того, сірка входить до складу органічних компонентів вугілля. Діоксид сірки стає основним продуктом окислення органічної та піритної сірки, які є частинами вугілля.

Вугілля, яке надходить на теплові електростанції (ТЕС) України останнім часом, відрізняється вмістом сірки в діапазоні $0,6—1,3 \text{ г/МДж}$. Для порівняння, середній вміст сірки в американському напівбітумінозному вугіллі з басейну річки Паупер становить $0,26 \text{ г/МДж}$, а в родовищі Північні Аппалачі — $2,39 \text{ г/МДж}$ [12]. Відповідно до американських екологічних законів, коли вміст сірки у вугіллі становить менше $0,30 \text{ г/МДж}$, енергетичний котел може експлуатуватися без сіркоочищення. Таким чином, заміщення вугілля з високим вмістом сірки на вугілля з низьким вмістом сірки надає можливість відмовитися від будівництва дорогого обладнання для десульфуризації димових газів (ДДГ).

Для зменшення шкідливого впливу діоксиду сірки на навколишнє середовище розроблено численні промислові технології ДДГ на ТЕС, які

можуть бути визнані найкращими доступними технологіями. Найбільший інтерес представляють технології ДДГ, які забезпечують ефективне зв'язування діоксиду сірки на рівні понад 96% [6; 7]. Умовно технології ДДГ можна класифікувати на мокрі, сухі та напівсухі [8].

Ефективність технологій сіркоочищення визначається фізико-хімічними аспектами процесу, тривалістю перебування в реакційній зоні та площею поверхні контакту між газоподібною та дисперсною фазою. Таким чином, для збільшення площі реагування широко використовується рециркуляція дисперсної фази.

Найбільш поширеною технологією ДДГ є мокре сіркоочищення з використанням сорбентів із лужними властивостями, таких як вапняк, вапно, сполуки натрію, аміачна вода, морська вода і т.д. [8; 13; 14]. Хімічне зв'язування діоксиду сірки відбувається в спеціальному абсорбері — мокрому скрубєрі. Такі технології використовуються на приблизно 80% потужностей сіркоочисних установок на ТЕС і відповідають сучасним європейським екологічним вимогам.

Перевагами усіх методів мокрого сіркоочищення є високий рівень очищення, перевищуючий 95%, та надійність роботи обладнання. Однак значним недоліком є підвищений теплообмін між нагрітими відхідними газами та промивною рідиною. Це призводить до випарювання частини вологи розчину, насичення газів водяною парою та їх охолодження до температури нижче точки роси (приблизно 50°C), що може спричинити конденсацію водяної пари у димососі та димовій трубі. Таким чином, перед викиданням димові гази повинні підігріватися, використовуючи або спеціальний підігрівач, який використовує тепло відхідних газів (до сіркоочищення), або викидатися в атмосферне повітря через градирню чи «мокру» димову трубу. Більшість цих методів вимагає громіздкого обладнання та великої кількості енергії для власних потреб.

На сьогоднішній день приблизно 90% усіх мокрих установок десульфуризації димових газів на ТЕС у всьому світі працюють за мокрим

вапняковим/вапняним методом. Існує багато його різновидів та варіацій, які відрізняються різним технічним виконанням окремих елементів установки.

Проміжним звеном між мокрими та сухими методами є напівсухі методи, де реакція зв'язування діоксиду сірки відбувається як у рідкій фазі на краплях вологи, що вводяться у потік димових газів (за умови, що кількість введеної рідини значно менша, ніж для мокрих скрубєрів), так і на поверхні частинок сорбенту або продукту. Це досягається за рахунок випаровування усієї вологи крапель завдяки теплоті димових газів, при цьому температура газів не повинна опускатися нижче за водяну точку роси. Сухий порошок, що залишається після випаровування вологи, має осаджуватися в зололовлювачах. Використання напівсухих технологій десульфуризації димових газів у промисловому масштабі показало, що вони найбільш підходять для спалювання вугілля з низьким вмістом сірки на котлоагрегатах невеликої потужності. При цьому висока вартість сорбенту та підвищена запиленість вихідного потоку димових газів перед зололовлювачем компенсуються низькими капітальними витратами та витратами на власні потреби. Недоліком є обмежена практична цінність утвореного сухого субпродукту.

Досягнення високої ефективності сіркоочищення (до 98%) можливе при використанні напівсухого методу аміачної десульфуризації, що призводить до утворення сухого пилоподібного сульфату амонію $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ як продукту, придатного для використання як мінерального добрива. З урахуванням невеликих розмірів частинок сульфату амонію, оптимальним пиловловлювачем є рукавний фільтр [8].

Сухі методи десульфуризації димових газів забезпечують високу ефективність очищення в розмірі 98%. Вони базуються на процесах адсорбції, тобто поглинанні газів на поверхні твердих тіл [8; 13; 14]. В якості сорбентів, як правило, використовують речовини з пористою структурою та великою питомою поверхнею. Для поглинання діоксиду сірки використовують оксиди

та карбонати лужноземельних і лужних металів, а також активоване вугілля та різноманітні види коксів і напівкоксів.

Сухі методи дозволяють проводити реакцію між діоксидом сірки та поглиначем при високих температурах (540—1000°C), що означає можливість введення поглиначя в газовий потік безпосередньо в паливну камеру або на самому початку конвективної шахти. Після цього продукти очищення змішуються з летючою золою і направляються у відвал або використовуються як низькосортний будівельний матеріал.

Висока ефективність сіркоочищення та використання сорбенту були продемонстровані реакторами циркулюючого киплячого шару (ЦКШ) [8]. Многоразове використання частинок сорбенту, частково покритих шаром субпродукту, разом із вивільненням його під час підготовки до подачі, дозволяє значно збільшити поверхню контакту фаз, що призводить до підвищення швидкості реакції. Циркуляція сорбенту відбувається по колу: реактор ЦКШ — золоуловлювач — реактор ЦКШ. Сорбент вводиться у нижню частину абсорбера ЦКШ через систему сопел, куди також надходять забруднені димові гази через сопла Вентурі. Тривалість перебування димових газів в абсорбері ЦКШ становить приблизно 8 секунд. Після завершення процесу десульфуризації, димові гази та тверді субпродукти надходять до золоуловлювача (циклону, тканинного фільтру чи електрофільтру), де відбувається сепарація газової та твердої фаз. Більша частина уловлених твердих продуктів повертається у процес через систему підготовки сорбенту, а менша — частково направляється на утилізацію. Вологу в абсорбер вводять у вигляді крапель суспензії сорбенту або технічної води, які, протягом перебування в абсорбері ЦКШ, повинні висихати, а температура вихідних димових газів повинна перевищувати температуру точки роси на 15—20°C, при цьому забезпечується відносна вологість димових газів на рівні понад 40%.

Для забезпечення відповідності поточним технологічним нормативам щодо допустимих викидів SO₂ і вибору джерел постачання палива для

вугільних ТЕС, яке відповідало б вимогам поточних технологічних стандартів щодо допустимих викидів діоксиду сірки, важливо мати інформацію щодо питомих і валових викидів діоксиду сірки на ТЕС. Отже, виникає питання оцінки вихідної концентрації SO_2 у сухих відпрацьованих газах на основі характеристик вугілля.

Хоча концентрацію діоксиду сірки можна розрахувати за стандартною методикою [18; 19] при відомому елементному складі вугілля, проте в реальних умовах партії вугілля, які постачаються на ТЕС, супроводжуються технічним аналізом. З цим технічним аналізом неможливо провести розрахунки за зазначеною стандартною методикою [18; 19]. Таким чином, для вирішення завдання розрахунку питомих об'ємів димових газів та концентрації SO_2 в них, що утворюються при спалюванні вугілля, використовувався метод, розроблений в Інституті вуглехімії та інженерії Національної академії наук України [20].

Висновки до розділу 2

У розділі 2 нашого дослідження ми вивчили критерії вибору оптимального методу сіркоочищення, які визначають ефективність, економічну доцільність та екологічну безпеку вибраного підходу. Проведений аналіз критеріїв надав нам засади для об'єктивного вибору та порівняння різних методів сіркоочищення.

Перший і найважливіший критерій – це ефективність методу, яка визначається його здатністю зменшувати викиди сірковуглецевих сполук в атмосферу. Лабораторні дослідження та польові випробування дозволяють об'єктивно порівняти різні методи та обрати той, який найкраще відповідає вимогам зниження викидів.

Другим ключовим критерієм є вартість реалізації, яка охоплює як капітальні, так і операційні витрати. Економічна доцільність методу повинна

враховувати бюджетні обмеження підприємства та забезпечувати прийнятність витрат на впровадження та експлуатацію.

Додатково, важливим аспектом є вплив на довкілля. Екологічна безпека методу має відповідати сучасним стандартам та вимогам, оцінюючи викиди продуктів очищення, використання ресурсів та взаємодію з навколишнім середовищем.

У розділі ми виконали порівняльний аналіз різних методів сіркоочищення, звертаючи увагу на їхню ефективність, вартість та екологічну прийнятність. Методи були оцінені з урахуванням їхньої застосовності в конкретних умовах підприємства, забезпечуючи можливість обрати оптимальний підхід до сіркоочищення.

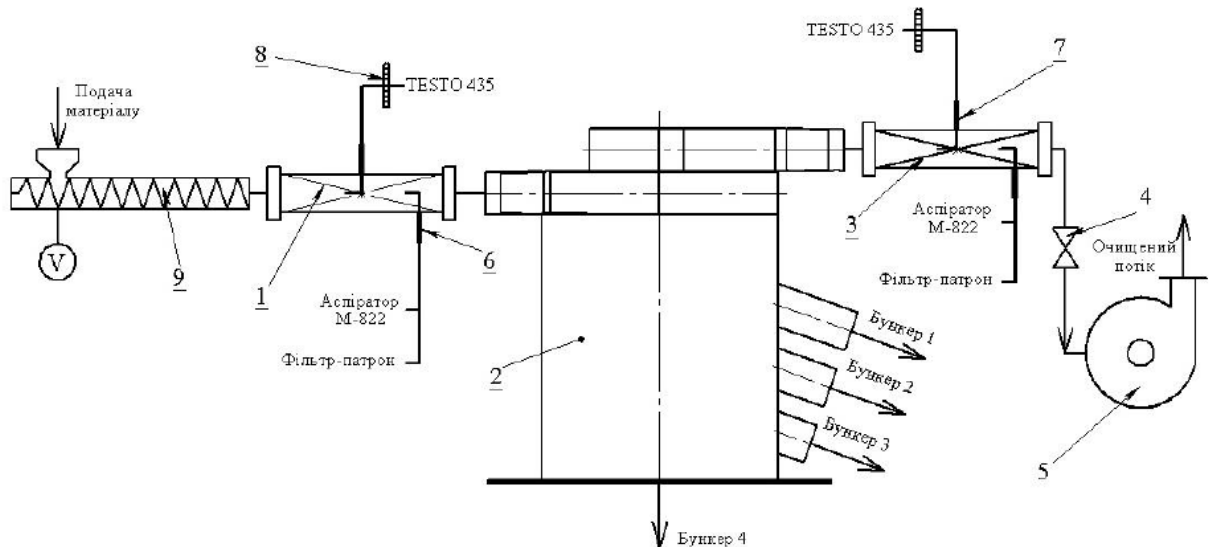
Результати порівняння методів є важливим етапом у визначенні оптимального шляху для конкретного виробництва, сприяючи прийнятним бізнес-рішенням та забезпечуючи баланс між ефективністю, економічною доцільністю та дотриманням екологічних стандартів.

Загальний висновок розділу 2 надає нам підґрунтя для визначення оптимального методу сіркоочищення, який буде враховувати усі аспекти ефективності, економічної прийнятності та екологічної безпеки для досягнення найкращого результату в контексті сталого розвитку та збереження довкілля.

