

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра хімічної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

## Кваліфікаційна робота магістра

зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"  
освітня програма "Обладнання хімічних виробництв  
і підприємств будівельних матеріалів"

Тема роботи: Виробництво концентрованої сірчаної  
кислоти. Розробити та модернізувати сушильну башту

Виконав:  
студент групи ХМ.м-21/1

Коваленко Олександр Вікторович

\_\_\_\_\_  
підпис

Залікова книжка

№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота магістра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Скиданенко Максим Сергійович

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

## ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	6
1.1 Характеристика сірчаної кислоти та її сировинної бази	6
1.2 Характеристика отримуваних продуктів	14
1.3 Аналіз функціональних схем виробництва сірчаної кислоти	17
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	22
2.1 Опис технологічної схеми виробництва	22
2.2 Теоретичні основи процесу	24
2.3 Опис конструкції проектованого апарата	29
2.4 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата	31
2.5 Гідравлічні розрахунки	37
2.5 Вибір допоміжного обладнання	38
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	45
3.1 Вибір конструкційних матеріалів	45
3.2 Розрахунки на міцність та стійкість	46
4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА	50
4.1 Обґрунтування компонування основного та допоміжного обладнання	50
4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання	52
5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	57
5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу	57
5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання	61
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ	63
6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів	63

6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора	68
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	70
ДОДАТКИ	

## ВСТУП

Сірчана кислота відіграє важливу роль у світовій хімічній промисловості та в економіці окремих держав загалом. Її популярність пояснюється широким спектром застосувань. Одним з основних сегментів її споживання є виробництво добрив, зокрема фосфорних добрив, яке становить приблизно 60% загального світового попиту на сірчану кислоту.

Україна також відзначається високою часткою використання сірчаної кислоти у виробництві мінеральних добрив. Це пов'язано з тим, що для нормального росту рослин особливо важливі фосфор і азот. Природні джерела фосфору, такі як апатити і фосфорити, містять фосфор у формі трикальцій фосфату  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , який рослини погано засвоюють. Однак після обробки апатитів і фосфоритів сірчаною кислотою отримують кислі солі фосфорної кислоти, такі як дікальцій фосфат  $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  (преципітат), який розчиняється у слабких органічних кислотах ґрунту, і монокальцій фосфат  $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , який розчиняється у воді. Ці розчинні сполуки фосфору стають доступними для рослин і сприяють їхньому зростанню.

За допомогою сірчаної кислоти також можна отримувати азотні добрива. Під час нейтралізації сірчаної кислоти аміаком, отримують водорозчинне азотне добриво - сульфат амонію  $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ . Добрива, які містять амоній і фосфор разом, називаються амофосами.

Окрім цього, сірчана кислота виступає як важливий хімічний агент у виробництві різних видів кислот, таких як соляна, борна, плавикова і інші. Таким чином, важлива роль сірчаної кислоти в сільському господарстві та хімічній промисловості підкреслюється її різнобічним використанням у важливих галузях економіки.

Кожного року відзначається зростання обсягів продажу сірчаної кислоти по всьому світу в порівнянні з попередніми роками. Найбільший приріст відбувся у 2016 році, коли показник збільшився на 4,6%. З 264,0 мільйонів тонн у 2014 році, за даними Busines Stat, передбачається, що до 2023 року цей обсяг зросте до 352,7 мільйонів тонн, що перевищить показники 2018 року на 15,9%.

Зростання попиту на сірчану кислоту пов'язане, передусім, зі зростанням населення Землі. За попередніми прогнозами, до 2050 року на планеті може проживати 9,8 мільярда осіб. Однак, щоб забезпечити зростаючий попит на продукцію сільськогосподарського сектору, необхідно збільшити виробництво сільгосппродукції на близько 60% в порівнянні з поточними показниками. Це завдання неможливо виконати без застосування високоякісних мінеральних добрив [1].

На сьогоднішній день основним методом виробництва сірчаної кислоти є контактний метод, оскільки він має численні переваги порівняно з іншими методами. Зокрема, цей метод дозволяє отримувати сірчану кислоту у формі чистої концентрованої речовини, яка влаштовує всіх споживачів. Крім того, використання контактного методу допомагає зменшити викиди шкідливих речовин в атмосферу, у тому числі із вихлопними газами.

Виконання магістерської кваліфікаційної роботи було проведено відповідно до всіх нормативних вимог і стандартів, згідно з методичними вказівками [2].

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

#### 1.1 Характеристика сірчаної кислоти та її сировинної бази [1, 3]

Технології виробництва сірчаної кислоти відомі вже протягом понад тисячі років. Перші згадки про вибухонебезпечні гази, що виділялися при обробці «зеленого каменю» (залізного купоросу), належать арабському алхіміку Джафару аль-Суфі (Гебер), який жив у VIII столітті. У документах X століття вже фігурують згадки про сірчану кислоту, і вони називають її «купоросною олією» через метод її одержання.

Для задоволення потреб ремісничого виробництва та аптечних потреб до середини XV століття використовувалася суха перегонка залізного купоросу, при якій  $SO_3$ , який виділявся, поглинався водою. Але наступною важливою стадією в історії виробництва кислот було освоєння методу, відомого ще з XIII століття, який включав у себе спалювання сірки в присутності селітри у скляних посудинах з вологими стінками. Саме ця інноваційна технологія стала основою для становлення нітрозного методу виробництва кислоти, в якому оксиди азоту виконували важливу роль у процесі трансферу кисню.

Розквіт природничих наук та раціонального підходу до знань під час періоду «Просвітництва» відкрив шлях до перетворення примітивних ремісничих методів на сучасні технології синтезу сірчаної кислоти. Важливим кроком у цьому процесі була побудова першого сірчано-кислотного заводу в Англії у 1740 році. На той час для виробництва сірчаної кислоти використовували нагрівання суміші сірки і селітри у металевих посудинах, а гази, що утворювалися, поглиналися водою у скляних апаратах. Цей процес отримав назву камерного методу виробництва сірчаної кислоти.

За необхідності розширення обсягів виробництва сірчаної кислоти з метою задоволення ринкового попиту, виникла необхідність вдосконалення технології камерного методу. Споживання соди та інших продуктів, які вимагали сірчану кислоту, стимулювало цей розвиток. Камерний метод мав

свої недоліки, включаючи переривчасту технологічну послідовність та велику кількість оксидів азоту, які викидалися в атмосферу разом із вихідними газами та спричиняли втрати селітри.

У 1774 році французький технолог Де ля Фольє запропонував замінити воду на водяну пару у камерах для інтенсифікації реакції, що дало можливість проводити процес безперервно. У 1810 році цей метод був вперше реалізований на практиці французьким хіміком Д. Голькером і незабаром отримав загальне визнання. В цей час хіміки Н. Клеман і Ш.-Б. Дезорм детально вивчили хімізм процесу, виявивши, що діоксид азоту виконує роль окислювача діоксиду сірки. Вони запропонували жити камери безперервним потоком сірчистого газу  $\text{SO}_2$ , а замість селітри використовувати азотну кислоту. Сірку почали спалювати в окремій печі, а азотну кислоту отримувати розкладанням селітри сірчаною кислотою.

Дослідження хімічних процесів, які відбувалися під час виробництва сірчаної кислоти, також проводили Г. Деві, І. Я. Берцеліус та інші вчені. Наприклад, Г. Деві в 1812 році виявив, що хімічна реакція між сірчистим газом і оксидом азоту можлива лише в присутності води, а без неї ці гази не взаємодіють. В свою чергу, І. Я. Берцеліус вважав, що в камері утворюється водна азотиста кислота, яка передає сірчистій кислоті кисень та воду, що призводить до утворення сірчаної кислоти.

Хоча виробництво сірчаної кислоти стало безперервним, воно залишалось дорогим, особливо коли її сировиною була лише природна сірка. Проблемою також були значні втрати азотної кислоти, оскільки оксиди азоту безповоротно викидалися разом із відхідними газами. Ситуація істотно покращилася завдяки вигадці французького фізика Ж. Л. Гей-Люссака та англійського інженера Дж. Гловера. Це відкрило можливість подальшого значного удосконалення сірчаноокислотного процесу. До технологічного ланцюжка були додані дві спеціальні вежі з насадками. Першу вежу зрошували продукційною кислотою, щоб виділити оксиди азоту, які розчинилися у сірчаній кислоті, а в другій вежі охолоджували сірчану кислоту, яка потім поверталася до першої камери і поглинала оксиди азоту з відходами газами. Ці нововведення допомогли

мінімізувати втрати та підвищити якість продукційної кислоти, знизивши вміст розчинених оксидів азоту. Цей спосіб виробництва сірчаної кислоти з використанням оксидів азоту став відомим як баштовий метод. Інновації дозволили камерним та баштовим системам з нітрозним процесом синтезу працювати практично без змін до початку ХХ століття.

Одночасно з розвитком камерного та баштового методів виробництва сірчаної кислоти розвивався і контактний спосіб. У 1831 році англійський хімік П. Філіпс запропонував метод безпосереднього окислення сірчистого ангідриду киснем на платиновому каталізаторі до триоксиду  $SO_3$ . Це дало можливість відмовитися від використання оксидів азоту для подальшого трансферу кисню під час окислення сірки. За методом Філіпса можна було отримувати як безводну кислоту, так і олеум (розчин  $SO_3$  у безводній сірчаній кислоті).

Відкриття П. Філіпса залишалося без розвитку до 70-х років ХІХ століття. Це було обумовлено не лише високою вартістю платини та невеликим попитом на олеум, але й відсутністю належного розуміння причин отруєння платинового каталізатора.

Ситуація різко змінилася в останній третині ХІХ століття, коли зросла потреба в олеумі та концентрованій кислоті. Це сталося через їхнє використання в реакціях нітрування для виробництва нових видів вибухових речовин. В цей період баштові установки не могли відповісти на зростаючий запит на кислоту з концентрацією вище 75-77 мас.%.

Завдяки ідеям контактного методу, К. А. Вінклер розробив промисловий спосіб одержання сірчаного ангідриду, взаємодіючи сірчистий газ із киснем при наявності платинованого азбесту. До початку ХХ століття німецький вчений Р. Кнітч вирішив проблему очищення випалювального сірчистого газу від домішок, що отруювали платиновий каталізатор. Ці розробки призвели до широкого поширення контактного методу виробництва сірчаної кислоти.

З другої половини ХХ століття виробництво сірчаної кислоти із застосуванням нітрозного методу синтезу практично припинилося в розвинених промислових країнах. Це було обумовлено рядом факторів, зокрема



неможливістю ефективно збільшити обсяги виробництва на основі цього методу через технічні обмеження.

Найбільш значущим кроком у розвитку виробництва сірчаної кислоти методом контактного синтезу стала заміна платиного каталізатора на більш дешеву і стійку до забруднень ванадієву контактну масу. Розроблені процеси окислення в завислому шарі каталізатора і каталізу в умовах високого вмісту водяної пари в газах (метод мокрог каталізу) також отримали широке застосування. У 1930 році введення киплячого шару для випалювання флотаційного колчедану та циклонних печей для спалювання елементарної сірки сприяло підвищенню інтенсивності процесу отримання SO<sub>2</sub> і зменшенню втрат енергії та сировини. Таким чином, наукові дослідження першої половини ХХ століття суттєво змінили сучасний вигляд промислового виробництва сірчаної кислоти.

Починаючи з моменту, коли людство почало виявляти інтерес до надзвичайних властивостей сірки, і аж до сьогодення, ми освоїли виробництво сірчаної кислоти з практично всіх важливих джерел сірки, які можна знайти на поверхні Землі. Не важливо, чи це природні засоби, що включають в себе елементарну сірку та її копаліни у різних формах, або це субпродукти промислових процесів - сировина завжди обирається відповідно до сучасних технологій та економічної доцільності.

Для виробництва сірчаної кислоти використовують різні види сировини, такі як елементарна сірка, сірчаний колчедан, відходи, що містять сірчисті гази і сірководень. Більшість цих сировинних матеріалів виникає як результат комплексної переробки руд кольорових металів, вугілля, нафти та природного газу. Традиційно головними джерелами сірки були сама сірка і сірчаний колчедан. Однак з часом частка колчедану в загальному сировинному обсязі зменшується. Велике значення в сировинному балансі виробництва сірчаної кислоти набули гази, які виділяються в кольоровій металургії і містять діоксид сірки.

**Властивості сірки.** Сірка – це неорганічний полімер з атомним номером 16 і атомною масою 32. Вона існує у двох кристалічних формах: ромбічній і

моноклінній. Сірка відноситься до халькогенів і має властивість формувати стійкі гомоланцюги виключно з атомів сірки. При нормальних умовах температури сірка перебуває у твердому стані у формі S<sub>2</sub>. Вона плавиться при температурі 112,8 °С для ромбічної сірки і 118,8 °С для моноклінної сірки. При підвищенні температури до 190 °С розплавлена сірка стає жовтою і легко рухомою; при подальшому підвищенні температури до 444,6 °С вона кипить. При 1600 °С молекули сірки розпадаються на атоми.