3 РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЇ ОЧИЩЕННЯ ДИМОВИХ ГАЗІВ ВІД ОКСИДІВ СІРКИ

3.1. Технічний опис розробленої технології

Для проведення аеродинамічних експериментів з відцентровим фільтром в лабораторії, що займається дослідженням теплофізичних процесів в котлах, був створений лабораторно-експериментальний стенд (див. рис. 3.1)

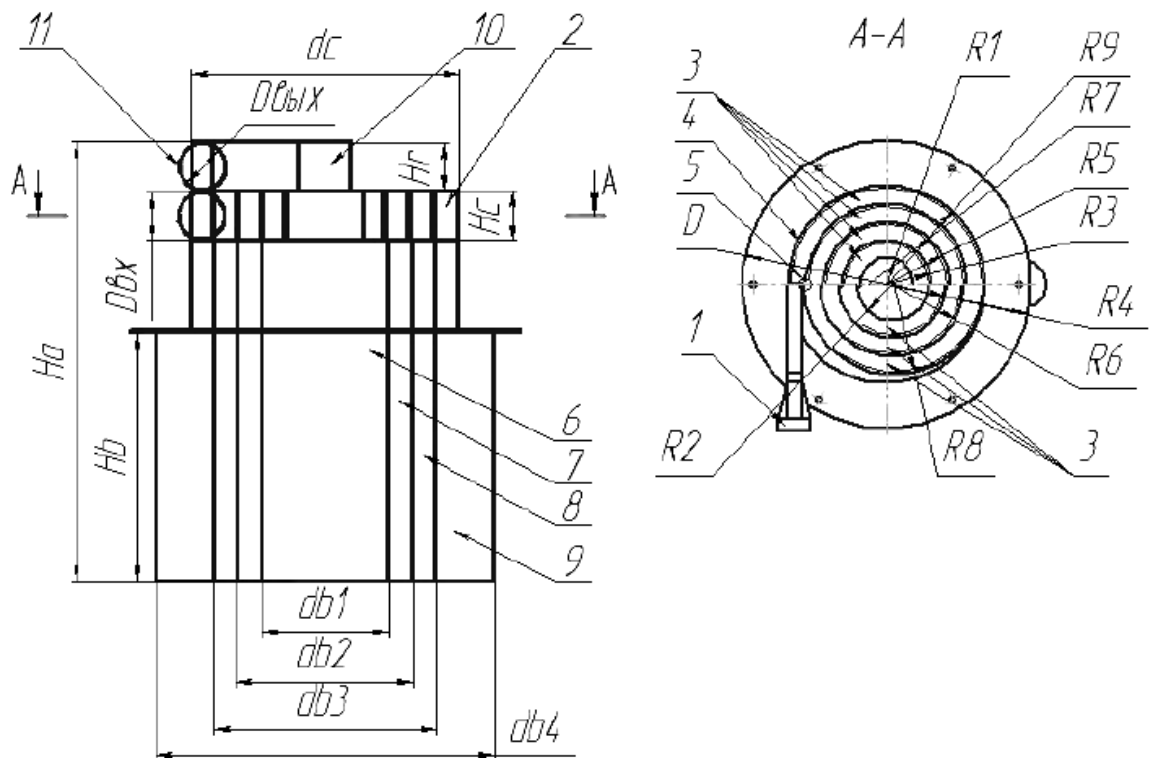


1,3 – вимірювальні газоходи; 2 – відцентровий фільтр; 4 – шибер; 5 – відцентровий вентилятор; 6,7 – носики для заміру експериментальних даних; 8 – термометр; 9 – шнековий живильник

Рисунок 3.1 Схема лабораторної установки

Експерименти на лабораторній установці виконувалися таким чином: для запуску випробувань активувався відцентровий вентилятор 5, а подача матеріалу здійснювалась за допомогою шнекового живильника 9. Матеріал, який надходив до живильника, вводився в вимірювальний газохід 1, де змішувався з повітрям. Сформований потік пилогазу направлявся в відцентровий фільтр 2, де тверді частки збиралися в системі каналів і поділялися по ізолюваним бункерам, що були зв'язані мережею каналів. Очищений газовий потік проходив через газохід 3 і відцентровий вентилятор 5, потрапляючи у навколишнє середовище. Робота лабораторної установки

відбувалася при розрідженні, яке створювалося відцентровим вентилятором. На рис. 3.2 зображений восьмиканальний відцентровий фільтр.



1 – вхідний патрубок; 2 – сепарційна камера; 3 – криволінійні канали; 4 – кільцеві щілини; 5 – рециркуляційні зазори; 6, 7, 8, 9 – бункери; 10 – розкручувач потоку; 11 – вихідний патрубок

Рисунок 3.2 Відцентровий фільтр

Основою відцентрового фільтра є сепарційна камера 2, в якій тверді частки, рухаючись по криволінійній траєкторії, збираються на периферії кожного каналу 3 і виводяться через зазори 5 з даного каналу в напрямку руху потоку. Весь полідисперсний порошок, разом із частиною газу, проходить через кільцеві щілини 4 у відповідних бункерах-збірниках (6, 7, 8, 9). Тут велика маса часток відкладається, а фракції, які залишаються у витаючому стані, повертаються через щілину в область активної сепарації (канали) і піддаються повторній сепарації. Бункер 6 приймає найгрубші частки з першого і другого каналів, бункер 7 - менші частки з третього і четвертого каналів, бункер 8 - з п'ятого і шостого каналів, а бункер 9 - найдрібніші частки

з сьомого і восьмого каналів зони сепарації відцентрового класифікатора. Газовий потік, очищений від порошку, виводиться з пристрою через патрубок 11 за допомогою розкручувача потоку 10.

Тверді частки, які збираються в системі каналів, відводяться через кільцеві щілини у всі чотири пари каналів восьмиканального відцентрового пиловловлювача в окремі ізольовані бункери, що не мають зв'язку один з одним. Розміри відцентрового фільтра подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 Розміри відцентрового фільтра

Позначення	Назва позначення	Відношення до діаметру ($D = 650\text{мм}$)
Ha	Висота апарату	1,126
Hc	Висота сепараційної камери	0,126
Hb	Висота бункерів	0,633
Dvx	Діаметр вхідного патрубка	0,123
Dvix	Діаметр вихідного патрубка	0,116
dc	Діаметр сепараційної камери	0,689
Hr	Висота розкручувача	0,126
db1	Діаметр бункера 1	0,326
db2	Діаметр бункера 2	0,449
db3	Діаметр бункера 3	0,566
db4	Діаметр бункера 4	0,898

На рис. 3.3 показаний загальний вигляд експериментальної установки.



Рисунок 3.3 Лабораторний стенд з відцентровим фільтром

3.2 Лабораторне моделювання та експериментальне дослідження

Під час експериментальних досліджень в апараті пропускався потік повітря з витратою від 100 до 200 м³/год і подавався твердими частками в межах від 150 до 350 г/хв. Дослідження проводилися за стаціонарної концентрації суміші на рівні 100 г/м³. Захоплення часток відбувалося у чотирьох парах каналів із різним радіусом кривизни. Ефективність вимірювалась для трьох режимів роботи апарату з витратами повітря 100, 150 та 200 м³/год. Визначення ефективності проводилося шляхом зважування кількості матеріалу, який потрапляв у бункер, та загальної кількості матеріалу, що подавався протягом експерименту.

Для проведення експериментів використовувалися тверді частинки коксу, каоліну, вапна, цементу, лігніну та піску, основні характеристики яких вказані в таблиці 3.2. Матеріали, застосовані у експериментах, мають діапазон медіанного діаметра (d_{50}) від 12 до 50 мкм і густину (ρ_p) від 1800 до 3450 кг/м³.

Таблиця 3.2 Характеристики матеріалів, що використовувались в експериментальних дослідженнях

Параметр	кокс	каолін	вапно	цемент	лігнін	пісок
Густина (ρ_n), кг/м ³	3450	3300	3260	3200	2300	1800
Медіанний діаметр часток (d_{50}), мкм	12	15	17	20	30	50
σ	2,8	2,92	3,12	3,1	2,2	2,9
Маса частинки, гр.	0,0005 1	0,00077	0,00098	0,00133	0,00216	0,00471

У розрахунках маси частинок використовувалося припущення, що всі частинки мають форму сфери, і коефіцієнт форми визначався як 1. Під час експериментальних випробувань були визначені такі параметри: аеродинамічний опір пристрою, температура газового потоку на вході та виході з пристрою, витрата газового потоку, концентрація пилу в газовому потоці на вході та виході за стандартною методикою MBV-081/12-0161-05 [82], а також дисперсний склад пилу.

Регулювання витрати повітря, яке проходило через пристрій, здійснювалося за допомогою шибера. Вимірювання тисків проводилося в газових потоках на вході та виході з пиловловлювача за допомогою трубки НДІОГАЗ і диференціального мікроманометра "TESTO 435". Вимірювання температури здійснювалося електронним міні-термометром від фірми "TESTO". Концентрацію твердих часток у потоці на вході та виході з пристрою визначали гравіметричним методом за допомогою імпактора або фільтр-патрона з базальтовим волокном, під'єднаного за допомогою силіконового шланга до трубки-носика для пиловідбору і аспіратора М-822. Технічні характеристики приладів наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 Характеристики пристроїв для проведення вимірювань

TESTO 435	Аспіратор М-822
Температура - 200...1370 °С Швидкість повітря - 0...60 м/с Відносна вологість - 0...100% Диференційний тиск - 0...25 мБар Абсолютний тиск - 0...2 атм Концентрація CO ₂ в повітрі - 0...10000 ppm Концентрація CO в повітрі - 0...500ppm Освітленість - 0...100 000 люкс	Кількість проб повітря, що відбираються одночасно: з витратою повітря від 0,2 до 1 - 2 л/хв з витратою повітря від 1 до 20 - 2 л/хв Ціна поділки ротаметрів: з витратою повітря від 0,2 до 1 - 0,1 л/хв з витратою повітря від 1 до 20 - 1 л/хв Розрідження, створюване повітродувкою - 4 кПа
Тип зонда Тип К: діапазон вимірювань -200 ... +1370 °С похибка ± 0.3 °С (-60 ... +60 °С)	Межа основної допустимої похибки вимірювань: 5% для діапазону 1-20 л/хв, ± 7% для діапазону 0,2-1 л/хв.

Концентрацію пилу у газовому потоці на вході та виході з циклонного пиловловлювача визначали, використовуючи пиловідбірну трубку. Ця трубка під'єднувалася за допомогою силіконового шланга до алонжу з фільтром АФА всередині, а потім до аспілятора моделі М-822. Фільтри АФА перед використанням зважувалися на аналітичних вагах з точністю до 0,0001 грама. Після цього аспіратор вмикали, і при встановленій витраті повітря протягом певного періоду часу здійснювався відбір проби.

Об'єм необхідної проби розраховувався за допомогою формули.

$$q = \frac{\pi d_n^2 \times 60}{1000 \times 4} \cdot 10^6 \mathcal{G}_s = 47100 d_n^2 \mathcal{G}_s, \text{ (л/хв)}$$

Для аналізу дисперсного складу пилу використовувався лазерний аналізатор дисперсності «SK Lazer Micron Sizer PRO-7000». Ефективність циклонного пиловловлювача визначалася методом балансу, що базувався на вимірюванні ваги пилу, який подавався живильником, та ваги пилу, який був зловлений циклонним пиловловлювачем, з точністю до 1 грама. Визначення

ефективності також проводилося шляхом врахування відношення зміни концентрації пилу у газовому потоці між входом і виходом з циклонного пиловловлювача до концентрації пилу у газовому потоці на вході до циклонного пиловловлювача.

Швидкість газопилового потоку обчислюється за формулою

$$v = \sqrt{\frac{2P_d}{\rho_g}}, \text{ м/с.}$$

де P_d - динамічний тиск, Па ρ_g - щільність газу при робочих умовах.

Витрата газового потоку визначається за формулою

$$Q = 3600 \cdot v \cdot S$$

де S - площа перерізу газоходу, м², v - швидкість газу в газоході, м / с.

Визначався діаметр змінного наконечника пиловідбірної трубки

Визначався діаметр змінного наконечника пиловідбірної трубки

$$d_n = d_{tr} \sqrt{v_{tr}/v_b}, \text{ мм}$$

при підтримці значення швидкості повітря в каналі пиловідбірної трубки не менше 15 м / с.

Знаходилась необхідна для відбору проб витрата запиленого повітря

$$q = \frac{\pi d_n^2}{4} \cdot 10^4 v_b = 47100 d_n^2 v_b \frac{T_p P_b}{T_b P_p} \sqrt{\frac{\rho_p}{\rho_k}}, \text{ л/хв.}$$

Розраховувався час відбору пилової проби

$$\tau = \frac{1000 \cdot M_{min}}{c_{пр} q}, \text{ мин}$$

достатню для мінімальної привіски фільтра $M_{min} \cong 1 \text{ мг}$, при передбачуваній запиленості $c_{пр}$, мг/м³.

Обчислювалася шукана запиленість повітря за масою фільтра АФА, одержаними до і після запилення.

$$c = \frac{1000(m_2 - m_1)}{q \tau}, \text{ гр/м}^3$$

Надійні вимірювання за допомогою пневмометричної трубки забезпечувалися за умови, коли початкова ділянка трубки мала довжину

приблизно 10 калібрів до перетину для вимірювань, що забезпечувалося за допомогою аеродинамічного стенду. Термодинамічні параметри (температура, тиск) повітря в лабораторії з аеродинамічним стендом під час проведення досліджень з невеликими відхиленнями були близькі до стандартних значень для нормальних умов (температура 20 °C; тиск 105 Па).

Розрахуємо потрібну кількість адсорбенту для вловлювання SO₂, який одержується при спалюванні вугілля з такими характеристиками: C² – 78; H –5; O – 7; S -2; W² – 8. Коефіцієнт надлишку повітря a=1,3.

Вхідні дані:

Вміст сірки у вугіллі: 2%
Коефіцієнт надлишку повітря: 1,3
Продуктивність топки: 10 тонн/год
Ступінь вловлювання SO₂: 90%

Розрахунок:

Розрахунок масової частки сірки у вугіллі:

$$W_S = 2\% / 100\% = 0,02$$

Розрахунок теоретичної кількості SO₂, що утворюється при спалюванні вугілля:

$$m_SO2_teor = W_S * m_вугілля * (1 + a) / (1 - a)$$

де:

m_SO2_teor - теоретична кількість SO₂, кг/год

m_вугілля - продуктивність топки, кг/год

a - коефіцієнт надлишку повітря

$$m_SO2_teor = 0,02 * 10000 * (1 + 1,3) / (1 - 1,3) = 3076,92 \text{ кг/год}$$

Розрахунок фактичної кількості SO₂, що утворюється при спалюванні вугілля:

$$m_SO2_fact = m_SO2_teor * \eta_вловлювання$$

де:

m_SO2_fact - фактична кількість SO₂, кг/год

η _вловлювання - ступінь вловлювання SO₂

$$m_SO2_fact = 3076,92 * 0,9 = 2769,23 \text{ кг/год}$$

Розрахунок необхідної кількості адсорбенту:

$$m_адсорбенту = m_SO2_fact / A_адсорбенту$$

де:

m_адсорбенту - необхідна кількість адсорбенту, кг/год

A_адсорбенту - адсорбційна здатність адсорбенту, кг SO₂/кг адсорбенту

$$m_адсорбенту = 2769,23 / 0,5 = 5538,46 \text{ кг/год}$$

Отже, для вловлювання SO₂, який одержується при спалюванні 10 тонн/год вугілля з вмістом сірки 2%, при коефіцієнті надлишку повітря 1,3 та ступені вловлювання SO₂ 90%, знадобиться 5538,46 кг/год адсорбенту.

3.3 Параметри та режими роботи розробленої технології

Алгоритм розрахунку (зображений на рис. 3.4) базується на трьох ключових компонентах: матеріальний баланс потрібного реагента для процесу десульфуризації діоксиду сірки та кількості води; другий компонент - розрахунок аеродинамічної структури газового потоку в реакторі для забезпечення необхідного часу контакту між реагентом і газовим середовищем; третій - конструктивний розрахунок основних геометричних параметрів апаратів очищення [49].

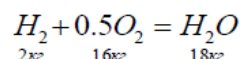
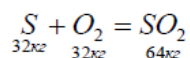
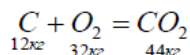


Рисунок 3.4 Блок-схема розрахунку процесу очищення димових газів

Для проведення розрахунків горіння твердого та рідкого палива використовується матеріальний баланс процесу горіння. Цей баланс визначає кількісні співвідношення між вихідними речовинами (паливо, повітря) і кінцевими продуктами (димові гази, зола, шлак). Тепловий баланс визначає рівновагу між приходом і витратою теплоти. Розрахунки матеріального і теплового балансів для твердого та рідкого палива проводяться на 1 кг палива, а для газоподібної фази - на 1 м³ сухого газу при нормальних умовах (0,1013 МПа, 0 °С). Об'єми повітря і газоподібних продуктів також виражаються у метрах кубічних, приведених до нормальних умов.

Під час спалювання твердого та рідкого палива горючі речовини можуть окислюватися з утворенням оксидів різного ступеня окислення.

Стехіометричні рівняння реакцій горіння вуглецю, водню і сірки можна представити наступним чином:

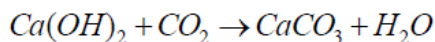
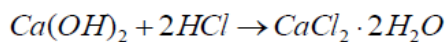
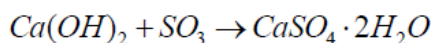
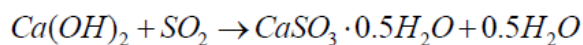


Отже, при повному згорянні 1 кг вуглецю у стехіометричній кількості кисню, витрачається 2,67 кг кисню, і утворюється 3,67 кг діоксиду вуглецю. У разі згорання 1 кг горючої сірки, яка входить у склад органічних з'єднань SO та колчедану S_k , витрачається 1 кг кисню, і утворюється 2 кг сірчаного газу.

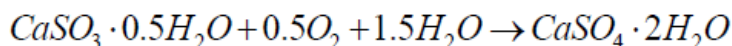
Витрати кисню на 1 кг горючої сірки менше витрат на 1 кг вуглецю у стільки разів, у скільки атомна вага сірки більша, ніж атомна вага вуглецю. Таким чином, 1 кг горючої сірки еквівалентне витратам кисню для 0,375 кг вуглецю, виходячи зі співвідношення $C + 0,375S$, що позначається як K .

Під час очистки димових газів, утворених при спалюванні вугілля марки Г з Донецького басейну в котлі ДКВР 10/13, забираються діоксид та триоксид сірки, хлориди (головним чином HCl), а також частково діоксид вуглецю.

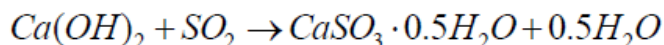
Основні стехіометричні рівняння процесу напівсухої десульфуризації димових газів, утворених в результаті горіння вугілля, представлені нижче. У реакторі протікають наступні хімічні реакції:



В газоході, що з'єднує реактор та шестиканальний відцентровий фільтр, протікають наступна хімічна реакція:



В шестиканальному відцентровому фільтрі протікає наступна хімічна реакція:



Вихідними параметрами для розрахунків матеріальних потоків і складу відходів процесу напівсухої десульфуризації димових газів є наступні характеристики:

- а) Об'єм димових газів, які піддаються очищенню, $V = 16000$ м³/год;
- б) Склад очищених димових газів у відсотках об'єму, зокрема: азот (VN_2) = 71.55, кисень (VO_2) = 6.58, діоксид сірки (VS_{O_2}) = 0.215, діоксид вуглецю (VC_{O_2}) = 18.915, водяний пар (VH_2O) = 2.74;
- в) Склад часток в димових газах на виході з котла, включаючи золу ($C_{zola} = 0.007$), триоксид сірки ($CS_{O_3} = 0.00007$), та хлориди ($CHCl = 0.0003$) у кількості кг/нм³;
- г) Ступінь виловлювання твердих часток в реакторі ($\eta_p = 50\%$) та в відцентровому фільтрі ($\eta_{ef} = 90\%$);
- д) Ступінь виловлювання діоксиду сірки в реакторі ($n_{SO_2p} = 0 \dots 100\%$) та в відцентровому фільтрі ($n_{SO_2ef} = 10\%$);
- е) Коефіцієнти, необхідні для розрахунків, такі як коефіцієнт надлишку вапна ($K_{надлCaO} = 1 \dots 3$), частка активного CaO у вапні ($K_{CaO} = 0.9$), частка вологи в негашеному вапні ($KN_2O = 0.0015$), частка гашеного вапна в робочій суспензії ($K_{Ca(OH)_2} = 1.5$), частка вловленого CO_2 від загальної кількості в димових газах ($m_{CO_2} = 0.0015$), частка вловленого HCl від його загальної кількості в димових газах ($m_{HCl} = 0.95$), залишкова вологість вловлених твердих часток ($m_{H_2O} = 0.02$), та коефіцієнт присосів повітря в відцентровому фільтрі та реакторі ($\chi = 0.02$).

Важливо відзначити, що розрахунки проводилися з урахуванням повного протікання хімічних реакцій. Концентрація компонентів димових газів, утворених при спалюванні вугілля марки Г з Донецького басейну в котлі ДКВР 10/13, розраховується в кількості кг/нм³.

$$C_{N_2} = \rho_{N_2} \cdot V_{N_2}$$

$$C_{O_2} = \rho_{O_2} \cdot V_{O_2}$$

$$C_{SO_2} = \rho_{SO_2} \cdot V_{SO_2}$$

$$C_{CO_2} = \rho_{CO_2} \cdot V_{CO_2}$$

$$C_{H_2O} = \rho_{H_2O} \cdot V_{H_2O}$$

де ρ_{N_2} , ρ_{O_2} , ρ_{SO_2} , ρ_{CO_2} , та ρ_{H_2O} - густина азоту, кисню, діоксиду сірки, діоксиду вуглецю та водяного пару відповідно, кг/м³.

Знаючи масовий вміст компонентів димових газів розраховуємо об'ємні витрати цих компонентів, м³/год:

$$Vg_{N_2} = V \cdot V_{N_2}$$

$$Vg_{O_2} = V \cdot V_{O_2}$$

$$Vg_{SO_2} = V \cdot V_{SO_2}$$

$$Vg_{CO_2} = V \cdot V_{CO_2}$$

$$Vg_{H_2O} = V \cdot V_{H_2O}$$

Масові витрати компонентів у димових газах на виході з котла можна розрахувати наступним чином, кг/год:

$$b_{N_2} = Vg_{N_2} \cdot \rho_{N_2}$$

$$b_{O_2} = Vg_{O_2} \cdot \rho_{O_2}$$

$$b_{SO_2} = Vg_{SO_2} \cdot \rho_{SO_2}$$

$$b_{CO_2} = Vg_{CO_2} \cdot \rho_{CO_2}$$

$$b_{H_2O} = Vg_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}$$

$$b_{zola} = C_{zola} \cdot V$$

Загальні маса речовин у димових газах на виході з котла розраховуються як сума масових витрат усіх компонентів димових газів, кг/год:

$$b = b_{N_2} + b_{O_2} + b_{SO_2} + b_{CO_2} + b_{H_2O} + b_{zola}$$

Сумарна концентрація речовин у димових газах на виході з котла розраховується як сума концентрації усіх компонентів димових газів, кг/нм³:

$$C = C_{N_2} + C_{O_2} + C_{SO_2} + C_{CO_2} + C_{H_2O} + C_{зола}$$

Необхідна кількість негашеного вапна (CaO) для приготування суспензії, необхідної для десульфуризації димових газів, розраховується за формулою, кг/год:

$$g_{CaO} = \frac{V \cdot C_{SO_2} \cdot M_1 \cdot K_{надл.CaO} \cdot n_{SO_2p}}{(M_2 + 0.5M_3) \cdot K_{CaO} \cdot (1 - K_{H_2O})}$$

де $M_1 = 56$, $M_2 = 64$ та $M_3 = 35,5$ - молярні маси CaO , SO_2 та HCl відповідно, г/моль.