**Елементна сірка**, яка використовується як сировина для виробництва сірчаної кислоти, видобувається з природних сховищ за допомогою двох методів: методу Фраша і автоклавного методу. Обидва ці підходи спрямовані на первинне збагачення сірки і дають концентрат флоту з різним вмістом елементної сірки – від 70-75% до 95-98%. Після повторного збагачення методом флотації вміст сірки може досягати навіть 99%.

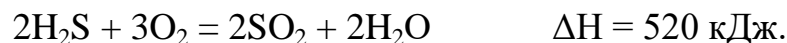
Важливо відзначити, що елементна сірка є найкращою сировиною для виробництва сірчаної кислоти. Під час її спалювання утворюється газ із високим вмістом діоксиду сірки (SO<sub>2</sub>), при цьому практично відсутній огарок і майже немає миш'яку, який може значно ускладнити технологічний процес. Україна має великі природні резерви елементної сірки, особливо у Львівській області. Кілька десятиліть тому обсяг видобутку сірки в країні сягав 1,5 мільйона тонн щорічно.

Сірка низької якості, така як сорти 9950 і 9920, не рекомендується для використання в сірчаноокислому виробництві. У процесах виробництва сірчаної кислоти використовують різні форми сірки: рідку, комову або гранульовану. Це дозволяє підприємствам України розширювати свій вибір постачальників сировини і забезпечувати стабільність виробничих процесів.

**Газова сірка** є продуктом видобутку інших галузей промисловості, таких як металургія, нафтогазова та коксохімічна промисловість. Зазвичай це супутній компонент основних технологічних ланцюжків цих галузей. Є винятки, коли спеціалізовані методи видобутку газової сірки використовуються для отримання чистої сірки в країнах, таких як Франція, Канада та Росія.

Головними джерелами газової сірки є сірководень, який може бути виявлений у коксовому, топковому, природному газі, нафті та газовому конденсаті, а також діоксид сірки, який викидається відхідними газами під час металургійних процесів. Важливо відзначити, що відхідні газу можуть бути перероблені для отримання не лише сірки, але й сірчаної кислоти, зменшуючи викиди в атмосферу і підвищуючи ефективність процесу.

Сучасні методи окислення сірководню до сірки використовують різні модифікації процесу Клауса. Понад 90% сірки з сірководнем виробляється за допомогою цих методів. Стандартний процес включає в себе високотемпературну і каталітичну стадії. Під час високотемпературної стадії, на окремій стадії від вуглеводневої фази, кислі газу окислюються з використанням стехіометричної кількості кисню при високих температурах від 900 до 1350 градусів Цельсія.



Як наслідок сірководень перетворюється на діоксид сірки. Під час наступної каталітичної стадії, залишковий  $\text{H}_2\text{S}$  реагує з  $\text{SO}_2$ , у результаті чого відбуваються дві важливі реакції:

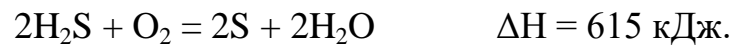
- утворення води ( $\text{H}_2\text{O}$ ): під час цієї стадії, молекули сірководню і діоксиду сірки взаємодіють і перетворюються на воду. Ця реакція відокремлює водень від сірки та кисню, який міститься в молекулі  $\text{H}_2\text{O}$ .

- утворення елементарної сірки ( $\text{S}$ ): після утворення води, залишковий сірководень також взаємодіє з діоксидом сірки і перетворюється на елементарну сірку. Цей процес є важливим для відокремлення сірки від інших компонентів і дозволяє її зберегти для подальшого використання.



Реакція проходить за температури у  $220\text{--}250^\circ\text{C}$  у присутності каталізатора (промотований активний оксид алюмінію). Паралельно з двома

процесами перетворення протікає реакція прямого окиснення сірководню в сірку і воду:



Незважаючи на наявність миш'яку в газовій сірці, що призводить до додаткових витрат на очищення, ця сировина залишається найпопулярнішим джерелом у виробництві сірчаної кислоти. Її вигідність пов'язана зі значним зростанням важливості викопних вуглеводнів у сучасному світі, адже вміст супутньої сірки в нафті та природному газі вищий, ніж запаси природної сірки. Ця зміна на ринку сировини стосується не лише традиційних джерел сірки, але також її різних товарних форм.

**Сірчаний колчедан**, який нерідко знаходиться у вигляді піриту, а іноді марказиту, має густину в межах 4,9–5,1 г/см<sup>3</sup> та 4,3–4,9 г/см<sup>3</sup> відповідно. Головною складовою частиною сірчаного колчедану є сульфід заліза FeS<sub>2</sub>, який містить близько 53,44% сірки та 46,56% заліза. Деякі зразки сірчаного колчедану можуть містити значні кількості сполук кольорових металів, що робить їх поліметалічними рудами.

Флотаційний колчедан отримують шляхом збагачення колчедану, який вже містить 1–1,5% міді. Процес збагачення зазвичай виконується методом флотації. Хімічний склад флотаційного колчедану практично не відрізняється від рядового сірчаного колчедану. Окрім того, існує вид сірчаного колчедану, який містить вугілля від 35 до 40% та 10 до 20% вуглецю. Цей вид колчедану, який містить вугільні домішки, зазвичай відділяється під час обробки кам'яного вугілля.

**Відпрацьовані кислоти.** Споживання сірчаної кислоти в промислових процесах призводить до утворення відпрацьованих кислот, які в деяких випадках виходять з процесу у забрудненому або розведеному стані. Ці відпрацьовані кислоти можуть бути використані знову після очищення та переробки. В різних країнах частка вторинних кислот у загальному споживанні сірчаної кислоти різниться, зазвичай вона становить від 2,5% до 13%.

У XIX столітті сировинна база для виробництва сірчаної кислоти знову зазнала змін. Завдяки розвитку промислового синтезу сірчаної кислоти зростає потреба в альтернативних джерелах сірки. Одним із таких джерел став природний сульфідний мінерал - пірит ( $\text{FeS}_2$ ). Використання піриту як сировини значно підвищило потужності та знизило витрати на виробництво сірчаної кислоти. Однак, цей підхід мав свої недоліки, зокрема потребу у очищенні газів від пилу та каталізаторних отрут перед подачею сірчистих газів на контактне окислення.

Разом із загальним зростанням індустріалізації, розвивався видобуток природних палив, таких як природний газ і нафта. Посилення вимог до екологічних стандартів і безпеки населення вимагали більш ефективного очищення сировини від домішок, включаючи сполуки сірки. З другої половини XX століття розпочалося заміщення сірчаного колчедану природною сіркою як основною сировиною для виробництва сірчаної кислоти. Ця трансформація остаточно відбулася на початку XXI століття, коли були закриті останні сірчаноколчеданні лінії.

Ці зміни в сировинній базі призвели до збільшення видобутку газової сірки, яка є продуктом очищення енергетичних вуглеводнів. Збільшення доступності цієї форми сірки призвело до зниження її вартості, що в свою чергу сприяло розгляду її як головного джерела сировини для синтезу сірчаної кислоти. Ці тенденції також призвели до зміни асортименту товарних форм сірки. Тепер переважна увага приділяється виробництву гранульованої та рідкої сірки, тоді як виробництво комової сірки знижується, оскільки вона вже не відповідає вимогам споживачів.

Ці зміни в сировинній базі і структурі ринку сірки відзначаються не лише у виробництві, а й у різноманітності товарних форм сірки, які стають доступними для споживачів. Водночас, ці зміни відображають глибокий вплив технологічного розвитку, споживчих потреб і стратегічних перетворень на ринку сировини для сірчаноокислотного виробництва.

## 1.2 Характеристика отримуваних продуктів [1, 3]

Сірчана кислота є надзвичайно потужною двоосновною кислотою, яка представляє собою хімічний сполук сірчаного ангідриду ( $\text{SO}_3$ ) та води ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Її класифікація, а також хімічні та фізичні характеристики пов'язані зі змінними пропорціями між  $\text{SO}_3$  і  $\text{H}_2\text{O}$ . Ці пропорції визначають, чи мова йде про водний розчин сірчаної кислоти чи олеум.

Якщо в суміші на один моль  $\text{SO}_3$  припадає більше одного моля води, то така суміш отримує назву водного розчину сірчаної кислоти. В інших словах, це розчин сірчаної кислоти у воді. Цей водний розчин є однією з основних форм сірчаної кислоти і має свої унікальні характеристики та застосування.

У випадку, коли на один моль води припадає більше одного моля  $\text{SO}_3$ , ми маємо справу з олеумом. Олеум - це спеціальна форма сірчаної кислоти, яка містить велику кількість вільного сірчаного ангідриду. Ця речовина відзначається своєю концентрованою та хімічною активністю і знаходить важливе використання у різних галузях промисловості.

Важливо відзначити, що пропорції між  $\text{SO}_3$  і  $\text{H}_2\text{O}$  можуть варіювати, і це може впливати на властивості та застосування сірчаної кислоти. Таким чином, різні форми сірчаної кислоти відіграють важливу роль у хімічних процесах та промисловому виробництві.

Хімічна формула сірчаної кислоти –  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , молекулярна вага – 98,08 г/моль, довжини зв'язків у молекулі : S=O 0,143 нм, S-OH 0,154 нм, кут HOSOH  $104^\circ$ , OSO  $119^\circ$ .

Сірчана кислота,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , може існувати як самостійна хімічна сполука в природі, а також у формі її водних розчинів. Безводна сірчана кислота, відома також як моногідрат, у стані безбарвної масляної рідини при кімнатній температурі, але вона кристалізується при нижчій температурі, приблизно  $10,37^\circ\text{C}$ . При нагріванні, ця кислота утворює азеотропну суміш, що складається на 98,3% з  $\text{H}_2\text{SO}_4$  і 1,7% з  $\text{H}_2\text{O}$ , з точкою кипіння приблизно  $336,5^\circ\text{C}$ .

Густина водних розчинів сірчаної кислоти підвищується зі збільшенням вмісту  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , і досягає свого максимуму при 98,3%  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Після цього

густина зменшується, і при 20°C для безводної H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> вона становить 1,8305 г/см<sup>3</sup>. Ця кислота змішується легко як з водою, так і з SO<sub>3</sub> у всіх можливих співвідношеннях.

У водних розчинах сірчана кислота майже повністю дисоціюється, утворюючи іони H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>, HSO<sub>3</sub><sup>+</sup> і 2HSO<sub>4</sub><sup>-</sup>. Крім того, вона може утворювати гідрати H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>·nH<sub>2</sub>O, де n = 1, 2, 3, 4 і 6,5.

Ця кислота є зручною для використання, оскільки не виділяє диму та не має запаху. При кімнатній температурі вона перебуває у рідкому стані, а в концентрованому вигляді не впливає на чорні метали. Сірчана кислота є сильною двохосновною кислотою і здатна витіснити більш слабкі кислоти з їхніх солей. Важливою властивістю сірчаної кислоти є її гігроскопічність, тобто здатність поглинати вологу.

Існує кілька видів сірчаної кислоти, які різняться за концентрацією та застосуванням. До них відносяться контактна поліпшена сірчана кислота, контактна технічна сірчана кислота першого і другого сорту, реактивна сірчана кислота, регенована сірчана кислота і акумуляторна сірчана кислота. Кожна з цих форм має свої унікальні характеристики і відповідає вимогам відповідних стандартів.

**Олеум** (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - (n-1)SO<sub>3</sub>) – це розчин оксиду сірки (VI) у 100% сірчаній кислоті з додаванням піросірчаних кислот, які утворюються внаслідок хімічних реакцій. Олеум також має свої варіації, залежно від концентрації та вмісту оксиду сірки (VI), і знаходить широке використання у промисловості.



Олеум – це особлива речовина, яка може мати форму в'язкої масляної безбарвної рідини або навіть легкоплавких кристалів різних відтінків через присутність певних домішок. Ця речовина може змінювати свій стан залежно від умов і складу. Коли вміст надлишкового SO<sub>3</sub> досягає 40% за масою, в олеумі можуть утворюватися кристали піросірчаної кислоти, і її температура плавлення стає низькою - всього 33°C.

Оскільки олеум є проміжним продуктом під час виробництва сірчаної кислоти, його точний склад визначається залежно від конкретних цілей застосування. Молекули у олеумі фактично не з'єднуються, і співвідношення оксиду і кислоти може варіюватися. Важливим показником є міцність олеуму, яка виражається у відсотках вмісту вільного  $\text{SO}_3$  у загальній масі олеуму.

Олеум грає важливу роль у виробництві сірчаної кислоти, і його отримують шляхом розведення з водою. Цей процес дозволяє отримати різні види сірчаної кислоти з різною концентрацією і властивостями відповідно до конкретних потреб і вимог.

Олеум виявляє значно вищу хімічну активність порівняно з концентрованою сірчаною кислотою, і ця різниця властивостей робить його унікальною хімічною сполукою. Це проявляється в ряді характеристик, що відрізняють олеум від сірчаної кислоти.