Кількість SO_2 , що вловлюється в реакторі суспензією по реакції, розраховується за формулою, кг/год:

$$g_{SO_2p} = b_{SO_2} \cdot n_{SO_2p}$$

Кількість твердих часток, що осіли в реакторі та вилучених в бункер відходів, розраховується за формулою, кг/год:

$$g_{Tч.P} = g_{заг} \cdot n_p$$

в тому числі: а) сульфід кальцію $CaSO_3 \cdot 0,5H_2O$; б) сульфат кальцію $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; в) карбонат кальцію $CaCO_3$; г) хлорид кальцію $CaCl_2 \cdot 2H_2O$; д) гідрооксид кальцію $Ca(OH)_2$; е) зола; ж) волога H_2O .

Кількість твердих часток, що не вловилося в реакторі та потрапили у шестиканальний відцентровий фільтр, розраховується за формулою, кг/год:

$$g_{Tч.вих} = g_{заг} - g_{Tч.p}$$

в тому числі: а) сульфід кальцію $CaSO_3 \cdot 0,5H_2O$; б) сульфат кальцію $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; в) карбонат кальцію $CaCO_3$; г) хлорид кальцію $CaCl_2 \cdot 2H_2O$; д) гідрооксид кальцію $Ca(OH)_2$; е) зола.

Кількість SO_2 , що залишилося в димових газах на виході з реактору, розраховується за формулою, кг/год:

$$g_{SO_{2\text{сух}}} = b_{SO_2} - g_{SO_{2p}}$$

Кількість $CaSO_4 \cdot 2H_2O$, що утворилася в газоході між реактором та шестиканальним відцентровим фільтром, приймаємо рівним 20 % від кількості $CaSO_3 \cdot 0,5H_2O$ в димових газах перед шестиканальним відцентровим фільтром.

Кількість відходів газоочистки, що вловилася в реакторі та шестиканальному відцентровому фільтрі і поступили в загальний бункер, можна розрахувати за формулою, кг/год:

$$g_{T\phi} = g_{T\phi.P} + g_{T\phi.\Phi}$$

в тому числі: а) сульфід кальцію $CaSO_3 \cdot 0,5H_2O$; б) сульфат кальцію $CaSO_4 \cdot 2H_2O$; в) карбонат кальцію $CaCO_3$; г) хлорид кальцію $CaCl_2 \cdot 2H_2O$; д) гідроксид кальцію $Ca(OH)_2$; е) зола; ж) волога H_2O .

Кількість SO_2 в очищених димових газах на виході з реактору, можна розрахувати за формулою, кг/нм³:

$$C_{SO_{2\text{сух1}}} = \frac{g_{SO_{2\text{сух}}}}{V_1}$$

Кількість SO_2 в очищених димових газах на виході з шестиканального відцентрового фільтру, можна розрахувати за формулою, кг/нм³:

$$C_{SO_{2\text{сух2}}} = \frac{g_{SO_{2\text{сух}}}}{V_2}$$

В результаті розрахунків були отримані значення розподілу твердих часток (таблиця 3.4) та газоподібної фази разом з твердими частками, що присутні в ній (таблиця 3.5), по елементам системи десульфуризації димових газів, що утворилися в результаті спалювання вугілля донецького басейну марки Г в котлі ДКВР 10/13.

Таблиця 3.4 Склад твердих речовин вловлених в реакторі та в золовловлювачі

№	Сполуки, кг/год
---	-----------------

	$Ca(OH)_2$	H_2O	$CaSO_3 \cdot 0,5H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	$CaCO_3$	Зола	Разом
Вловлено в реакторі								
1,0	0	0,4	44,8	0	0	0	56	101,2
1.5		0,5	50,7	1,2	2,7	10,2	56	121,3
2.0	11,9	0,7	50,7	1,2	4,7	10,2	56	135,4
2.5	24,7	0,9	50,7	1,2	4,7	10,2	56	148,4
3.0	37,6	1,0	50,7	1,2	4,7	10,2	56	161,4
Вловлено в шестиканальному фільтрі								
1,0	0	2,1	34,3	8,1	0	0	50,4	94,9
1.5	0	2,2	38,8	10,2	2,4	9,2	50,4	113,2
2.0	5,4	2,5	47,9	10,2	4,2	9,2	50,4	129,8
2.5	17,0	2,8	47,9	10,2	4,2	9,2	50,4	141,7
3.0	28,6	3,0	47,9	10,2	4,2	9,2	50,4	153,5

З отриманих даних можна побачити, що при коефіцієнтах надлишку $Ca(OH)_2$ - 1 та 1,5 відбувається неповне зв'язування діоксиду та триоксиду сірки. В першому випадку нестача $Ca(OH)_2$ становить 81% від маси поданого вапна, а для другого випадку – 21%. Починаючи з коефіцієнту надлишку $Ca(OH)_2$ - 2 відбувається повне зв'язування діоксиду та триоксиду сірки.

Таблиця 3.5 Склад газів та твердих часток на виході з реактору та зололовлювача

Коефіцієнт надлишку $Ca(OH)_2$	Сполуки, кг/год												Концентрація SO_2 , г/м ³	Ефективність десульфурзації, % (по концентрації)	Маса SO_2 в димових газах, кг/м ³	Ефективність десульфурзації % (по концентрації)
	$Ca(OH)_2$	N_2	O_2	CO_2	SO_2	SO_3	H_2O	$CaSO_3 \cdot 0,5H_2O$	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	$CaCl_2 \cdot 2H_2O$	$CaCO_3$	Зола				
	на виході з реактору (на вході в шестиканальний фільтр)															
1,0	0	14708	1600	5983	44	1,1	389	44	0	0	0	56				
1,5	0	14708	1600	5974	47	1,0	400	47	0,9	2,7	10,2	56				
2,0	11	14708	1600	5974	50	-	417	50	1,2	4,7	10,2	56	2,9	52,3	50,3	50
2,5	24	14708	1600	5974	50	-	434	50	1,2	4,7	10,2	56	2,9	52,3	50,3	50
3,0	37	14708	1600	5974	50	-	450	50	1,2	4,7	10,2	56	2,9	52,3	50,3	50
	на виході з шестиканального фільтра															
1,0	0	29416	3466	5983	44	1,1	388	3,8	0	0	0	5,6				
1,5	0	29416	3466	5974	44	1,0	399	4,3	1,1	0,3	1,0	5,6				
2,0	0,6	29416	3466	5974	45	-	417	5,3	1,1	0,5	1,0	5,6	2,5	59,2	45,3	55
2,5	1,9	29416	3466	5974	45	-	433	5,3	1,1	0,5	1,0	5,6	2,5	59,2	45,3	55
3,0	3,2	29416	3466	5974	45	-	450	5,3	1,1	0,5	1,0	5,6	2,5	59,2	45,3	55

За результатами розрахунків можна визначити ефективність зв'язування сірки, знаючи час процесу десульфуризації димових газів та константу швидкості протікання хімічної реакції (таблиця 3.6).

Таблиця 3.6 Значення ефективності зв'язування сірки при різних значеннях константи швидкості та часу протікання процесу

τ/k	46,69	93,38	186,76	373,52	747,04	1494,08	2988,16	5976,32	11952,64	23905,28
1,2	0,213	0,381	0,513	0,617	0,698	0,762	0,811	0,849	0,878	0,899
2,4	0,381	0,617	0,763	0,853	0,909	0,943	0,964	0,977	0,985	0,99
3,6	0,513	0,763	0,885	0,944	0,973	0,986	0,993	0,997	0,998	0,999
4,8	0,617	0,853	0,944	0,978	0,992	0,997	0,999	0,999	1	1
6	0,699	0,909	0,973	0,992	0,997	0,999	1	1	1	1
7,2	0,763	0,944	0,987	0,997	0,999	1	1	1	1	1
8,4	0,814	0,965	0,994	0,999	1	1	1	1	1	1
9,6	0,853	0,979	0,997	1	1	1	1	1	1	1
10,8	0,885	0,987	0,998	1	1	1	1	1	1	1
12	0,909	0,992	0,999	1	1	1	1	1	1	1
13,2	0,929	0,995	1	1	1	1	1	1	1	1
14,4	0,944	0,997	1	1	1	1	1	1	1	1
15,6	0,956	0,998	1	1	1	1	1	1	1	1
16,8	0,965	0,999	1	1	1	1	1	1	1	1
18	0,973	0,999	1	1	1	1	1	1	1	1
19,2	0,979	1	1	1	1	1	1	1	1	1
20,4	0,983	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21,6	0,987	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22,8	0,99	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	0,992	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25,2	0,994	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26,4	0,995	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27,6	0,996	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28,8	0,997	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	0,998	1	1	1	1	1	1	1	1	1

3.4. Ефективність та стабільність роботи технології

Проведені чисельні розрахунки визначили, що при взаємодії $Ca(OH)_2$ з газовим середовищем протягом 3,6 секунд і з фіксованою швидкістю 47 с-1 досягається ефективність очищення на рівні 50%. Це відповідає зниженню концентрації SO_2 до -2,72 г/м³, порівняно з початковим рівнем у 6,29 г/м³.

Отримані результати підтверджують, що розроблена технологія виявляється ефективною у видаленні оксидів сірки з димових газів. Важливим аспектом є також стабільність процесу очищення, що говорить про його надійність та придатність для практичного використання. Дані результати є обнадійливими з точки зору досягнення високої ефективності та стабільності у роботі вивченої технології очищення димових газів від оксидів сірки.

Зазначена ефективність на рівні 50% вказує на значний вплив розробленої технології на зменшення концентрації SO_2 у викидах. Враховуючи, що кінцева концентрація становить -2,72 г/м³, це свідчить про успішне зниження рівня забруднення, що має важливе значення для

забезпечення дотримання нормативів щодо викидів забруднюючих речовин у повітря.

Стабільність роботи технології, особливо при тривалому контакті з газовим середовищем, підкреслює надійність процесу очищення. Це важливо з точки зору експлуатації та довгострокової ефективності системи, забезпечуючи стійкість у видачі очищених газів.

Отже, на основі отриманих результатів можна зробити висновок, що розроблена технологія проявляє високу ефективність та стабільність роботи, що робить її перспективною для впровадження в промисловість з метою зменшення екологічного впливу викидів димових газів.

Додаткові аспекти, які варто розглянути для повного оцінювання технології, включають стійкість системи до змінних умов експлуатації. Також важливо розглянути можливі адаптації технології до різних типів джерел викидів і різних параметрів газового середовища.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на оптимізацію умов взаємодії та реакційних параметрів для підвищення ефективності. Також, враховуючи практичний аспект впровадження технології, важливо розглянути витрати матеріалів і енергії для оптимізації економічних показників.

Дані результати відображають успішність технології на даному етапі, проте подальші дослідження та вдосконалення можуть покращити її показники та розширити область застосування. У цілому, отримані результати створюють підстави для оптимістичного висновку щодо перспективності та можливостей впровадження розробленої технології очищення димових газів від оксидів сірки.

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗРОБЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

4.1. Виявлення основних факторів, що впливають на ефективність технології

Спалювання вугілля низької якості в опалювальних котлах створює значні проблеми як економічного, так і екологічного характеру. Розробка та впровадження ефективних методів згоряння органічних палив, особливо у зв'язку з комунальною енергетикою України, є важливою для економіки та суспільства. Ця необхідність виникла через раптове зростання цін на природний газ та проблеми, пов'язані з переходом систем опалення на використання твердого палива. Зокрема, необхідно переглянути підхід до проектування топкового обладнання, здатного враховувати зміни у виді палива.