Однією з основних відмінностей є вища активність олеуму, яка полягає в його здатності до більш інтенсивних хімічних реакцій і взаємодій з іншими сполуками. Ця властивість робить його важливим компонентом в хімічній промисловості для виробництва різних продуктів та синтезу хімічних сполук.

Крім того, олеум також відрізняється від сірчаної кислоти за структурою і взаємодіями молекул. У нього може бути інший склад та співвідношення молекул, що дозволяє використовувати його для різноманітних хімічних процесів.

На відміну від майже нелетючої концентрованої сірчаної кислоти, олеум проявляє різні характеристики, перш за все, він виділяє у повітря триоксид сірки  $\text{SO}_3$ , що призводить до видимого димлення, надаючи йому характерний зовнішній вигляд. Крім того, при контакті з водою олеум видає значну кількість тепла через вельми екзотермічну реакцію. Це свідчить про його високу хімічну активність та здатність взаємодіяти з іншими сполуками.

Виробництво олеуму поділяється на два основних типи: поліпшений з вмістом  $\text{SO}_3$  на рівні 24% за масою і технічний з вмістом  $\text{SO}_3$  на рівні 19% за масою. Важливою є індивідуальна характеристика олеуму, яка залежить від його конкретного використання та потреби в конкретних хімічних процесах.



Товарний вигляд і властивості олеуму регламентуються відповідно до стандартів, включаючи Державний стандарт України ДСТУ 2184-2013. Ця нормативна документація визначає вимоги до якості та характеристик олеуму, щоб забезпечити його безпечне та ефективне використання у різних галузях промисловості.

### **1.3 Аналіз функціональних схем виробництва сірчаної кислоти**

Сучасний процес виробництва сірчаної кислоти можна розглядати як послідовність ключових етапів, кожен з яких відіграє важливу роль у формуванні цього продукту (див. рис. 1.1):

1. Складування цільової товарної форми сірки: цей етап включає зберігання сірки у вигляді, придатному для подальшого використання в виробництві сірчаної кислоти.

2. Плавка та/або фільтрування сировини: залежно від стану сировини, проводиться процес плавлення або фільтрації, щоб підготувати її до наступних етапів.

3. Окислення та перехід рідкої фази в технологічний газ: на цьому етапі відбувається окислення сировини, перетворюючи її у технологічний газ з вмістом  $\text{SO}_2$ .

4. Одностадійне або двостадійне окислення  $\text{SO}_2 \rightarrow \text{SO}_3$ : окислення  $\text{SO}_2$  до  $\text{SO}_3$  відбувається в присутності каталізатора. Цей процес може бути одностадійним або двостадійним, в залежності від використаної технології.

5. Стадії абсорбції  $\text{SO}_3$ : на цьому етапі  $\text{SO}_3$  абсорбується для вилучення сірчаної кислоти або олеуму в залежності від використаної схеми контактування. У випадку лінії з однократним контактуванням необхідно додатково очищення вихлопних газів від  $\text{SO}_2$ .

6. Нормування та складування виробленого продукту: сірчана кислота після всіх процесів нормується та зберігається у відповідних умовах для подальшого використання.

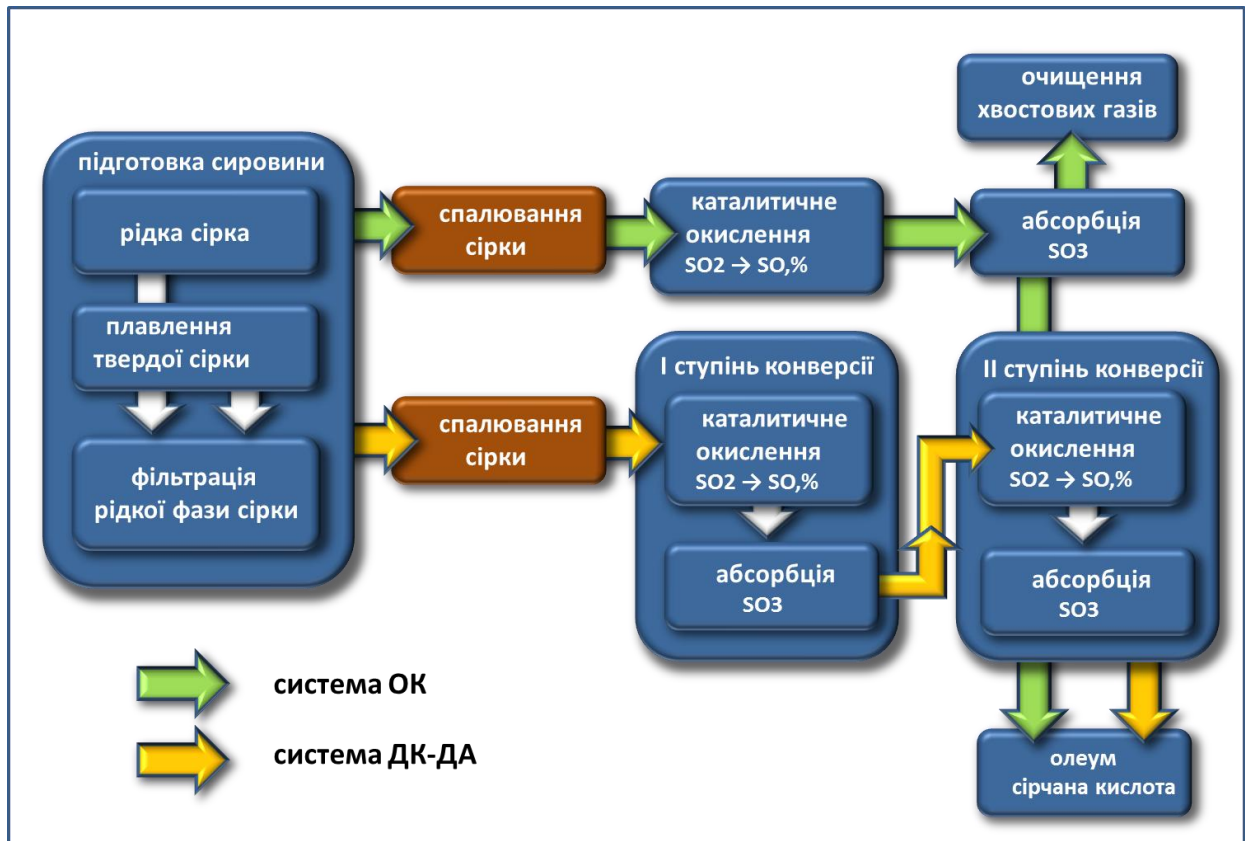


Рисунок 1.1 – Функціональна схема виробництва сірчаної кислоти та олеуму із твердих та рідких товарних форм сірки

Хімічна схема включає в себе реакції:

- окислення випалом сірки  $S_2 + 2O = 2SO_2$
- окислення діоксиду сірки  $S_2 + 1/2O_2 = SO_3$
- абсорбція триоксиду сірки  $2SO_3 + H_2O = 2H_2SO_4$

У системі подвійного контактування з подвійною абсорбцією (ДК-ДА), що структурно відрізняється від схеми одинарного контактування, додатковий ступінь конверсії встановлюється для оптимізації процесу (див. рис. 1.2). Обидва типи контактної маси (промотивована ванадієва маса) у встановці ДК-ДА розподілені на дві стадії окислення.

На першому етапі в контактному апараті відбувається реакція на трьох шарах каталізатора, на другому етапі використовується два шари каталізатора. Технологічний процес на другій стадії конверсії схожий на лінію з одинарним контактом (ОК).

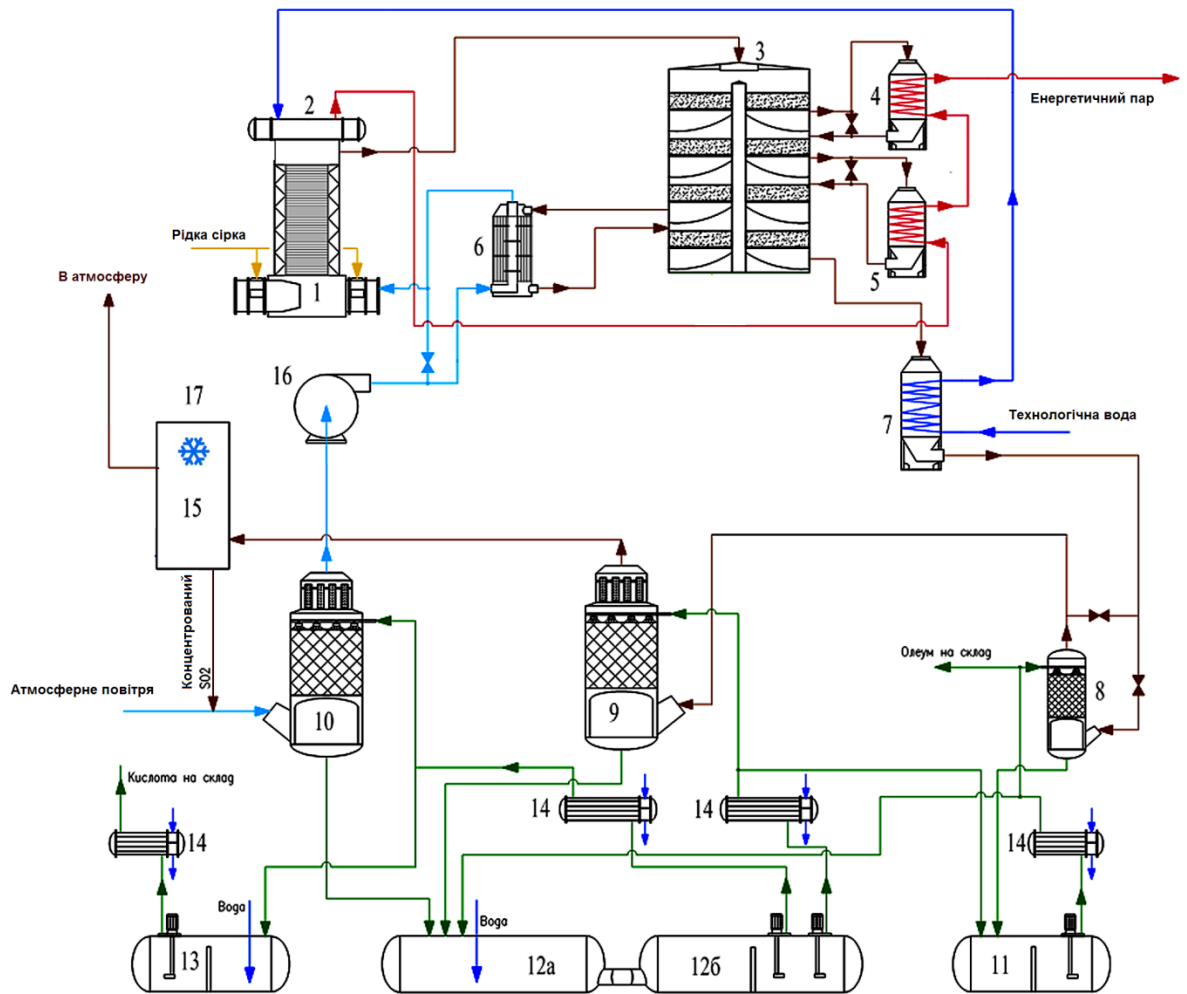


Рисунок 1.2 – Варіант реалізації технологічної схеми виробництва сірчаної кислоти методом ОК з олеумним абсорбером та хвостовим очищенням відхідних газів

Після проходження через моногідратний абсорбер першого ступеня, газ піддається очищенню від бризок сірчаної кислоти, нагрівається до  $420^{\circ}\text{C}$  і подається на другу стадію конверсії, яка протікає на двох шарах каталізатора. Перед наступною стадією вилучення, технологічний газ охолоджується в економайзері і потрапляє в абсорбер другого ступеня. Там він змочується 98,3%-вою сірчаною кислотою, а після очищення від бризок викидається в атмосферу.

У системах подвійного контактування з подвійною абсорбцією (ДК-ДА), ступінь окислення  $\text{SO}_2$  до  $\text{SO}_3$  становить 99,7–99,8%, що свідчить про відсутність потреби в додатковій ланці вилучення триоксиду сірки з вихлопних газів.

Необхідною частиною виробництва для забезпечення енергетичного балансу є ціль, спрямована на зменшення поточних втрат і оптимізацію витрат енергії в технологічній системі. Ці завдання можна вирішити за допомогою поєднання рекуперативного, очисного, утилізаційного додаткового обладнання та шляхом удосконалення та автоматизації управління основними технологічними процесами. Важливою складовою цього процесу є також розвинена логістична інфраструктура, забезпечення витратними та енергетичними ресурсами, культура виробництва, а також врахування аспектів безпеки та екологічних питань.

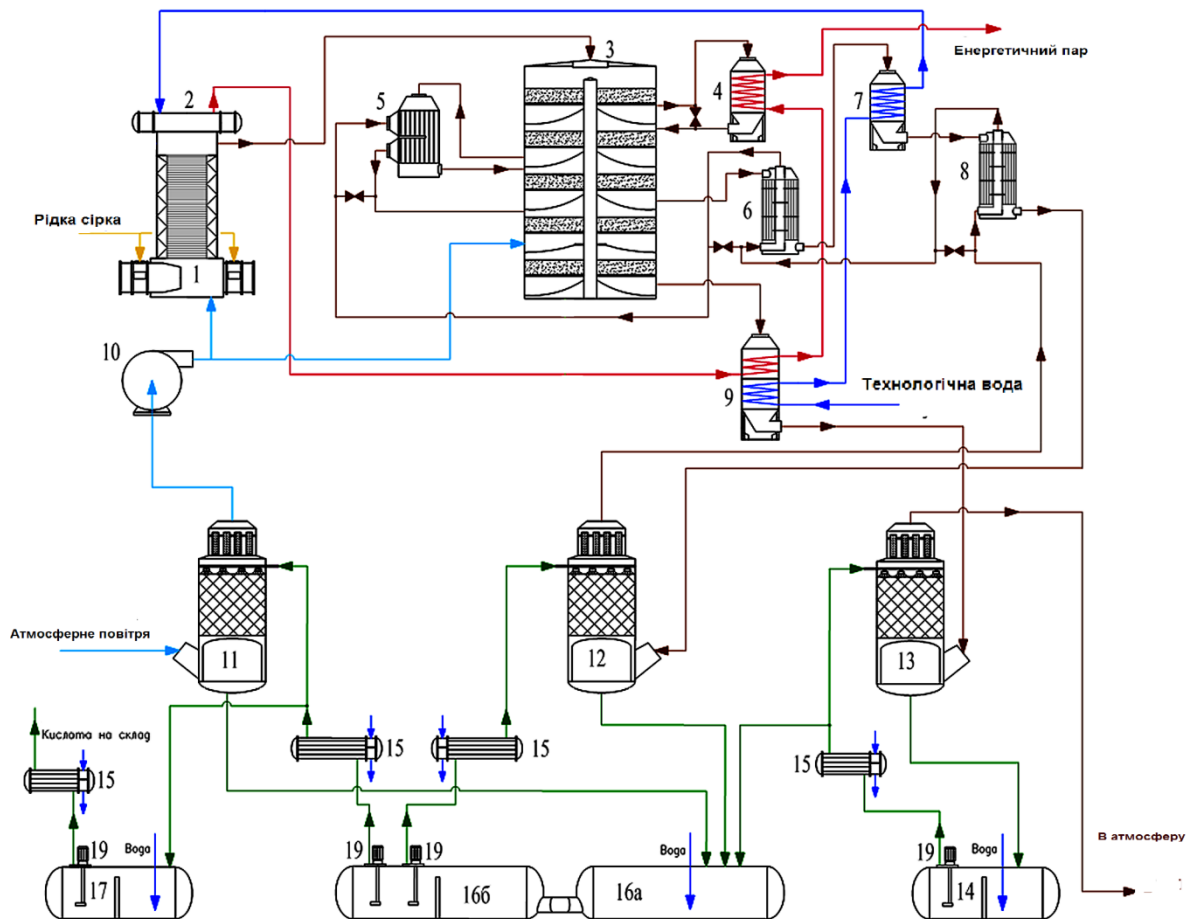


Рисунок 1.3 – Варіант реалізації технологічної схеми виробництва сірчаної кислоти методом подвійного контактування

Результативність роботи насадкових апаратів залежить від кількох ключових чинників, але одним із найважливіших є якість поверхні самої насадки. Застосування сідлоподібної насадки «Інталокс» дозволяє значно

зменшити кількість необхідної насадки для проведення процесу абсорбції, а також висоту апарата, що призводить до зниження витрат матеріалів. Крім того, це сприяє зниженню ваги апарата та зменшенню витрат на його будівництво, що робить цей проект більш економічно вигідним порівняно з базовим варіантом.

## РОЗДІЛ 2

### ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

#### 2.1 Опис технологічної схеми виробництва

На рис. 2.1 представлено технологічну схему виробництва концентрованої сірчаної кислоти.

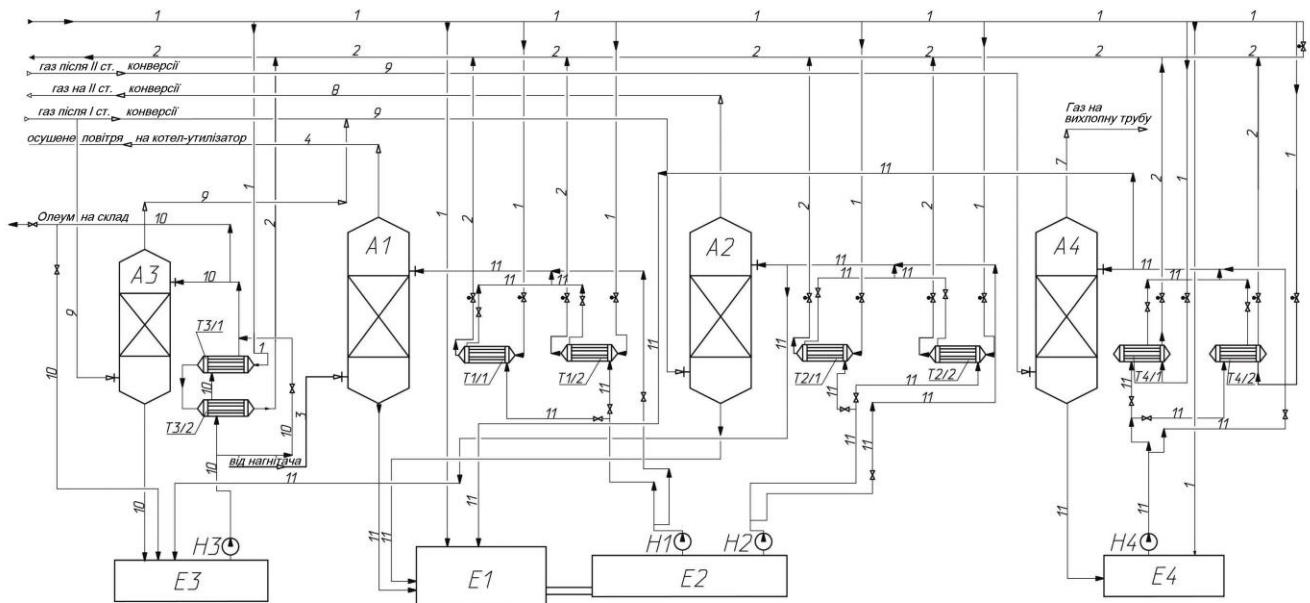


Рисунок 2.1 – Схема виробництва концентрованої сірчаної кислоти

Сушильна башта (поз. А1) зрошується 98,5 % сірчаною кислотою. У башту сушильну існуючим нагнітачем подається атмосферне повітря. У башті відбувається осушення атмосферного повітря до 0,01 % вологи.

Далі осушене повітря послідовно прямує в пічне відділення на спалювання сірки, в контактне відділення на змішування із газом після IV шару з метою його охолодження, і на пусковий підігрівач під час пускового періоду.

Далі вихідна кислота надходить до збірника-змішувача (поз. Е1). Оскільки сушильна башта працює під тиском, у збірнику-змішувачі встановлюється перегородка, яка забезпечує необхідний гідрозатвор.

До збірника-змішувача також надходить кислота з абсорбера моногідратного I (поз. A2), надлишок 98,5 % сірчаної кислоти з циклу абсорбера моногідратного II (поз. A4) і вода для підтримки концентрації кислоти до 98,5 %  $H_2SO_4$ .

Уся кислота перетікає в об'єднаний збірник (поз. E2), у якому встановлені два заглибних кислотних насоси. Насос (поз. H1) призначений для подачі сірчаної кислоти на зрошення сушильної башти. Кислота, що подається на зрошення, охолоджується зворотною водою у двох паралельно підключених за прямотечійною схемою руху середовищ кожухотрубчастих холодильниках (поз. T1/1,2).

Після третього шару контактного апарату газ спрямовується на проміжну абсорбцію. Перша ступінь абсорбції складається з абсорберів: олеумного (поз. A3) і моногідратного I (поз. A2). Абсорбер олеумний включений в шунт до абсорбера моногідратного I. Газоходи до абсорберів олеумного, моногідратного I і після олеумного абсорбера футеруються.

Цикл олеумного абсорбера включає абсорбер олеумний (поз. A3), збірник циркуляційний (поз. E3), два холодильника кожухотрубчастих (поз. T3/1,2) з послідовним підключенням за протитечійною схемою руху середовищ.

Абсорбер олеумний зрошується 20 % олеумом із температурою 55 °С. Температура вихідного олеуму становить 73 °С.

У результаті абсорбції  $SO_3$  відбувається закріплення концентрації зрошеного олеуму до 21,5 %  $SO_3$  зв.

Розведення олеуму до концентрації 20 %  $SO_3$  зв. здійснюється 98,5 % сірчаною кислотою з циклу абсорбера моногідратного I. Температура олеуму, що утворюється в збірнику в результаті змішування, досягає 70 °С. Зі збірника олеум занурювальним насосом (поз. H3) подається на охолодження у два послідовно з'єднаних кожухотрубчастих холодильники (поз. T3/1,2).

Моногідратний абсорбер I зрошується 98,5 % сірчаною кислотою з об'єднаного збірника (поз. E2). У абсорбері відбувається поглинання  $SO_3$  з газу.

Охолодження кислоти циклу моногідратного абсорбера I здійснюється у двох кожухотрубчастих холодильниках (поз. T2/1,2), підключених паралельно

за прямиотечійною схемою руху середовищ. Після холодильників (поз.Т2/1,2) охолоджена сірчана кислота надходить на зрошення першого моногідратного абсорбера.

Після II ступеня конверсії газ надходить в моногідратний абсорбер II (поз. А4). Відпрацьований газ після абсорбера направляєється на вихлопну трубу.

Після моногідратного абсорбера II сірчана кислота надходить до збірника (поз. Е4), де розбавляється водою до концентрації 98,5 %  $H_2SO_4$ . Зі збірника сірчана кислота занурювальним кислотним насосом (поз. Н4) подається на охолодження у два кожухотрубчастих холодильники (поз. Т4/1,2). Підключення холодильників – паралельне з протитечійною схемою руху середовищ.

Після холодильників (поз. Т4/1,2) сірчана кислота надходить на зрошення моногідратного абсорбера II (поз. А4). Надлишок сірчаної кислоти направляєється у збірник-змішувач (поз. Е2).

Температура кислоти на зрошення баштового обладнання регулюється байпасуванням частини кислотного потоку повз холодильники.

У якості охолоджуючого середовища в усіх кожухотрубчастих холодильниках використовується оборотна вода, яка, у свою чергу, охолоджується в градирні водообертового циклу.

## **2.2 Теоретичні основи процесу [1, 4, 5]**

При переході з газової фази в рідку, енергія молекул компонента, що розподіляється, зменшується. Тому процес абсорбції супроводжується виділенням тепла і підвищенням температури системи. Крім того, обсяг системи в процесі абсорбції зменшується за рахунок зменшення обсягу газової фази. Отже, згідно з принципом Ле-Шательє, розчинність газу в рідині збільшується при підвищенні тиску і зменшення температури процесу. Статика процесу абсорбції описується рівнянням Генрі, а кінетика – основними рівняннями масопередачі.



Закон Генрі. У стані рівноваги при даній температурі молярна частка вилученого газу у розчині пропорційна парціальному тиску газу над розчином:

$$X = P \cdot \frac{1}{E},$$

де  $E$  – це коефіцієнт Генрі (розмірність тиску).

Основне рівняння масопередачі:

$$G = K \cdot F \cdot \Delta c_p,$$

де  $K$  – коефіцієнт масопередачі;

$F$  – площа поверхні контакту фаз;

$\Delta c_p$  – середня рушійна сила процесу.

Коефіцієнт масопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\beta_y} + \frac{m}{\beta_x}},$$

де  $\beta_y, \beta_x$  – коефіцієнти масовіддачі відповідно у газовій і рідкій фазах;

$m$  – середній коефіцієнт розподілу.

Діаметр насадкової колони розраховується з рівняння об'ємної витрати суцільної фази в залежності від допустимої швидкості газу  $w_2$  та його максимальної витрати  $V_2$ :

$$D'_k = \sqrt{\frac{4 \cdot V_2}{\pi \cdot w_2}} = \sqrt{\frac{V_2}{0,785 \cdot w_2}}.$$

Обчислений діаметр колони округлюють до стандартного діаметра  $D_k$  циліндричних обичайок, з уточненням фактичної робочої швидкості газу в апараті  $w_y$ :

$$w_y = \frac{V_z}{0,785 \cdot D_k^2}.$$

При визначенні діаметра насадкового абсорбера важливо враховувати, як насадка змочується абсорбентом. Цей зв'язок між змочуваністю насадки і параметрами абсорбера, такими як його діаметр і витрата абсорбенту, може бути виражений через щільність зрошення. Залежність між цими факторами може бути описана такою формулою:

$$U = \frac{L}{0,785 \cdot D_k^2 \cdot \rho_x}.$$

У випадку, коли щільність зрошення є недостатньою або подача рідини не організована належним чином, поверхня насадки може бути змочена лише частково, і деяка частина цієї поверхні може залишатися практично неактивною в процесі масопередачі. Це може статися через утворення застійних зон рідини або нерівномірного розподілу газу по перерізу колони.