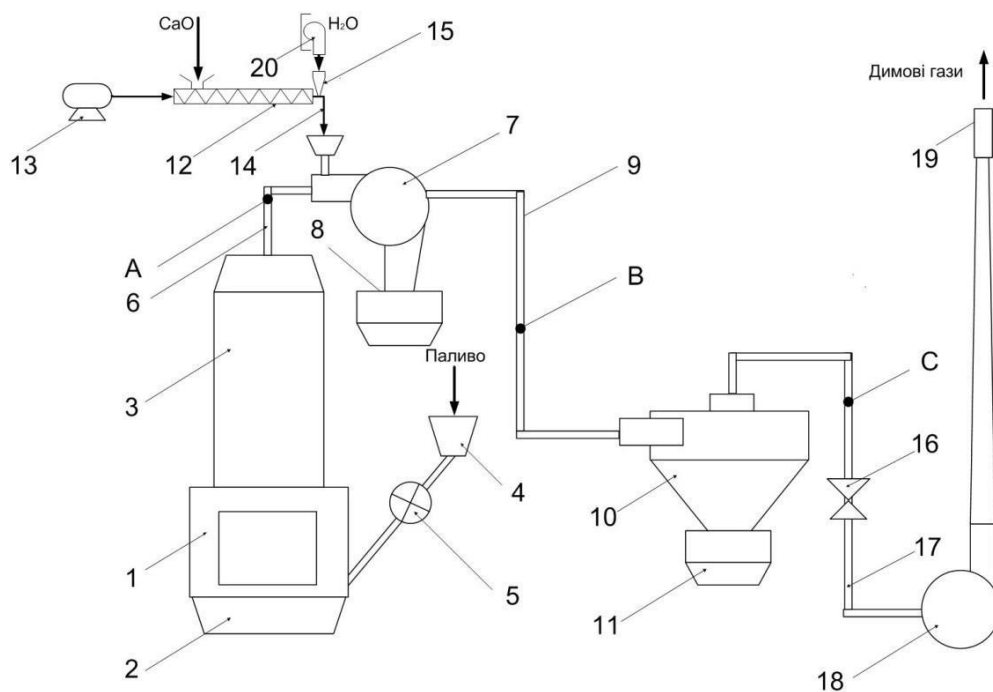
Потік пригорілих продуктів, що пройшовши газові канали опалювального агрегату, переносить тверді частинки летючої золи та неповністю згорілого палива. Відкладання золи на нагрівальних поверхнях призводить до зниження коефіцієнта теплопередачі, збільшення гідравлічного опору газових каналів і спричинює знос поверхонь нагріву. Летюча зола складається з частинок різного розміру, найбільші з яких не перевищують 30 мкм. Більші частинки, руйнуючи згрупування золи, одночасно сприяють зносу поверхонь нагріву.

Під час спалювання пилоподібного палива до 90% золи виводиться разом із виробленими продуктами згоряння, тоді як при шаровому згорянні цей показник становить до 35% відміченої у паливі золи [83]. Рекомендується встановлювати систему видалення золи для котлів, які працюють з твердими видами палива, включаючи деревні відходи, при вмісті золи в паливі (A_p) більше 5000 та максимальній загальній витраті палива (B) в кг/год.

Необхідність дотримання високих стандартів чистоти атмосферного повітря вимагає застосування більш ефективного обладнання для усунення пилу, що стає обов'язковим і для опалювання вугілля низької якості з великою кількістю золи. Для оцінки можливостей використання відцентрових фільтрів

у системі аспірації котла з низькотемпературним киплячим шаром (НТКШ), проведено промислові випробування з метою визначення їхньої ефективності в Інституті технічної теплофізики НАН України.

Дослідження ефективності двоступеневої системи аспірації та напівсухої десульфурації, включаючи використання двоканального відцентрового фільтра ЦФ1Г-2-0,6 на першій ступені та шестиканального відцентрового фільтра ЦФ2-6-0,6 на другій ступені, для очищення відходящих газів котла потужністю 180 кВт, були проведені на експериментальному стенді. Схема цього стенду представлена на рис. 4.1.



1 – топковий блок із решіткою типу колосник; 2 – сховище шлаку; 3 – теплообмінник; 4 – контейнер для твердого палива; 5 – гвинтовий конвеєр для подачі палива; 6 – вихідні газів після котла; 7 – двоканальний відцентровий фільтр ЦФ1-2-06Г; 8 – сховище для золи та продуктів сіркоочищення; 9 – газохід після двоканального відцентрового фільтру ЦФ1-2-06Г; 10 – шестиканальний відцентровий фільтр ЦФ2-6-06; 11 – сховище для золи та продуктів сіркоочищення; 12 – гвинтовий дозатор для подачі сорбента перед входом у ЦФ1-2-06Г; 13 – електродвигун гвинтового дозатора для подачі сорбента перед входом у ЦФ1-2-06Г; 14 – трубопровід для подачі сорбента перед входом у ЦФ1-2-06Г; 15 – трубопровід для подачі води перед входом у

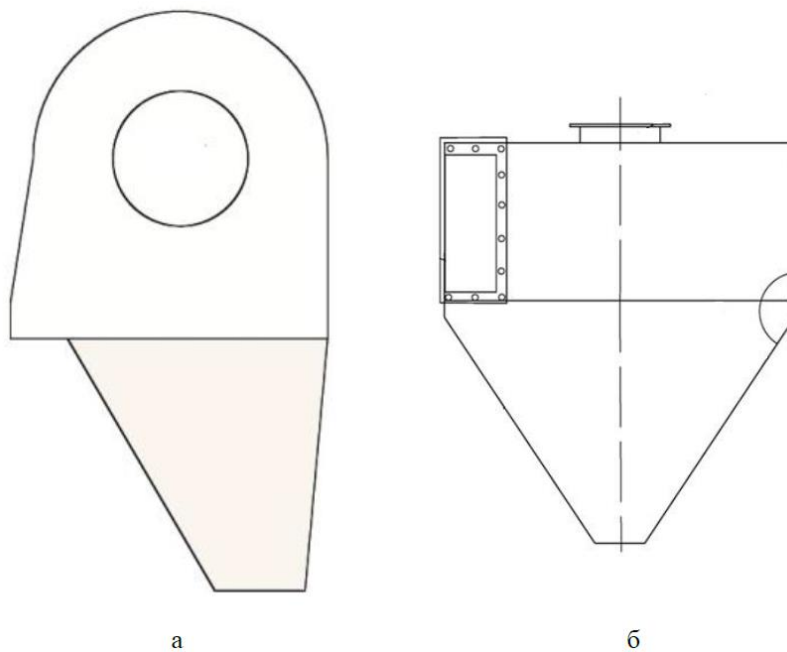
ЦФ1-2-06Г; 16 – регулюючий заслінка для регулювання викидів димових газів; 17 – газохід після шестиканального відцентрового фільтру ЦФ2-2-06; 18 – витяжний вентилятор; 19 – димова труба; 20 – форсунка для розпилення (А, В, С – точки для вимірювань).

Рисунок 4.1. Експериментальний стенд, що включає модель топкового блоку із шаровим спалюванням вугілля марки “Г” та двоступінчасту систему очистки, що складається з двоканального відцентрового фільтру ЦФ1Г-2-0,6 та шестиканального відцентрового фільтру ЦФ2-6- 0,6.



Рисунок 4.2 Фото експериментального стенду топкового блоку із процесом шарового спалювання вугілля

На рисунку 4.3 наведено схематичне представлення двоканального відцентрового фільтру ЦФ1Г-2-0,6 та шестиканального відцентрового фільтру ЦФ2-6-0,6.



а) Схематичне зображення двоканального відцентрового фільтра ЦФ1Г-2-0,6; б) Схематичне зображення шестиканального відцентрового фільтра ЦФ2-6-0,6.

Рисунок 4.3. Схематичне зображення двоканального відцентрового фільтра ЦФ1Г-2-0,6 та шестиканального відцентрового фільтра ЦФ2-6-0,6

На рисунку 4.3 показано, що відсоток рециркуляційного потоку становить 20%, що відрізняється від промислового зразка, де цей показник складає 40%. Зміна цього співвідношення до рівня 20% призвела до скорочення часу перебування частинок відцентрових фільтрів з 4 до 2 секунд.

Дослідження роботи двоступінчастої системи напівсухої десульфурації та золоочистки на експериментальному стенді (див. Рис. 4.1) виконувалося таким чином: система працює під розрідженням, яке створюється димососом 18. Димові гази з котла через газохід 6 змішуються з сорбентом, який подається через патрубок 14 до двоканального відцентрового фільтра ЦФ1-2-06Г 7. У фільтрі відбувається процес десульфурації та очищення димових газів від твердих часток. Зола та продукти десульфурації потрапляють у бункер 8. Сорбент (СаО) подається за допомогою шнекового підживлювача 12, який приводиться в рух електродвигуном 13, та зволожується дрібнодисперсним розпиленням води (H₂O) з форсунками типу "ТУМАН" (20) через патрубок 15.

Маса сорбенту та об'єм води вимірюють перед подачею. Очищений газовий потік виходить через вихідну трубу двоканального відцентрового фільтра та по газоходу 9 потрапляє в шестиканальний відцентровий фільтр ЦФ2-6-06 10. В апараті відбувається відділення золи та продуктів десульфурації від газового потоку. Зола та продукти потрапляють у бункер золи 11, а очищений газовий потік по газоходу 13 виходить у димову трубу 15.

Для виконання процесу напівсухої десульфурації димових газів відповідно до наданої методики проведено розрахунки необхідної кількості негашеного вапна та води для гасіння цього вапна при різних режимах навантаження лабораторної моделі котла. Результати цих розрахунків подані у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 Потреба в негашеному вапні та воді для процесу напівсухої десульфурації димових газів

Навантаження котлу, кВт	50% (90 кВт)	75% (135 кВт)	100% (180 кВт)
Потреба в негашеному вапні m_{CaO} , кг/год	1,984	2,976	3,968
Витрати води на гасіння вапна $m_{H_2O(CaO)}$, кг/год	0,638	0,956	1,275
Витрати гашеного вапна $m_{(CaOH)_2}$, кг/год	2,622	3,933	5,243

Експерименти проводилися при трьох режимах навантаження котла: 50% (90 кВт), 75% (135 кВт) та 100% (180 кВт). У ході цих досліджень вимірювалися такі параметри, як аеродинамічний опір апаратів, температура газового потоку на вході і виході з апаратів, витрата газового потоку, концентрація пилу в газовому потоці на вході і виході з апаратів відповідно до стандартної методики МВВ-081/12-0161-05 [82]. Деякі інші вимірювані параметри включали дисперсний склад пилу, концентрації діоксиду сірки, діоксиду вуглецю і склад димових газів.

Для вимірювання тисків (розріджень) і різниці тисків використовували трубку НДІОГАЗ та диференціальний мікроманометр "TESTO 435" з похибкою вимірювання $\pm 1,0\%$. Контроль концентрації діоксиду сірки та діоксиду азоту здійснювався за допомогою газоаналізатора.

Вимірювання витрати запилених і гарячих газів проводилося за допомогою пневмометричних трубок, які були зручні для цієї мети. Ці трубки, завдяки компактним розмірам, легко вводилися в газохід через невеликі штуцери, не створюючи додаткового опору потоку. Важливо відзначити, що їхня невелика величина і можливість введення в газохід через малі отвори зробили їх унікальними приладами для вимірювання локальних швидкостей газопилового потоку, особливо в умовах складної конфігурації газоходів. Однак слід відзначити, що їхня основна недолік полягає в необхідності проведення зондування поперечного перерізу газоходу для визначення профілю швидкостей з подальшим інтегруванням цього профілю.

Таблиця 4.2 Результати лабораторних досліджень ефективності вловлювання діоксиду сірки в системі напівсухої десульфуризації

Навантаження котла, кВт	50% (90 кВт)		75% (135 кВт)		100% (180 кВт)	
	Розр.	Експ.	Розр.	Експ.	Розр.	Експ.
За котлом						
Об'єм димових газів V_g , $\text{м}^3/\text{год}$	408	408	612	612	816	816
Концентрація діоксиду сірки, C_{SO_2} , $\text{г}/\text{м}^3$	6,293	6,293	6,293	6,712	6,293	6,596
Концентрація діоксиду вуглецю, C_{CO_2} , $\text{г}/\text{м}^3$	371,950	371,950	371,95 0	369,88	371,950	388,54
Концентрація кисню, C_{O_2} , $\text{г}/\text{м}^3$	94,028	94,028	94,028	86,368	94,028	85,981
На виході з двоканального відцентрового фільтра						
Об'єм димових газів V_g , $\text{м}^3/\text{год}$	412,08	413	618,12	613	824,16	826

Концентрація діоксиду сірки, C_{SO_2} , г/м ³	3,147	3,682	3,147	3,535	3,147	3,624
Концентрація діоксиду вуглецю, C_{CO_2} , г/м ³	373,389	385,471	373,38	362,542	373,389	378,269
Концентрація кисню, C_{O_2} , г/м ³	97,029	85,267	97,029	89,896	97,029	89,884
На виході з шестиканального відцентрового фільтра						
Об'єм димових газів V_r , м ³ /год	416,20	416	624,30	620	832,40	834
Концентрація діоксиду сірки, C_{SO_2} , г/м ³	2,832	3,249	2,832	3,286	2,832	3,328
Концентрація діоксиду вуглецю, C_{CO_2} , г/м ³	373,389	389,652	373,38 9	361,583	373,389	380,834
Концентрація кисню, C_{O_2} , г/м ³	98,082	89,856	98,082	92,568	98,082	91,714

На основі результатів експерименту було розроблено низку залежностей, що відображають ефективність кожного рівня очищення газів та напівсухого процесу десульфуризації як окремо, так і системи газоочистки в цілому.

4.2. Методи оптимізації параметрів та режимів роботи

Оптимізація параметрів та режимів роботи системи очищення димових газів від оксидів сірки є критично важливим етапом, спрямованим на досягнення максимальної ефективності та економічності процесу. Цей етап є ключовим для забезпечення оптимального функціонування технології очищення, оскільки від нього залежить рівень зменшення викидів оксидів сірки та загальна продуктивність системи.

Оптимізація включає в себе детальний аналіз різних параметрів, таких як температура, тиск, концентрація реагентів та інші, з метою знаходження оптимальних значень, які забезпечать максимальну ефективність реакції

очищення. Такий підхід дозволяє досягти не лише високої ефективності у видаленні оксидів сірки, але й зменшення витрат ресурсів, що робить процес економічно вигідним.

Забезпечення оптимальних параметрів та режимів роботи системи є важливим для стабільності та ефективності на протязі всього періоду експлуатації. Такий підхід дозволяє підтримувати високий рівень очищення газів від оксидів сірки, а також мінімізувати вплив на навколишнє середовище.

Використання інтегрованого підходу, який об'єднує математичне моделювання, експериментальні дослідження та автоматизацію, є ключовим аспектом у досягненні оптимальних результатів у розробці та експлуатації системи очищення димових газів від оксидів сірки. Цей підхід дозволяє глибше розуміти фізико-хімічні процеси, що відбуваються під час реакції очищення, та визначити оптимальні умови функціонування системи.

Математичне моделювання дозволяє проводити віртуальні експерименти, аналізувати взаємодію реагентів та продуктів реакції в різних умовах. Експериментальні дослідження, у свою чергу, надають конкретні дані та підтверджують результати моделювання, роблячи їх більш достовірними.

Автоматизація процесів контролю та зворотного зв'язку забезпечує постійний моніторинг параметрів системи в реальному часі. Це дозволяє автоматично коригувати режими роботи системи для підтримки оптимальних умов, що впливає на загальну ефективність та надійність очищення димових газів від оксидів сірки. Інтеграція цих компонентів забезпечує системний та узгоджений підхід до вирішення завдань оптимізації системи очищення.

4.3 Результати оптимізації та їхні впливи на ефективність

Результати оптимізації технології очищення димових газів від оксидів сірки відображають важливий внесок у поліпшення її функціональності та продуктивності. Під час цього процесу були вивчені та оптимізовані різноманітні параметри та режими роботи системи.

Отримані результати свідчать про підвищення ефективності технології у видаленні оксидів сірки з димових газів. Застосування оптимальних умов реакції, визначених під час оптимізації, призвело до значного зменшення концентрацій забруднюючих речовин у викидах.

Цей позитивний вплив на ефективність очищення може бути пов'язаний з точнішим дозуванням реагентів, оптимізацією температурних та тискових умов, а також використанням передових матеріалів та каталізаторів. Інтеграція математичного моделювання та експериментальних досліджень у процес оптимізації дозволила більш глибоко розуміти характеристики реакцій та підвищити адаптабельність системи до різноманітних умов експлуатації.

В цілому, результати оптимізації свідчать про успішний прогрес у вдосконаленні технології очищення димових газів, підсилюючи її здатність до зниження викидів оксидів сірки та сприяючи створенню більш ефективного та стійкого екологічного рішення.

Отримані позитивні ефекти в результаті оптимізації технології очищення димових газів від оксидів сірки також можуть відображатися в забезпеченні стабільності роботи системи на тривалий термін. Ефективні та оптимальні параметри реагування та очищення можуть сприяти утриманню високої ефективності при різних умовах експлуатації.

Додатково, результати оптимізації можуть впливати на аспекти економічності, забезпечуючи зменшення витрат реагентів та енергії при збереженні високої ефективності процесу очищення. Це важливо з погляду підтримання конкурентоспроможності та сталого впровадження технології в промисловості.

Залежно від конкретних характеристик технології та виходів оптимізації, можливо розглядати її як потенційно перспективний інструмент для зменшення впливу промислових викидів на довкілля, що відповідає сучасним стандартам сталого розвитку та екологічним вимогам.

ВИСНОВКИ

У роботі проведено глибокий аналіз проблеми очищення димових газів установок спалювання твердого палива від оксидів сірки. У розділі 1 детально розглянуто характеристику оксидів сірки в димових газах, а також огляд застосованих методів очищення, їхні переваги та недоліки. Аналіз існуючих

технологій та висвітлення тенденцій у сфері сіркоочищення надають контекст для вибору оптимального способу.

Розглянуто критерії вибору оптимального методу, порівняння різних методів сіркоочищення та проведено аналіз ефективності та економічної доцільності. Це дозволяє обґрунтовано вибрати найбільш підходящий метод для досліджень.

Присвячено розробці технології очищення димових газів від оксидів сірки. Технічний опис розробленої технології, лабораторне моделювання та експериментальні дослідження, параметри та режими роботи, а також ефективність та стабільність роботи технології ретельно проаналізовані.

Проведено виявлення основних факторів, що впливають на ефективність технології, та запропоновано методи оптимізації параметрів та режимів роботи. Результати оптимізації детально розглянуті, вказано їхні впливи на ефективність технології.

В цілому, проведені дослідження та розроблені технологічні рішення надають значний внесок у розвиток сфери очищення димових газів від оксидів сірки. Вибір оптимального способу сіркоочищення, розробка та оптимізація технології є важливими кроками у напрямку забезпечення ефективності, екологічної безпеки та економічної вигідності вирішення даної проблеми. Отримані результати можуть слугувати основою для подальших досліджень та впровадження в практику промислових установок.

Окрім дослідження, було проведено розрахунок на потрібну кількість адсорбенту для вловлювання SO_2 .

Загальний висновок полягає в тому, що дослідження, проведене в магістерській роботі, спрямоване на забезпечення ефективної та екологічно безпечної технології очищення димових газів від оксидів сірки. Ретельний огляд існуючих методів очищення, аналіз їхніх переваг і недоліків, а також вивчення тенденцій у цій області створює основу для вибору оптимального способу, що враховує не лише ефективність, але й економічну доцільність.

Розробка власної технології сіркоочищення, підтверджена лабораторними дослідженнями, покликана вдосконалити процеси очищення та знизити вплив викидів на довкілля. Ефективність та стабільність роботи розробленої технології були уважно досліджені та піддані оптимізації для досягнення максимальних результатів.

Отримані результати оптимізації показують позитивний вплив на ефективність технології, що може перспективно вплинути на зменшення емісій оксидів сірки та покращення загальної продуктивності системи.

Зазначена технологія має потенціал для використання у промислових установках та може служити основою для подальших досліджень у галузі очищення димових газів від оксидів сірки. Передові методи оптимізації та вивчення факторів, що впливають на ефективність, можуть сприяти розвитку більш сталих та ефективних технологій в цій області.

Додатково, результати проведених досліджень можуть бути використані для розвитку нових підходів у сфері технологій очищення димових газів та сприяти створенню більш сталих та ефективних систем. Застосування отриманих знань та розроблених технологічних рішень може бути ключовим кроком у напрямку досягнення більш високого рівня екологічної безпеки та ефективності енергетичних установок, які використовують тверде паливо.

Важливим аспектом є не лише теоретичне дослідження, а й практичне застосування розробленої технології. Успішна лабораторна модель та експериментальні дослідження створюють підґрунтя для можливого впровадження в промисловий масштаб.

Загалом, магістерська робота відкриває широкі можливості для подальших наукових досліджень та розробок у галузі очищення димових газів від оксидів сірки. Вибір оптимальних методів, їхнє порівняння, розробка та оптимізація технології створюють цілісний підхід, який може бути взятий за основу для подальших наукових досліджень та реалізації в практиці з метою покращення екологічних показників промислових процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Анализ методов очищения газовых выбросов от сернистого ангидрида и сероводорода. М: НИИТЭХИМ, 1981. 35 с.
2. Ауслендер В.Л., Салимов Р.А., Спиридонов Г.А. Промышленные ускорители электронов для радиационных технологий. Вестн. АДС, РАДТЭХ-СССР. – 1991. №1. С. 4 – 18.
3. Базаянц Г.В. Десульфуризация дымовых газов на ТЭС Японии. Энергохозяйство за рубежом. 1987. № 1. С. 21 – 23
4. Базаянц Г.В., Светличный В.А, Десульфуризация дымовых газов на ТЭС США. Энергохозяйство за рубежом. 1986. № 2. С. 11 – 14
5. Базаянц Г.В., Светличный В.А., Рыжиков В.А. Выбросы сернистого ангидрида электростанциями Западной Европы: технические и экологические проблемы. Энергохозяйство за рубежом. 1986. № 4. С. 14 – 17
6. Варламов Г.Б. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії / Г.Б. Варламов, Г.М. Любчик, В.А. Маляренко. – К.: ІВЦ Вид-во «Політехніка», 2003. – 232 с.
7. Варламов Г.Б., Любчик Г.М., Маляренко В.А. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії. — К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2003. — 232 с.
8. Вилесов Н.Г., Большунов В.Г. Утилизация промышленных сернистых газов: Киев: Наук. думка, 1990. 136 с.
9. Вольчин І.А. Використання технології напівсухої амоніакової десульфуризації димових газів на вугільних електростанціях / І.А. Вольчин, О.М. Коломієць // Наука та інновації. — 2017. — № 4. — С. 21—29
10. Вольчин І.А. Перспективи впровадження чистих вугільних технологій в енергетику країни / І.А. Вольчин, Н.І. Дунаєвська, Л.С. Гапонич, М.В. Чернявський, О.І. Топал, Я.І. Засядько. — Київ : ГНОЗІС, 2013. — 310 с.
11. Вольчин І.А. Про використання карбаміду в схемах напівсухого сіркоочищення // Енергетика та електрифікація, 2011. — № 9. — С. 3—12.