Важливо відзначити, що існує оптимальна щільність зрошення, при якій всю поверхню насадки можна вважати змоченою і активною для процесу масопередачі. Для насадкових абсорберів ця оптимальна щільність зрошення може бути визначена за допомогою співвідношення:

$$U_{opt} = a_n \cdot q_{ef},$$

де  $q_{ef}$  – ефективна лінійна щільність зрошення,  $m^2/s$ .

Частинна висота одиниці перенесення в рідкій фазі розраховується за наступною формулою, одержаною після перетворень критеріального рівняння:

$$h_x = 119 \cdot \delta_{nl} \cdot Re_x^{0,25} \cdot Pr_{Dx}^{0,5}.$$

Відповідно до третього методу, кінетика виражається за допомогою висоти, еквівалентної теоретичній тарілці  $h_{emm}$ , рушійна сила обчислюється опосередковано через число теоретичних тарілок  $N_{oz}$ , а висота шару насадки розраховується за наступною формулою:

$$H = N_{oz} \cdot h_{emm}.$$

Теоретична тарілка, або теоретичний ступінь концентраційних змін, відповідає певній гіпотетичній ділянці апарата, на якій рідина повністю змішується, а концентрації фаз, що відводяться, є рівноважними.

Для визначення числа теоретичних тарілок можна використовувати рівняння Кремсера:

$$N_{oz} = \frac{\lg\left(\frac{A-\varphi}{1-\varphi}\right)}{\lg A} - 1,$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт видобування ключового компонента газу (відношення фактичної кількості поглиненого компонента до теоретичної, яку досягають в умовах рівноваги між газом, що виходить з абсорбера, та рідиною, що надходить до абсорбера),

$$\varphi = \frac{Y_n - Y_\kappa}{Y_n - Y_\kappa^*}.$$

Значення висоти насадки, яка еквівалентна одній теоретичній тарілці, вказує на ефективність контакту або ефективність самої насадки. Ефективність насадкової колони залежить від різних факторів, включаючи параметри витрат,

фізичні властивості газу і рідини, тип насадки, початковий розподіл зрошувальної рідини, розмір і матеріал насадки, висоту шару насадки і метод її укладання. Крім того, ефективність насадкової колони сильно впливає на нерівномірний розподіл потоків по перерізу колони, що може призводити до вибіркового руху газу і рідини.

Незважаючи на тривалий досвід досліджень насадкових колон, значення висоти насадки, еквівалентної одиниці перенесення, до цього часу визначається за допомогою напівемпіричних та емпіричних рівнянь.

Висоту насадки з кілець, яка еквівалентна одній теоретичній тарілці, можна розрахувати використовуючи наступне рівняння:

$$h_{emm} = 5,2 \cdot d_e \cdot Re_y^{0,2} \cdot \left(\frac{G}{L}\right)^{0,35} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y}\right)^{0,2} \cdot \frac{\lg A}{1-1/A}.$$

Висоту насадки, еквівалентну одній теоретичній тарілці, для умов, що відповідають початку емульгування, можна розрахувати використовуючи наступне рівняння:

$$h_{emm} = 48 \cdot \left(\frac{w_y \cdot \rho_y}{\mu_y}\right)^{0,2} \cdot a_n^{-1,2} \cdot \varepsilon \cdot \left(\frac{G}{L}\right)^{0,405} \cdot \left(\frac{\rho_x}{\rho_y}\right)^{0,225} \cdot \left(\frac{\mu_y}{\mu_x}\right)^{0,045} \cdot \frac{\lg A}{1-1/A}.$$

Висота насадки, еквівалентна одній теоретичній тарілці, для колон, що працюють в емульгаційному режимі, може визначатися за наступним рівнянням:

$$h_{emm} = 200 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{a_n}\right)^{1,2} \cdot \frac{1}{w_y^{0,4}}.$$

Повна висота насадкової колони включає в себе як робочу висоту шару насадки, так і висоту, яка враховує необхідність виділення додаткових об'ємів, таких як простори для сепарації, установка додаткових пристроїв, таких як розподільники рідини, конуси для відводу рідини, перерозподільні тарілки, люки для обслуговування, ремонту, завантаження і вивантаження насадки та інші елементи. Повна висота насадкової колони розраховується за допомогою наступної формули:

$$H_k = H + (n - 1) \cdot h_n + H_e + H_n,$$

де  $n$  – кількість секцій насадки;

$h_n$  – висота проміжків між секціями насадки, в яких розміщуються перерозподільні тарілки;

$H_e$  – висота сепараційного простору над насадкою;

$H_n$  – відстань між днищем колони і насадкою.

Відношення висоти насадки до діаметра колони має відповідати умові  $H/D_k = 1,5-10$ . Кількість секцій насадки у колоні визначається з умови, що відношення висоти кожної секції до діаметра колони не перевищує 2,5–3.

### 2.3 Опис конструкції проектного апарата

Сушильна башта (рис. 2.2) представляє собою вертикальний сталевий апарат із зварними з'єднаннями, обладнаний конічною кришкою 2 і плоским нижнім днищем 8.

У середині апарат футерований корозійностійкими матеріалами. Зокрема, нижня частина башти вкрита за допомогою арок, які завершуються колосниковою решіткою в якості основного елемента для розподілу газу. Над цим шаром насадки 6 розташована розподільна система, що складається з розподільної плити 5 та "павуків" 4 для рівномірного розподілу газу.

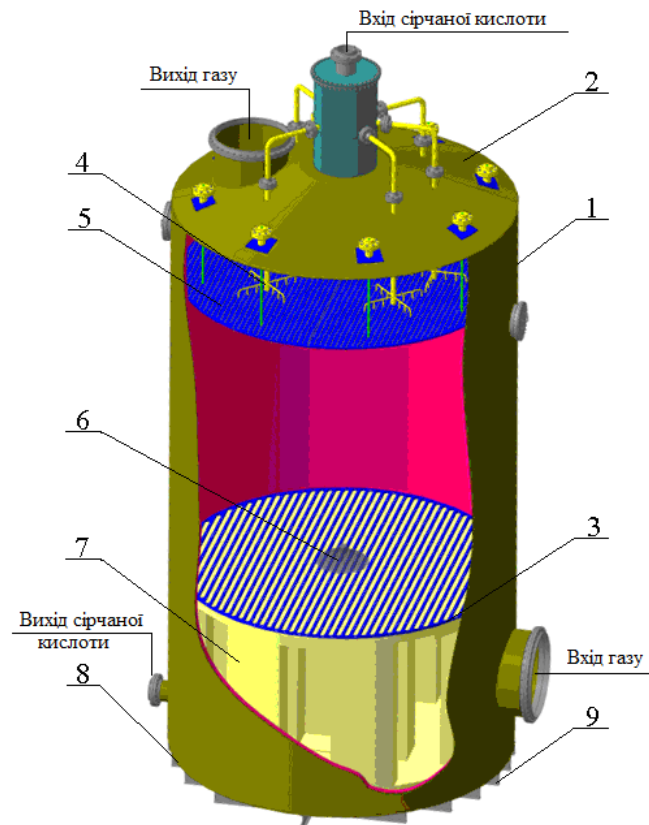


Рисунок 2.2 – 3D модель осушувальної башти

Корпус сушильної башти також захищений від корозії завдяки використанню корозійностійких матеріалів. Сушильна башта обладнана штуцерами та технологічними люками для зручного обслуговування та обслуговування.

Газ подається до осушувальної башти за допомогою нагнітача. Система газоподачі до та після башти також забезпечена захистом від корозії. Процес в осушувальній башті включає саму башту, циркуляційний збірник, два холодильники кожухотрубних з послідовним підключенням відповідно до протитечійної схеми руху середовища. Газ зволожується за допомогою 98%-вої сірчаної кислоти, і процес контакту газу з кислотою відбувається на поверхні насадки. Це забезпечує ефективне осушення газу до рівня вологості 0,01%. Сірчана кислота, що утворюється в процесі, стікає до спеціального збірника.

## 2.4 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата

Витрата циркулюючої кислоти розраховується:

$$L = L_c \cdot K_u = 20 \cdot 380000 = 7,6 \cdot 10^6 \text{ м/рік} = 867580 \text{ кг/год}, \quad (2.1)$$

де  $L_c$  – продуктивність апарату;

$K_u$  – кратність циркуляції кислоти;  $K_u = 20$ .

Об'єм сухого газу, приведений до нормальних умов, м<sup>3</sup>/год. складе:

$$V = \frac{L \cdot 22,4}{M_{H_2SO_4}}, \quad (2.2)$$

де  $M_{H_2SO_4}$  – мольна маса сірчаної кислоти, кмоль/кг.

$$V = \frac{867580 \cdot 22,4}{98,08} = 198142 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Об'єм сухого газу, приведений до робочих умов, м<sup>3</sup>/год:

$$V_p = V \cdot \frac{T_p \cdot P_0}{T_0 \cdot P_p}, \quad (2.3)$$

де  $T_p$  – робоча температура всередині апарату, К;

$P_p$  – робочий тиск всередині апарату, МПа.

$$V_p = 198142 \cdot \frac{348 \cdot 0,1}{273 \cdot 0,17} = 146440 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Об'єм кислоти, приведений до робочих умов, м<sup>3</sup>/с:

$$V_{жс} = \frac{L}{\rho_{H_2SO_4} \cdot 3600}, \quad (2.4)$$

де  $\rho_{H_2SO_4} = 1785$  кг/м<sup>3</sup> – густина поглиначча [1].

$$V_{жс} = \frac{867580}{1785 \cdot 3600} = 0,135 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Кількість парів води, що поглинаються із газу, кг/год:

$$Q = \frac{V \cdot (P_1' - P_2'') \cdot M_{H_2O}}{(P - P_1' - P_p) \cdot 22,4}, \quad (2.5)$$

де  $P_1' = 233,7$  мм рт. ст. – тиск парів води в газі на вході у башту [3];

$P_2'' = 149,4$  мм рт. ст. – тиск парів води в газі на виході із башти [3];

$M_{H_2O}$  – мольна маса води, кмоль/кг.

$$Q = \frac{198142 \cdot (233,7 - 149,4) \cdot 18}{(760 - 233,7 - 415) \cdot 22,4} = 120596 \text{ кг / год}$$

Коефіцієнт швидкості абсорбції парів води складе:

$$K = K_0 \cdot w^m, \quad (2.6)$$

де  $K_0 = 0,04$  – константа, яка чисельно дорівнює коефіцієнту абсорбції при швидкості газу 1 м/с [2];

$m = 0,8$  – коефіцієнт при турбулентному потоці [2];

$w$  – робоча швидкість парів в повному перерізі колони, м/с.