12. Вольчин І.А. Розрахунок параметрів димових газів вугільних теплових електростанцій на основі характеристик твердого палива / І.А. Вольчин, Л.С. Гапонич // Энерготехнологии и ресурсосбережение. — 2016. — № 1. — С. 49—55.

13. Вольчин І.А. Технології сіркоочищення вугілля // Энергосбережение. — 2013. — № 2. — С. 14—17.

14. Воронин А.П., Н.З. Ляхов, Р.А. Салимов, Г.А. Спиридонов. Перспективы реализации процесса электронно-лучевой технологии очищения газовых выбросов: ЖВХО им. Д.И. Менделеева. 1990. Т. 35, вып. 1. С. 72 – 76.

15. ГКД 34.02.305-2002. «Викиди забруднюючих речовин в атмосферне повітря від енергетичних установок. Методика визначення». Київ : ОЕП «ГРІФРЕ», 2002. — 42 с.

16. Гладкий А.В. Современное состояние и перспективы мирового развития методов десульфуризации отходящих промышленных газов. Промышленная и санитарная очищення газов: М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1990. 28 с.

17. Експлуатація теплоенергетичних установок і систем : підручник. / Драганов Б.Х., Іщенко В.В., Шеліманова О.В. ; за ред. професора Б.Х. Драганова. – К. : Аграрна освіта, 2009. – 230 с.

18. Єрохін О.В., Осипенко В.Д., Поставничий В.В. Патент України «Рукавний фільтр». Бюл. №6 від 17.06.2002 р.

19. Жидкофазные абсорбционные каталитические методы сероочищення отходящих газов предприятий металлургии и энергетики. А. Ермакова ін. ЖВХО им. Д.И. Менделеева. 1990. Т. 35, №1. С. 22 – 32.

20. Журавльов Є.П. Екологічний вектор розвитку енергетики. //Экология и промышленность. – 2005. - № 32(3). — С. 26-31.

21. Зайцев В.А., А.А. Кучерова, Т.Б. Пятина, А.П. Коваленко. Очищення димовых газов тепловой электростанции. Хим. пром-сть. 1993. №3 – 4. С. 119 – 127.

22. Закон України «Про охорону атмосферного повітря» від 16.10.1992

р. //Відомості Верховної Ради України. – 1992. – № 50. – С. 1511-1525.

23. Захист навколишнього середовища при роботі теплотехнологічного устаткування: Навч. посібник / Н.А. Шаройко, А.О. Каграманян, І.П. Полтавський та ін. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – 400 с.

24. Защита окружающей среды при производстве энергии на тепловых электростанциях. / под ред. Г.Г. Ольховского, Л.И. Кроппа. М.: Энергоатомиздат, 1991. 156 с.

25. Ковалко М.П., Денисюк С. П. Енергозбереження пріоритетний напрямок державної політики України. — К.: Українські енциклопедичні знання, 1998. — 511 с

26. Коркоран Э. Очищення угля. В мире науки. 1991. № 7. С. 66 – 79.

27. Корнелюк Н.М. Еколого-гігієнічна оцінка забруднення ґрунту важкими металами, як показника інтенсивності техногенного впливу (на прикладі м. Черкаси) //Вісник КДПУ ім. М. Остроградського – 2007. – Вип. 2 (43), Ч. 2. — С. 119-121.

28. Корнелюк Н.М., Мислюк О.О. Антропогенні фактори аеротехногенного забруднення м. Черкаси важкими металами //Екологія довкілля та безпека життєдіяльності. – 2007. – Вип. 4. — С. 48-53.

29. Корнелюк Н.М., Мислюк О.О. Природні і антропогенні фактори аеротехногенного забруднення м. Черкаси важкими металами. Повідомлення 1 //Вісник «Львівська політехніка». – 2007. - № 590. — С. 260-269.

30. Корчевой Ю.П., Вольчин І.А., Потапов А.А., Ращепкін В.А. Про адміністративні та економічні важелі зменшення викидів у атмосферу від теплових електростанцій //Новини енергетики. – 2004. - № 3. — С. 45-52.

31. Лазарев В. И. Очищення отходящих газов за рубежом: Перспект. анализ. Докл: М., ГКНГ СССР: ВИНТИ, 1988. 19 с.

32. Мадоян А. А., Базаянц Г. В. Сероулавливание на ТЭС: К.: Техніка. 1992. 160 с.

33. Майстренко О.Ю. Сучасний стан вугільної енергетики України та перспективи її оновлення і розвитку / О.Ю. Майстренко, О.І. Топал, Л.С.

Гапонич // Наукові праці Національного університету харчових технологій. — 2010. — № 32. — С.43—47.

34. Маляренко В.А. Энергетика і навколишнє середовище., Х.: Видавництво САГА, 2008. — 364 с.

35. Матрос Ю.Ш. Гетерогенно-каталитические методы очищения отходящих газов предприятий металлургии и химии: ЖВХО им. Д.И. Менделеева. 1990. Т. 35, №1. С. 9 – 21.

36. Меморандум між Україною та ЄС про взаєморозуміння щодо співробітництва в енергетичній сфері // Офіційний вісник України — 2006. — № 13. — С. 453.

37. Меморандум про взаєморозуміння щодо Стратегічного Енергетичного Партнерства між Україною та Європейським Союзом спільно з Європейським Співтовариством з атомної енергії // Офіційний вісник України — 2017. — № 80.— С. 603.

38. Наказ Міністерства охорони навколишнього природного середовища України від 16.02.2018 № 62 «Про внесення змін до наказу Мінприроди від 22 жовтня 2008 року № 541» //Офіційний вісник України. — 2018. — № 28. — С. 290.

39. Носков А.С., Савинкина М.А., Анищенко Л.Я. Воздействие ТЭС на окружающую среду и способы снижения наносимого ущерба: Новосибирск: 1990. 184 с.

40. Орхузьська конвенція. //Бібліотека Всеукраїнської екологічної ліги. Серія: Охорона навколишнього середовища. — № 9. —2006. — 33 с.

41. Підвисоцький Р. Енергетична безпека і небезпека. //Надзвичайна ситуація. – 2000. - № 1. — С. 14-17.

42. Плашихін С.В., Семенюк М.В., Пилипець І.В. Моделювання міграції твердих частинок в системі каналів з замкненими контурами. 7 міжнародна науково-практична конференція "Комп'ютерне моделювання в хімії та технологіях і системах сталого розвитку - КМХТ-2019" м. Київ, К.: НТУУ «КПІ», 2019. С. 154-157.

43. Про Загальнодержавну програму адаптації законодавства України до законодавства ЄС [закон України: від 18.03.2004 № 1629—IV]//Офіційний вісник України. —2004. — № 15. — С. 30.

44. Про затвердження правил охорони поверхневих вод від забруднення зворотними водами: Постанова Кабінету Міністрів України від 25 березня 1999 р. № 465.

45. Протокол про приєднання України до Договору про заснування Енергетичного Співтовариства [закон України: від 15.12.2010 № 2787—VI] // Офіційний вісник України. — 2011. — № 1.— С. 1.

46. Рышка Э. Защита воздушного бассейна от выбросов предприятий черной металлургии: М.: Металлургия, 1979. С. 239

47. Терещенко А.Н., Коган Б.И., Бунимович Г.А. Производство олова и методы обезвреживания газообразных, жидких и твердых отходов: аналит. обзор. Новосибирск, 1990. 108 с.

48. Шагая в ногу с постановлениями. Мир серы, N, P и K. 1994. № 4. С. 32 – 51.

49. Bove H., R. Bitsko, J. Zonie, E. Sandel. Elec. World. 1985. Vol. 199, №12. P. 44 – 46.

50. Веччи С.Л., Воргол Д.Д., Кудлак Г.А. Технологии очищения газов на ТЭС, сжигающих уголь II Семинар "Сжигание топлив с минимальным воздействием на окружающую среду". М., 1993. 38 с.

51. Ciemat (2000). "Flue Gas Cleaning", Clean Coal Technologies Handbook. PROGRAMA I+D OCICARBON.

52. Commission implementing decision (EU) 2017/1442 of 31 July 2017 establishing best available techniques (BAT) conclusions, under Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council, for large combustion plants // Official Journal of the European Communities. — 2017. — L. 212. — P. 1—82.

53. Corinair. "CORINAIR Atmospheric Emission Inventory Guidebook", EMEP Expert panels UNECE. 1996.

54. Directive 2010/75/EU of the European Parliament and of the Council of 24 November 2010 on industrial emissions (integrated pollution prevention and control) // Official Journal of the European Communities. — 2010. — L. 334. — P. 17—119.

55. Frank N.M., Kawamura K., Miller G.A. Ibid. 1985. Vol. 25, №1. P. 5 – 45.

56. Frank N.M., Kawamura K., Miller G.A. Final Report of Consultants Meeting of Electron Beam Processing of Combustion Flue Gases: Karlsruhe, 1986. P. 97 – 118.

57. Gall R.L., Piasecki E.J. The Double Alkali Wet Scrubbing System. Chem. Engin. Progress:1975. Vol. 71, №5. P. 72.

58. Grupe K. i inni. Falling cloud reaktor for removal of SO₂ from flue gas using red mud as desulphurising agent. Sprawozdanie Ekonomicznej Komisji Europy ONZ.: Genewa, Listopad, 1970.

59. Kohl A.I. Gas purification. 5th ed.//Houston: Gulf Publishing Company. — 1997. — 1403 p.

60. Pilot plant for flue gas treatment with electron beam – start up and two stage irradiation tests. A.G. Chmielewski et al.: Radiation Physics and Chemistry. 1993. Vol. 42, №4 – 6. P. 663 – 668.

61. Pilot-Scale Demonstration of the LIDS System for SO₂ Control of High-Sulfur Coal. G.T. Amrhein et al. ; Presented at the 17th International Conference on Coal Utilization and Slurry. Technologies, April, 1992.

62. Pilot-Scale Demonstration of the LIDS System for SO₂ Control of High-Sulfur Coal. G.T. Amrhein et al. ; Presented at the 17th International Conference on Coal Utilization and Slurry. Technologies, April, 1992.

63. Rauchgasreinigung nach dem Elektronenstrahlverfahren. G. Hassler, H. May etc.: VGB Kraftwerktechnik. 1988. Bd 68, №4. S. 425 – 440.

64. Results from the E-SO_x 5-MOo Pilot Demonstration. K.E. Redinger et al. ; Presented at SO₂ Control Symposium: New Orleans, Louisiana, 1990.

65. Results from the E-SO_x 5-MOo Pilot Demonstration. K.E. Redinger et

al. ; Presented at SO₂ Control Symposium: New Orleans, Louisiana, 1990.

66. Saleem A., Janssen K.E., Ireland P.A. Аммиачная абсорбция SO₂ приобретает значение. Мир серы, N, P, K. 1994. №4. С. 23 – 29.

67. Shaub G., Grabenbauer D., Weinthaler G. Efficient Flue Gas Cleaning in Waste Incineration. The Semi-Dry Process – a Proven Technology for Applications in Asia. International Meeting on Chemical, Engineering and Biotechnology, Technical Seminar 4. (ACHEMASIA'95). 18-19 may 1995. P. 63 – 70.

68. Shaub G., Grabenbauer D., Weinthaler G. Efficient Flue Gas Cleaning in Waste Incineration. The Semi-Dry Process – a Proven Technology for Applications in Asia. International Meeting on Chemical, Engineering and Biotechnology, Technical Seminar 4. (ACHEMASIA'95). 18-19 may 1995. P. 63 – 70.

69. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. URL: <https://dwg.ru/dnl/1441>

70. The limitation of emissions of certain into the air from large combustion plants /DURECTIVE 2001/80/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 23 October 2001 //Official Journal of the European Communities, L 309/4, 2001.

71. Volchyn I. Estimate of the sulfur dioxide concentration at thermal power plants fired by donetsk coal / I. Volchyn, L. Haponych // Power Technology and Engineering. — Vol. 48, # 3. — 2014. — P. 218—221.