Швидкість захлинання для сідел «Інталлокс» обчислюємо за формулою [7]:

$$W_3 = \frac{L}{0,785 \cdot D_p^2}; \quad (2.7)$$

$$D_p = 0,339 \cdot \left[ \frac{37 \cdot L}{A_0} \cdot \left( \frac{\rho_\Gamma}{\rho_{ж} - \rho_\Gamma} \right)^{0,5} - 510 \cdot L \cdot \lg A_1 \right]^{0,5}, \quad (2.8)$$

де  $A_0$  і  $A_1$  – коефіцієнти, що визначені за [7].

$$D_p = 0,339 \cdot \left[ \frac{37 \cdot 241}{0,275} \cdot \left( \frac{19}{1785 - 19} \right)^{0,5} - 510 \cdot 241 \cdot \lg 0,985 \right]^{0,5} = 14,8.$$

$$W_3 = \frac{241}{0,785 \cdot 14,8^2} = 1,4 \frac{м}{с}.$$

Тоді реальну швидкість визначаємо за залежністю:

$$w' = (0,8...0,9) \cdot W_3, \quad (2.9)$$

$$w' = 0,85 \cdot 1,4 = 1,19 \frac{м}{с}.$$

$$K = 0,04 \cdot 1,19^{0,8} = 0,046 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{год} \cdot \text{мм рт. ст.})$$

Рушійну силу процесу обчислюємо за формулою:

$$\Delta P = \frac{(P_1' - P_2') - (P_1'' - P_2'')}{2,3 \cdot \lg \frac{P_1' - P_2'}{P_1'' - P_2''}}, \quad (2.10)$$

Рівноважний тиск парів води над 98 %-вою сірчаною кислотою при 60°C, буде складати  $5 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст. [6]. Підставивши значення  $P_1' = 233,7$  мм рт. ст.,  $P_1'' = 149,4$  мм рт. ст.,  $P_2' = P_2'' = 5 \cdot 10^{-3}$  у рівняння для  $\Delta P$ , розраховуємо:

$$\Delta P = \frac{(233,7 - 5 \cdot 10^{-3}) - (149,4 - 5 \cdot 10^{-3})}{2,3 \cdot \lg \frac{233,7 - 5 \cdot 10^{-3}}{149,4 - 5 \cdot 10^{-3}}} = 188,6 \text{ мм рт. ст.}$$

Внутрішній діаметр осушувальної башти, м складе:

$$D = \sqrt{\frac{V_p}{w \cdot 0,785 \cdot 3600}}, \quad (2.11)$$

$$D = \sqrt{\frac{146440}{1,19 \cdot 0,785 \cdot 3600}} = 6,5 \text{ м.}$$

Поверхню насадки визначимо за формулою, м<sup>2</sup>:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta P}, \quad (2.12)$$

де  $Q$  – кількість парів води, що поглинаються із газу, кг/год;

$K$  – коефіцієнт швидкості абсорбції, кг/(м<sup>2</sup>·год·мм рт. ст.);

$\Delta P$  – рушійна сила абсорбції, мм рт.ст.

$$F = \frac{120596}{0,046 \cdot 188,6} = 13900 \text{ м}^2.$$

Враховуючи досвід експлуатації, зазвичай застосовують насадку башти не в повному обсязі. З цією метою, ми вводимо коефіцієнт запасу, який дорівнює 1,3. Таким чином, для обчислення площі поверхні насадки в розрахованій осушувальній башті, ми використовуємо наступний вираз:

$$F = 13900 \cdot 1,3 = 18070 \text{ м}^2.$$

В нашому проєкті вбираємо насадку – керамічні перфоровані сідла «Інталлокс» (35 мм). Дана насадка має наступні характеристики [7]:  $a = 131 \text{ м}^2/\text{м}^3$  – питома поверхня насадки;  $\varepsilon = 0,81$  –  $\text{м}^3/\text{м}^3$  – вільний об’єм.

Загальний об’єм насадки буде складати:

$$V_H = \frac{F}{a}, \quad (2.13)$$

$$V_H = \frac{18070}{131} = 146 \text{ м}^3.$$

Висота насадки складе:

$$H = \frac{4 \cdot V_H}{\pi \cdot D^2}, \quad (2.14)$$

$$H = \frac{4 \cdot 146}{3,14 \cdot 6,5^2} = 5,7 \text{ м}.$$

Обчислюємо діаметр патрубку для введення вихідної газової суміші:

$$d_z = \sqrt{\frac{V_p}{0,785 \cdot w_{z,n}}}, \quad (2.15)$$

де  $w_{z,n}$  – швидкість потоку газової суміші, приймаємо рівним 20 м/с.

$$d_z = \sqrt{\frac{146440}{0,785 \cdot 20 \cdot 3600}} = 1,6 \text{ м}.$$

Прийmemo патрубок  $\text{Ø}1620 \times 10$  мм із фланцем.

Обчислимо діаметр патрубку для введення рідини:

$$d_{жс} = \sqrt{\frac{V_{жс}}{0,785 \cdot w_{жс}}}, \quad (2.16)$$

де  $w_{жс}$  – швидкість потоку рідини, приймаємо рівним 2,0 м/с.

$$d_{жс} = \sqrt{\frac{0,135}{0,785 \cdot 2,0}} = 0,29 \text{ м.}$$

Прийmemo патрубок  $\text{Ø}377 \times 8$  мм із фланцем.

Відстань від верха насадки до кришки абсорбера складе:

$$h_1 = (0,2 \div 0,4) \cdot D, \quad (2.17)$$

$$h_1 = (0,2 \div 0,4) \cdot 6,5 = 1,3 \div 2,6 \text{ м.}$$

Відстань від колосникової решітки до днища абсорбера, м:

$$h_2 = (0,5 \div 0,6) \cdot D, \quad (2.18)$$

$$h_2 = (0,5 \div 0,6) \cdot 6,5 = 3,25 \div 3,9 \text{ м.}$$

При цьому тут буде розміщений патрубок для введення газової суміші.

Загальна геометрична висота робочої частини абсорбера:

$$H_a = H + h_1 + h_2. \quad (2.19)$$

$$H_a = 5,7 + 1,8 + 3,7 = 11,2 \text{ м.}$$

## 2.5 Гідравлічні розрахунки

Гідравлічний опір  $\Delta P_a$  обумовлює енергетичні витрати, які виникають при транспортуванні газового потоку через абсорбер.

Величину  $\Delta P_a$  обчислюємо за рівнянням:

$$\Delta P_a = \Delta P_c \cdot 10^{b \cdot U}, \quad (2.20)$$

де  $\Delta P_c$  – гідравлічний опір сухої (не зрошеною рідиною) насадки;

$U$  – щільність зрошення,  $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ ;

$b = 30$  – коефіцієнт, що залежить від типу насадки.

Гідравлічний опір сухої насадки розраховуємо за рівнянням:

$$\Delta P_c = \lambda \cdot \frac{H}{d_s} \cdot \frac{\omega^2}{2} \cdot \rho_g, \quad (2.21)$$

де  $\omega_0$  – швидкість газу у вільному перерізі насадки:

$$\omega_0 = w' = 1,19 \text{ м/с}. \quad (2.22)$$

$\lambda$  – коефіцієнт опору, який знайдемо за формулою:

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}_Y} + 2,34 \quad (2.23)$$

Критерій Рейнольдса для газової фази в насадці:

$$\text{Re}_Y = \frac{\omega \cdot d_s \cdot \rho_g}{\varepsilon \cdot \mu_y} = \frac{1,19 \cdot 0,035 \cdot 1,29}{0,81 \cdot 0,021 \cdot 10^{-3}} = 2707. \quad (2.24)$$

Тоді:

$$\lambda = \frac{133}{2707} + 2,34 = 2,39.$$

Підставивши розрахункові значення, отримуємо:

$$\Delta P_c = 2,39 \cdot \frac{5,7}{0,035} \cdot \frac{1,19^2}{2} \cdot 1,29 = 308 \text{ Па};$$

$$\Delta P_a = 308 \cdot 10^{30 \cdot 27 \cdot 10^{-4}} = 371 \text{ Па}.$$

## 2.6 Вибір допоміжного обладнання

Здійснимо підбір вентилятора, що буде використовуватися для подачі газу для абсорбції. Газ подається в нижню частину абсорбера, з наступними технічними характеристиками: робоча витрата газу  $40,7 \text{ м}^3/\text{с}$ , температура газу  $75^\circ\text{C}$ , тиск  $0,17 \text{ МПа}$ .

Приймемо швидкість газу в трубопроводі  $\omega = 20 \text{ м/с}$ . Тоді внутрішній діаметр трубопроводу розрахуємо за наступною формулою:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega}}, \quad (2.25)$$

Підставивши отримаємо:

$$d = \sqrt{\frac{40,7}{0,785 \cdot 20}} = 1,6 \text{ м}.$$

Використаємо сталеву трубу із зовнішнім діаметром  $1620 \text{ мм}$ , товщиною  $10 \text{ мм}$ . Внутрішній діаметр труби  $d = 1,6 \text{ м}$ . Фактичну швидкість води в трубі розрахуємо за формулою:

$$\omega = \frac{V}{0,785 \cdot d^2}, \quad (2.26)$$

Підставивши отримаємо:

$$\omega = \frac{40,7}{0,785 \cdot 1,6^2} = 20,2 \text{ м/с}$$

Критерій Рейнольдса для потоку в трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (2.27)$$

де  $\mu = 0,021 \cdot 10^{-3}$  Па·с – в'язкість газу при температурі 75°C [1];

$\rho = 1,12 \text{ м}^3/\text{с}$  – густина газу.

Підставивши отримаємо:

$$\text{Re} = \frac{20,2 \cdot 1,6 \cdot 1,29}{0,021 \cdot 10^{-3}} = 1985371$$

Вважаємо, що труби знаходилися в експлуатації та мають невелику корозію. Абсолютна шорсткість при цьому  $\Delta = 1,5 \cdot 10^{-4}$  м.

Тоді  $\epsilon = \Delta/d = 1,5 \cdot 10^{-4} / 1,6 = 0,00009$ .

$$1/\epsilon = 11111; 10/\epsilon = 111111; 560/\epsilon = 622222$$

$11111 < \text{Re} < 622222$ , тобто в трубопроводі присутнє змішане тертя, і обчислення  $\lambda$  необхідно проводити за наступною формулою:

$$\lambda = 0,11(\epsilon + 68 / \text{Re})^{0,25}. \quad (2.28)$$

Підставивши отримаємо:

$$\lambda = 0,11 \cdot (0,00009 + 68 / 1985371)^{0,25} = 0,012.$$

Знаходимо суму коефіцієнтів місцевих опорів:

- 1) вхід в трубу (прийємо з гострими краями):  $\xi_1 = 0,5$ ;
- 2) відводи під кутом  $90^\circ$ :  $\xi_2 = 1,1$ ;
- 3) вихід з труби:  $\xi_3 = 1$ .

Суму коефіцієнтів місцевих опорів визначаємо:

$$\sum \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 = 0,5 + 2 \cdot 1,1 + 1 = 3,7. \quad (2.29)$$

Гідравлічний опір трубопроводу обчислимо за формулою:

$$\Delta p_{mp} = \left( \frac{\lambda \cdot l}{d} + \sum \xi \right) \cdot \frac{\rho \cdot \omega^2}{2}, \quad (2.30)$$

де  $l = 6$  м – довжина трубопроводу.

Визначимо гідравлічний опір трубопроводу:

$$\Delta p_{mp} = \left( \frac{0,012 \cdot 6}{1,6} + 3,7 \right) \cdot \frac{1,29 \cdot 20,2^2}{2} = 985,4 \text{ Па}$$

Визначимо надлишковий тиск, що повинен забезпечити вентилятор для подолання гідравлічного опору апарату і трубопроводу:

$$\Delta p = \Delta p_{тр} + \Delta p_a + (p_2 - p_1) + \Delta p_{нап}, \quad (2.31)$$



де  $\Delta p_{\text{тр}}$  – гідравлічний опір трубопроводу, Па;

$\Delta p_a$  – опір апарату, Па;

$\Delta p_{\text{нап}}$  – втрати напору по висоті, Па.

Опір апарату  $\Delta p_a = 371$  Па.

Втрати напору по висоті:

$$\Delta p_{\text{нап}} = \rho \cdot g \cdot h = 1,29 \cdot 9,81 \cdot 4 = 50,6 \text{ Па.}$$

Підставивши отримаємо:

$$\Delta p = 985,4 + 371 + 50,6 = 1407 \text{ Па.}$$

Корисна потужність вентилятору складе:

$$N_n = \frac{Q \cdot \Delta p}{1000 \cdot \eta_{\text{вент}} \cdot \eta_{\text{прив}}}, \quad (2.32)$$

де  $\eta_{\text{вент}} = 0,75$  – к.к.д. вентилятору;

$\eta_{\text{прив}} = 0,93$  – к.к.д. приводу.

Підставивши отримаємо:

$$N_n = \frac{40,7 \cdot 1407}{1000 \cdot 0,75 \cdot 0,93} = 82,1 \text{ кВт.}$$

Отриманим даним відповідає вентилятор Е1700-11-2 [4].

Кислоту в кількості  $G = 231,5$  кг/с слід охолодити від  $t_n = 70^\circ\text{C}$  до  $t_k = 55^\circ\text{C}$ .

Охолодження провести водою з  $t_{\text{нв}} = 20^\circ\text{C}$  і  $t_{\text{кв}} = 30^\circ\text{C}$ .

Обчислюємо теплове навантаження:

$$Q = G \cdot c_1 \cdot (t_n - t_k), \quad (2.33)$$

де  $c_1$  – теплоємність газової суміші,  $c_1 = 1,5$  кДж/(кг·К).

$$Q = 231,5 \cdot 1500 \cdot (70 - 55) = 5208750 \text{ Вт.}$$

Обчислимо кількість води необхідної для охолодження:

$$G_g = \frac{Q}{c_g \cdot (t_{кв} - t_{нв})}, \quad (2.34)$$

де  $c_g$  – теплоємність води,  $c_g = 4,19$  кДж/(кг·К).

$$G_B = \frac{5208750}{4190 \cdot (30 - 20)} = 124,3 \text{ кг/с.}$$

Середньологарифмічна різниця температур теплоносіїв становить:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_M}}, \quad (2.35)$$

де  $\Delta t_{\delta} = 70 - 30 = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta t_M = 55 - 20 = 35^{\circ}\text{C}$ .

Підставивши величини у формулу, отримаємо:

$$\Delta t_{CP} = \frac{40 - 35}{\ln \frac{40}{35}} = 37^{\circ}\text{C.}$$

Врахуємо, що орієнтовне значення  $Re_{op} = 15000$ , що відповідає розвиненому турбулентному режиму течії в трубах. Цей режим легко може бути досягнутий в теплообміннику, де кількість труб, які припадають на один перехід, дорівнює:

$$\frac{n}{z} = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot d \cdot \text{Re}_{op} \cdot \mu_1}, \quad (2.36)$$

Підставивши величини у формулу (2.36), отримаємо:

$$\frac{n}{z} = \frac{4 \cdot 231,5}{3,14 \cdot 0,021 \cdot 15000 \cdot 11 \cdot 10^{-3}} = 85$$

Прийmemo орієнтовне значення коефіцієнта теплопередачі, що відповідає турбулентному плинy:  $K_{op} = 800 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

Орієнтовне значення поверхні становить:

$$F_{op} = \frac{Q}{K_{op} \cdot \Delta t_{CP}} \quad (2.37)$$

Підставивши отримаємо:

$$F_{op} = \frac{5208750}{800 \cdot 37} = 176 \text{ м}^2.$$

Теплообмінники з близькою поверхнею характеризуються діаметром кожуха у діапазоні від 600 до 1000 міліметрів. Важливо зауважити, що тільки багатоходові апарати з числом ходів, яке дорівнює 4 ( $z=4$ ), дозволяють досягти співвідношення  $n/z$ , що приблизно дорівнює 85.

З метою визначення відповідної поправки для середньої різниці температур використовуємо наступну формулу за [4]:

$$P = \frac{30-20}{70-20} = 0,2; \quad R = \frac{70-55}{30-20} = 1,5$$

$$\varepsilon_{vt} = 0,98; \quad \Delta t_{cp} = 37 \cdot 0,98 = 36^\circ \text{C}$$

Тоді:

$$F_{op} = \frac{5208750}{800 \cdot 36} = 181 \text{ м}^2.$$

З таблиці [4] можна зробити висновок, що серед різних варіантів теплообмінників, доступних для вибору, найкращим варіантом є теплообмінник з трубами довжиною  $L = 6,0$  м і номінальною поверхнею  $F = 190,0 \text{ м}^2$ , діаметром кожуха  $D = 800$  мм,  $d_{mp}=25 \times 2$  мм,  $S=0,020 \text{ м}^2$ ,  $n = 404$  шт.,  $z = 4$  мають співвідношення  $n/z = 101$ .

Обчислимо запас поверхні:

$$\Delta = \frac{(190 - 181)}{181} \cdot 100 \% = 5\%.$$

## РОЗДІЛ 3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 3.1 Вибір конструкційних матеріалів [6, 9, 10]

При проектуванні устаткування для виробництва сірчаної кислоти виникає необхідність враховувати різноманітні види корозійного впливу, оскільки ця промисловість піддається впливу агресивних середовищ. Отже, важливим аспектом є вибір матеріалів для виготовлення обладнання, і цей процес потребує особливої уваги.

У сфері виробництва сірчаної кислоти, найчастіше вдаються до застосування нержавіючої сталі через її високу стійкість до корозії. Ця сталь здатна витримувати агресивне середовище, що характерне для цього виду виробництва. Таким чином, для елементів обладнання, які прямо контактують з агресивним середовищем (наприклад, корпус, кришка та днище абсорбера, розподільна система, включаючи «павуки», трубки та кронштейни для розподільної плити, решітка та штуцери), найкращим вибором буде нержавіюча сталь 12X18H10T. Цей матеріал є оптимальним завдяки поєднанню в ньому властивостей, таких як жаростійкість і корозійна стійкість.

Оскільки виробництво сірчаної кислоти супроводжується високою температурою всередині обладнання та високою концентрацією сірчаної кислоти, зокрема вище 80%, вибір сталі 12X18H10T на цих умовах є найбільш обґрунтованим і практичним.

Для виготовлення насадки, яка контактує з кислотою, використовується високо корозійностійка кераміка.

Щодо тих частин обладнання, які не перебувають у прямому контакті з кислотою, ми вибираємо наступні матеріали:

- Для виготовлення болтів, гайок і шайб застосовується сталь 35.
- Опори апарату виготовляються зі сталі Ст. 3сп.
- Для обтюрції використовується пароніт.

Важливо враховувати, що сірчана кислота проявляє значну агресивність до чистих металів, сталей і сплавів. Це вимагає використання у виготовленні обладнання для сірчано-кислотного виробництва полімерних матеріалів, які відповідають вимогам стійкості до кислоти. Серед таких матеріалів можна виділити кислотостійкі полімери на основі фенолоформальдегідних смол, рідке скло, матеріали на основі каучуків тощо [1].

Окрім цього, корпус сушильної башти, оскільки він зазнає впливу сірчаної кислоти, футеруємо кислотостійкою цеглою на силікатній замазці для забезпечення його довговічності та стійкості до агресивного середовища.

### 3.2 Розрахунки на міцність та стійкість [6]

Матеріал обичайки – 12X18H10T.

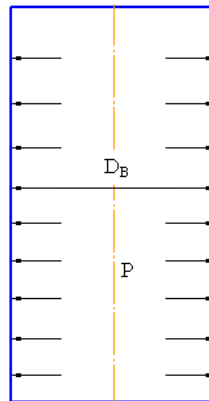


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема обичайки

Товщину стінки апарату для циліндричної обичайки розраховуємо за формулою:

$$S_p = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P} \\ \frac{P_u \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_u - P_u} \end{array} \right. \quad (3.1)$$

де  $P$  – розрахунковий тиск, МПа;

$P_u$  – пробний тиск, МПа;

$D_B$  – зовнішній діаметр, мм;

$[\delta]$  – нормативне допустиме напруження, МПа;

$\varphi$  – коефіцієнт міцності зварних з'єднань.

Визначаємо величину нормативного допустимого напруження для сталі 12Х18Н10Т при розрахунковій температурі  $t = 75^{\circ}C$  [6]:

$$[\sigma]^{75} = 140 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження при гідравлічних випробуваннях складе:

$$[\delta]_{II} = \frac{\delta_{T20}}{1,1}, \quad (3.2)$$

де  $\delta_{T20}$  – межа плинності матеріалу при температурі  $t = 20^{\circ}C$ .

$$[\delta]_{II} = \frac{240}{1,1} = 218 \text{ МПа.}$$

Пробний тиск при гідравлічних випробуваннях:

$$P_u = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,25 \cdot P \cdot \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^{75}} \\ P + 0,3 \end{array} \right\}, \quad (3.3)$$

$$P_u = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,25 \cdot 0,17 \cdot \frac{240}{140} \\ 0,17 + 0,3 \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} 0,36 \\ 0,47 \end{array} \right\} = 0,47 \text{ МПа.}$$

Тоді розрахункова товщина стінки циліндричної обичайки складе:

$$S_p = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,17 \cdot 6500}{2 \cdot 1 \cdot 140 - 0,17} \\ \frac{0,47 \cdot 6500}{2 \cdot 1 \cdot 218 - 0,47} \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 3,9 \\ 7,0 \end{array} \right\} = 7,0 \text{ мм.}$$

Виконавча товщина стінки циліндричної обичайки:

$$S = S_p + C_1 + C_2 + C_3 + C_4, \quad (3.4)$$

де  $C_1 = \Pi \cdot \tau$  – корозійна прибавка ( $\Pi$  – проникність матеріалу, мм на рік,  $\tau$  – термін служби апарату);  
 $C_2$  – прибавка на ерозію;  
 $C_3$  – технологічна прибавка;  
 $C_4$  – прибавка на мінусовій допуск.

Згідно рекомендацій [6]  $C_2=0$ ,  $C_3=0$ ,  $C_4=0$ ,  $\Pi=0,145$  мм/рік,  $\tau=10$  років.

$$C_1 = 0,145 \cdot 10 = 1,45.$$

Тоді

$$S = 7,0 + 1,45 = 8,45 \text{ мм.}$$

Дана товщина замала для габаритів і умов експлуатації відповідного апарату, з цієї причини, відповідно до рекомендацій [6], ми приймаємо значення виконавчої товщини стінки рівне  $S = 12 \text{ мм}$ .

Обчислимо товщину кришки апарату:

$$S_p^k = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P \cdot D}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P) \cdot \cos \alpha} \\ \frac{P_u \cdot D}{(2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_u - P_u) \cdot \cos \alpha} \end{array} \right\}, \quad (3.5)$$



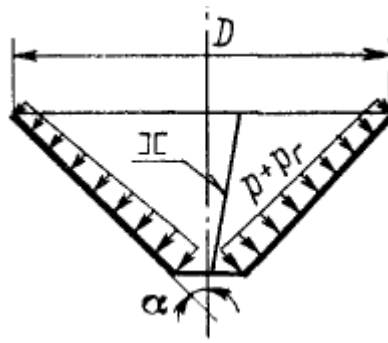


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема конічної кришки

$$S_p^k = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,17 \cdot 6500}{(2 \cdot 1 \cdot 140 - 0,17) \cdot \cos 45^\circ} \\ \frac{0,47 \cdot 6500}{(2 \cdot 1 \cdot 218 - 0,47) \cdot \cos 45^\circ} \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 5,58 \\ 9,92 \end{array} \right\} = 9,92 \text{ мм}$$

Виконавча товщина стінки конічної кришки:

$$S_k = S_k^p + C_1 + C_2 + C_3 + C_4, \quad (3.6)$$

$$S_k = 9,92 + 1,45 = 11,37 \text{ мм.}$$

Прийmemo  $S_k = 12 \text{ мм.}$

## РОЗДІЛ 4

### БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА

#### 4.1 Обґрунтування компоновки основного та допоміжного обладнання [11]

Обираємо варіант компоновки, який передбачає розміщення обладнання на відкритому майданчику. Це рішення виправдовується декількома перевагами, такими як зниження капітальних витрат на будівництво, зменшення загазованості, впливу теплових викидів, а також покращення умов роботи персоналу завдяки кращій вентиляції. Ми обрали цей варіант компоновки, враховуючи масопотоки (газові та рідинні), габаритні розміри різних типів обладнання та особливості технологічного обладнання, такі як вибухонебезпека, пожежонебезпека, токсичність та стійкість до навколишнього середовища.

При компоновці основного технологічного обладнання ми звертаємо особливу увагу на зручність обслуговування. Холодильники розміщуються позаду абсорбційної колони, а збірник кислоти розташований зліва. Вибір місця для їх установки базується на мінімізації довжини трубопроводів, легкості очищення та заміни теплообмінних труб.

Важке обладнання, таке як абсорбційна колона, монтується на нульовій позначці. Теплообмінники і збірники розташовуються на фундаментах.

Для забезпечення нормального перетікання продуктів відповідно до технологічної схеми ми дотримуємось вимог щодо висотного розміщення обладнання. Розміщення колон з урахуванням робочих тисків їхньої експлуатації і іншого устаткування вимагає точного планування.

Для забезпечення вільного стоку ухили трубопроводів становлять близько 3-5 градусів, а кути повороту трубопроводів становлять 90 градусів. Сходи обладнані поручнями для безпеки персоналу.

Вище другого поверху розташовують майданчики, які виготовлені з металоконструкцій і призначені для обслуговування колони. Між цими

майданцтками розміщується драбина, обладнана круглою огорожею для забезпечення безпеки персоналу.

Планування траси трубопроводу відповідає технологічній схемі та передбачає компенсацію температурних подовжень. При цьому розміщення трубопроводів і стаціонарних кріплень повинно забезпечувати достатню гнучкість, щоб уникнути перевищення допустимих напружень самокомпенсації, а також сил і моментів, що передаються трубопроводами на обладнання.

Під час проектування і монтажу необхідно дотримуватись наступних основних вимог для забезпечення мінімальних гідродинамічних втрат:

- Уникати надмірних поворотів на трасі трубопроводу.
- Спрямовувати трасу для скорочення її довжини і кількості кутів повороту.

- Розташовувати трійники так, щоб головний потік середовища проходив через них без зайвих поворотів.

- Уникати високого опору засувки (засувки з обмеженим проходом), а в разі необхідності встановлювати прямі ділянки труби перед і після таких засувок (перед засувкою - 10-12 діаметрів труби, після - не менше 5 діаметрів труби), щоб уникнути різкого підвищення гідродинамічних втрат.

- При великих швидкостях середовища в напірних патрубках насосів (які можуть сягати 5-7 м/с) встановлювати розширення після патрубка, а потім зворотний клапан і засувку.

- При розгалуженні трубопроводу на два меншого діаметру використовувати трійники з діаметром, що дорівнює діаметру труби, що підводять

Важливо також вибирати траси трубопроводів так, щоб уникнути створення зайвих нижніх і верхніх точок, які вимагали б влаштування дренажів та повітряників. Ухили трубопроводів слід розраховувати в напрямку руху пари і враховувати збільшення стріли прогину в прольотах через повзучість металу.

## **4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання [12, 13]**

Монтажні процеси є необхідною ланкою у загальному процесі будівництва підприємства або одного з його об'єктів в галузі хімічної промисловості. Цей процес виконується як частина будівництва нових об'єктів, так і в рамках реконструкції та ремонту існуючих. У випадках реконструкції та ремонту монтаж обладнання передує демонтажу існуючого.