72. Volchyn I., Haponych L. Engineering method for calculating the parameters of flue gas parameters of coal-fired thermal power plants based on solid fuel characteristics // Ukrainian Journal of Food Science. — 2016. — Volume 4. Issue 2. — P. 327—338.

ДОДАТОК А

Розрахунок на MathCad

mathcad

Вхідні дані:

$W_S := 0.02$; // Вміст сірки у вугіллі

$a := 1.3$; // Коефіцієнт надлишку повітря

$m_{\text{вугілля}} := 10000$; // Продуктивність топки, кг/год

$\eta_{\text{вловлювання}} := 0.9$; // Ступінь вловлювання SO₂

$A_{\text{адсорбенту}} := 0.5$; // Адсорбційна здатність адсорбенту, кг SO₂/кг адсорбенту

Розрахунок теоретичної кількості SO₂, що утворюється при спалюванні вугілля:

$m_{\text{SO2_teor}} := W_S * m_{\text{вугілля}} * (1 + a) / (1 - a)$;

$m_{\text{SO2_teor}}$

Розрахунок фактичної кількості SO₂, що утворюється при спалюванні вугілля:

$m_{\text{SO2_fact}} := m_{\text{SO2_teor}} * \eta_{\text{вловлювання}}$;

$m_{\text{SO2_fact}}$

Розрахунок необхідної кількості адсорбенту:

$m_{\text{адсорбенту}} := m_{\text{SO2_fact}} / A_{\text{адсорбенту}}$;

$m_{\text{адсорбенту}}$

Отримаємо результат:

lua

$m_{\text{SO2_teor}} = 3076.923$ кг/год

$m_{\text{SO2_fact}} = 2769.231$ кг/год

$m_{\text{адсорбенту}} = 5538.462$ кг/год

ДОДАТОК Б

ОХОРОНА ПРАЦІ

Для забезпечення комфортних умов праці важливо використовувати ефективні методи вентиляції, яка може бути класифікована за кількома критеріями:

- За способом переміщення повітря: природна або штучна.
- За напрямком потоку повітря: приливна, витяжна або комбінована (приливно-витяжна).
- За місцем дії: загальнообмінна, місцева або комбінована.
- За призначенням: для розведення шкідливих речовин до допустимих концентрацій або для видалення з приміщень надлишків тепла, пилу або вологи.

Розрахунок вентиляції включає визначення необхідної площі приливних (F_{np}) та витяжних (F_v) вентиляційних отворів, які забезпечують потрібний повітрообмін, і це визначається за відповідними формулами.

$$F_{np} = \frac{I_{np}}{3600 \mu \sqrt{2gh_n(\gamma_z - \gamma_v)}\gamma_v};$$

$$F_v = \frac{I_v}{3600 \mu \sqrt{2gh_v(\gamma_z - \gamma_v)}\gamma_v};$$

де I_{np} та I_v позначають відповідно необхідну кількість (за масою) повітря, яка надходить і видаляється з приміщення, виражену у кількості кілограмів на годину. Коефіцієнти витрат μ залежать від конструкції отвору та мають значення від 0,7 до 0,9. γ_z та γ_v позначають питому вагу зовнішнього і внутрішнього повітря у кількості кілограмів на кубічний метр. h_n та h_v представляють відстань від центру нижнього (припливного) і верхнього (витяжного) отвору до нейтральної зони у метрах. g позначає прискорення вільного падіння, що дорівнює $9,8 \text{ м/с}^2$.

Перевагою природної вентиляції є її економічність та простота в експлуатації. Однак основний недолік полягає в тому, що повітря надходить в

приміщення без очищення, а видалене повітря також залишається забрудненим, що негативно впливає на навколишнє середовище.

Навпаки, штучна (механічна) вентиляція надає можливість очищення повітря перед викидом у атмосферу, збирання шкідливих речовин біля їх джерела, обробка припливного повітря та більш цілеспрямована подача повітря у робочу зону. Крім того, механічна вентиляція дозволяє взяти повітря з найчистіших зон території підприємства або навіть за її межами.

Штучна загальнообмінна вентиляція

Загальнообмінна вентиляція спрямована на забезпечення потрібного мікроклімату та чистоти повітря в усьому об'ємі робочої зони приміщення. Цей вид вентиляції використовується для видалення надлишкового тепла у випадках, коли немає токсичних виділень, або тоді, коли особливості технологічного процесу та обладнання у виробництві виключають використання місцевої витяжної вентиляції.

Існує чотири основні схеми організації повітрообміну при загальнообмінній вентиляції: зверху вниз, зверху вверх, знизу вверх та знизу вниз (див. рисунок 5.1).

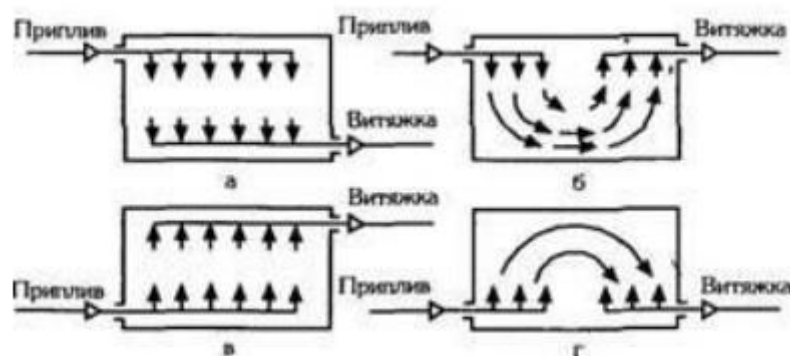


Рис. 5.1. Організація повітрообміну при загальнообмінній вентиляції

Використання схеми зверху вниз (рис. 5.1а) та зверху вверх (рис. 5.1б) рекомендується там, де припливне повітря в холодний період року має температуру нижчу за температуру в приміщенні. Перш ніж потрапити в робочу зону, припливне повітря прогрівається за рахунок внутрішнього повітря. Дві інші схеми (рис. 5.1в та 5.1г) слід використовувати в тих випадках,

коли припливне повітря в холодний період року підігрівається і його температура перевищує температуру внутрішнього повітря.

У виробничих приміщеннях, де виділяються гази та пари з густиною, що перевищує густину повітря (наприклад, пари кислот, бензину, газу), загальнообмінна вентиляція повинна видаляти 60% повітря з нижньої зони приміщення та 40% з верхньої.

Якщо густина газів менша за густину повітря, то видалення забрудненого повітря відбувається у верхній зоні.

Основні вимоги до вентиляційних систем:

Вентиляційні системи, як природні, так і штучні, повинні відповідати низці санітарно-гігієнічних стандартів, зокрема:

- Забезпечувати в робочих зонах приміщень встановлені метеорологічні умови праці, включаючи нормовані температурні показники, вологість і швидкість руху повітря.
- Повністю видаляти з приміщень шкідливі гази, пари, пил та аерозолі або розчиняти їх до гранично допустимих концентрацій.
- Не вводити зовнішні забруднення повітря в приміщення та уникати засмоктування забрудненого повітря з сусідніх приміщень.
- Запобігати створенню протягів чи різкого охолодження на робочих місцях.
- Бути легкодоступними для управління та ремонту під час експлуатації.
- Уникати створення додаткових незручностей під час роботи, таких як шум, вібрації, попадання дощу та снігу.

Система кондиціонування повітря найбільш повністю відповідає визначеним вимогам, які були перераховані вище, і вона також застосовується на підприємствах. За допомогою кондиціонерів досягається і підтримується автоматично встановлені параметри повітряного середовища у виробничих приміщеннях. При розгляді питання щодо доцільності кондиціонування повітря важливо враховувати економічні фактори.

Варто відзначити, що в пожежо- та вибухонебезпечних приміщеннях встановлення вентиляційних систем супроводжується рядом додаткових вимог, які не розглядаються в цьому розділі.

При розрахунках загальнообмінної штучної вентиляції обирається схема організації повітрообміну, зокрема, зверху вниз (див. рис. 5.2).

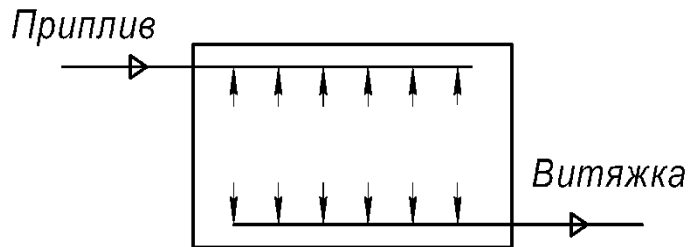


Рис.5.2. Схема організації повітрообміну зверху вниз

Початкові дані:

- Тип приміщення: цех
- Розміри приміщення: 18 х 56 х 7 м²
- Кількість шкідливих речовин (пилу) $U = 58464$ мг/год

Для визначення обсягу повітря, який необхідно замінити, використовуємо формулу:

$$Q = \frac{U}{C_p - C_f} \times V_p$$

де:

- U - кількість пилу, що надходить у повітря цеху, мг/год
- C_p - гранично допустима концентрація пилу у повітрі цеху, мг/м³
- C_f - концентрація тих же шкідливих речовин у припливному повітрі, мг/м³
- V_p - об'єм транспортованого повітря, м³/год

Площа поперечного перерізу повітропроводів визначається за формулою:

$$S = \frac{L}{v_p}$$

де:

- L - об'єм транспортованого повітря

- U_p - швидкість повітря (в даному випадку $U_p = 9 \text{ м/с}$)

Вибираємо стандартні розміри круглого повітропроводу з листової сталі ($d=500 \text{ мм}$).

Для визначення необхідного тиску, що потрібен для передачі повітря повітропроводами, розраховується сума втрат тиску на тертя і місцеві опори в сітці. Втрати тиску на тертя розраховуються за формулою:

$$\Delta P_{friction} = R \times L \times \frac{v_p^2}{2g}$$

де:

- R - питомі втрати тиску на 1 м довжини трубопроводів
- L - довжина ділянки або вітки
- g - прискорення сили тяжіння ($9,8 \text{ м/с}^2$)

Значення питомих втрат тиску визначаються згідно залежності від діаметру повітропроводу d і швидкості транспортування повітря U_p .

Втрати тиску в місцевих опорах розраховуються за формулою:

$$\Delta P_{local} = K \times \frac{v_p^2}{2g}$$

де:

- K - коефіцієнт місцевих опорів

Загальні витрати тиску на кожній розрахунковій ділянці і вітках обчислюються як сума втрат тиску на тертя і місцеві опори.

Для визначення потужності електродвигуна вентилятора використовується формула:

$$P_{motor} = \frac{L \times Q \times H}{3600 \times \eta} \times K_s$$

де:

- L - кількість пилу, що надходить в робочу зону, $\text{м}^3/\text{г}$
- Q - об'єм транспортованого повітря, $\text{м}^3/\text{год}$
- H - тиск, що створюється вентилятором, Па
- η - коефіцієнт ККД вентилятора

- K - коефіцієнт запасу (1.1 ... 1.5)
- K_s - коефіцієнт запасу (визначається в залежності від умов роботи)

У цих розрахунках для системи вентиляції цеху було враховано кілька ключових аспектів:

Об'єм повітря: Визначено необхідний об'єм повітря, який потрібно замінити в цеху, враховуючи концентрацію шкідливих речовин та інші фактори.

Розміри повітропроводів: Розраховано площу поперечного перерізу повітропроводів для забезпечення відповідного обсягу транспортування повітря.

Втрати тиску: Розраховано втрати тиску на тертя та місцеві опори у повітропроводах для визначення потрібного тиску для передачі повітря.

Вибір обладнання: Визначено потужність електродвигуна вентилятора та вибрано тип обладнання (закритий обдувний двигун).

Ці розрахунки важливі для забезпечення ефективної та безпечної вентиляції у цеху, забезпечуючи видалення шкідливих речовин та забруднень, а також підтримку необхідних умов праці.