Для здійснення монтажних операцій створюють спеціальні майданчики, обладнані вантажопідйомними механізмами і відповідними пристосуваннями. Це можуть бути канати, троси, стропи, блоки, поліспасти, різні талі, лебідки, а також важке вантажопідйомне обладнання. Такелажні засоби повинні бути легкими для виготовлення та транспортування, а також надійними та безпечними під час монтажу.

Апарати, які підлягають монтажу, мають бути максимально готовими до встановлення на монтажному майданчику. Якщо транспортування повністю складеного апарата неможливе, його розбирають на окремі блоки або деталі для подальшого збирання на місці. В усіх випадках завод-виробник перед відправленням на монтажну дільницю повинен виконати контрольну збірку апарата та позначити всі з'єднання складальними мітками.

Залежно від вантажопідйомності доступних підйомних механізмів на монтажному майданчику виконують збирання апарату з окремих деталей і блоків. У випадках, коли можливо підняти апарат на фундамент у зібраному стані, після монтажу на горизонтальному рівні встановлюють всі супутні металеві конструкції, такі як майданчики, сходи, а іноді й сходові клітини. Також проводять встановлення запірної арматури і систем трубопровідної обв'язки, а також наносять теплоізоляційне покриття. У деяких випадках для виконання цих завдань апарати піднімають і розміщують на спеціальних опорах або козлах, виготовлених із профільної сталі або труб.

Системи трубопровідної обв'язки та металоконструкції, які піднімаються разом з апаратом, повинні бути тісно і надійно з'єднані з ним. У випадках, коли

проект не передбачає таку жорсткість, під час монтажу використовують тимчасові кріплення, які потім знімають після встановлення апарату в плановане положення.

Згідно з інструкціями, підйом апарату на фундамент виконується після опресування і спуску обпресувальної рідини. При піднятті окремих блоків, в залежності від обраного методу монтажу, розробляється конкретна технологія виробництва робіт з метою максимальної оптимізації робочих процесів, які виконуються на висотних відмітках.

Ізольовані компоненти великогабаритного апарату транспортують на монтажний майданчик, розташований якнайближче до пункту призначення апарату, згідно проекту. Монтажний майданчик обладнують спеціальними стендами, кантувачами, зварювальними автоматами і т. д. Тут здійснюється процес збирання апарату з вже готових блоків або великих компонентів зі збору вузлів та деталей.

Важкі колонні апарати зазвичай складають в горизонтальному положенні. Для цього окремі блоки, що складаються з різних частин циліндра, розміщують на спеціальних стендах з обертовими катками, такими як рольганги, або на шпалах з обмежувальними кутами-упорами. Кількість опорних точок під кожною з'єднувальною частиною визначається залежно від маси та розміру апарату, і зазвичай відстань між опорами не перевищує 5 метрів.

Монтажні процедури включають в себе підтягування стикуючих частин апарату, яке виконується за допомогою трубоукладачів або тракторів. Для забезпечення точності співпадіння стиків по всьому периметру одну зі стикуючих частин об'єднують з восьмома або більше напрямними планками. Після прикріплення цих планок короткими зварними швами вони відділяються від апарату за допомогою газокисневої різки. Аналогічні напрямні планки використовуються і при складанні одного блоку на інший у вертикальному положенні (при монтажі блоками).

Під час стикання слід суворо дотримуватися заводських контрольних позначок, розташованих на корпусі, а також враховувати маркування на окремих деталях. Відхилення розмірів стикуючих ділянок повинні знаходитися

в межах припустимих норм: зміщення кромок у кільцевих швах не повинно перевищувати 10% товщини листа апарату, а в разі двошарової сталі - не більше товщини зовнішнього шару. Для досягнення точності стиків, таких як локальне підтягування, вирівнювання і позиціонування, використовують інструменти та пристосування, які зазвичай використовуються на машинобудівних заводах, такі як гвинтові струбцини та стяжні клини.

Під час зварювальних робіт особливу увагу приділяють зазорам, які мають залишатися в межах 2-4 мм, незалежно від товщини матеріалів, що з'єднуються. Зварювальні кромки ретельно очищаються металевими щітками. Зварювання виконується за допомогою електродів, які передбачені в проекті. Технологічні параметри зварювання, такі як метод і режими зварювання, послідовність накладання зварних швів і термообробка, вказані в проектній документації заводу-виробника. Ділянка, де проводяться зварювальні роботи, повинна бути захищена від атмосферних опадів та вітру, щоб запобігти забрудненню зварного шва. Рекомендується виконувати зварювальні роботи на роликовому стенді, на якому розташовують один або два зварювальних автомата. Для зварювання внутрішнього шва один автомат розміщується всередині апарату.

Після завершення зварювальних робіт проводиться остаточна перевірка всіх розмірів зібраного апарату, які повинні відповідати встановленим допустимим нормам. Зокрема, корпуси колонних апаратів повинні відповідати таким вимогам: відхилення довжини не повинно перевищувати 0,3% від проектною довжини; величина кривизни циліндричної поверхні на ділянці 1 метр повинна бути не більше 2 мм, а для апаратів з висотою, що перевищує 10 метрів – не більше 3 мм.

У процесі складання блоків на монтажному майданчику часто доводиться встановлювати або навіть повністю монтувати внутрішні пристрої апарату. Це вимагає підготовки внутрішньої поверхні приладу, включаючи очищення від сторонніх предметів і окалини. Далі апарат піднімають або обертають навколо своєї осі, таким чином розміщаючи його у такому положенні, яке спрощує

доступ всередину через люк і полегшує визначення основних розмірів для збирання.

Коли апарат готується до ремонту, перш за все, його відключають від газових магістралей та електромережі, і на місцях підключення встановлюють заглушки, відповідно до схеми, яка діє в цеху. Потім апарат продувають азотом до отримання прийнятних аналізів, що показують вміст горючих речовин (до 0,5%). Важливим етапом є демонтаж комунікацій, які входять в апарат, розрив фланцевих з'єднань та видалення всього допоміжного обладнання всередині колони.

Далі необхідно провести ретельний огляд корпусу колони з метою виявлення можливих дефектів, які могли виникнути в процесі експлуатації, таких як механічні пошкодження, тріщини або корозія. Особлива увага приділяється стану зварних швів і поверхонь ущільнювачів корпусу і кришки.

В разі суцільнозварних апаратів розглядається питання їхнього демонтажу лише для внутрішніх пристроїв абсорбера. Після підготовчих процедур, таких як пропарювання і промивання, відкривають люки апарату. Для полегшення роботи працівників, які займаються цим процесом, рекомендується встановлювати кришки люків на петлях.

Важливо відкривати люки у визначеній послідовності, починаючи з верхнього, коли колона перебуває під дією пари, щоб уникнути струму повітря через абсорбер при одночасному відкритті нижнього та верхнього люків.

Після пропарювання, апарат промивають водою і провітрюють. Провітрювання необхідне для охолодження апарату та зниження концентрації шкідливих газів і парів до прийнятних санітарних норм. Перед виконанням робіт всередині апарату, слід впевнитися, що аналізи свідчать про відповідність концентрації шкідливих речовин нормам безпеки.

Найчастіше корозія призводить до пошкодження днища апарату. Заміна частини корпусу, включаючи днище, може виконуватися без необхідності демонтажу самої колони. Для цього до верхньої частини абсорбера кріпиться опорний майданчик, під який піднімають абсорбер за допомогою домкратів.

Нижню частину колони відрізають, після чого піднесену верхню частину з'єднують із новою нижньою.

Процедура заміни днища сушильної башти є вельми відповідальною і вимагає виконання ряду розрахунків, створення технічної документації та дотримання додаткових заходів безпеки.

Ущільнюючі поверхні корпусів, кришок та ущільнювачів необхідно систематично перевіряти на якість поверхні, включаючи виявлення подряпин, слідів корозії та тріщин, а також точність геометричної форми.

Матеріал корпусу та кришки піддається хімічному аналізу для визначення вмісту вуглецю в металі, що може виникнути внаслідок водневої корозії. Проби для хімічного аналізу беруться з внутрішньої поверхні апарату, яка перед цим очищається від забруднень та корозійного нальоту. У випадку наявності зварних швів, проби беруться як з основного, так і з наплавленого металу в зоні з найвищою температурою (по три проби масою по 5 грамів кожна). Зміна твердості металу свідчить про структурні зміни, спричинені корозійним середовищем.

Завершальним етапом ремонту апарату є його випробування. При гідравлічному випробуванні колона заповнюється водою при відкритій повітрянці, яка розташована у верхній частині абсорбера. Поява води в повітрянці свідчить про те, що апарат заповнений. Після закриття повітрянки тиск у апараті повільно підвищується до контрольного значення. При цьому тиску апарат утримується протягом 5 хвилин, після чого тиск знижується до робочого значення, і проводиться обстеження зварних швів молотком і огляд корпусу апарату. У випадку пневматичного випробування, обстеження зварних швів не виконується.



## РОЗДІЛ 5

### АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

#### 5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу [14, 15]

Сушильно-абсорбційне відділення (рис. 5.1) включає чотири абсорбери насадкового типу, зрошуваних сірчаною кислотою різної концентрації. У сушильних вежах, а саме в перших двох апаратах позначених як 1 і 2, відбувається процес абсорбції води із сірчистого газу. Ця абсорбція призводить до природного зниження концентрації сірчаної кислоти.

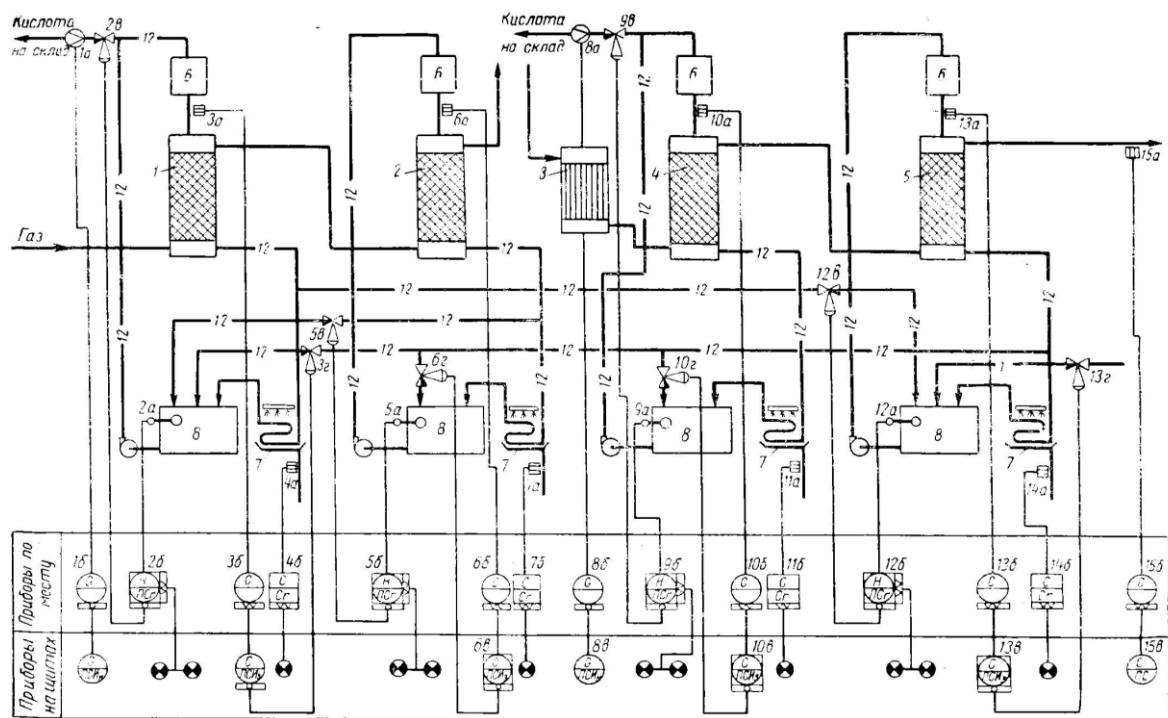


Рисунок 5.1 – Схема сушильно-абсорбційного відділення:

1, 2 – сушильні башти; 3 – теплообмінник; 4 – олеумний абсорбер; 5 – моногідратний абсорбер; 6 – напірні баки; 7 – зрошувальні холодильники; 8 – збірники

Для відновлення концентрації сірчаної кислоти в цих апаратах, ми подаємо більш концентровану кислоту, яка зберігається в спеціальних збірниках. Конкретно, до збірника першої сушильної камери ми постачаємо

кислоту із другої сушильної камери, а в збірник другої сушильної камери – із моногідратного абсорбера. Надлишок розведеної кислоти, який утворюється в першій сушильній камері, є цільовим продуктом, який може бути використаний для інших цілей. Газ, що виходить із другої сушильної камери, направляється в контактне відділення для подальшої обробки і використання.

Газ, який прореагував, надходить у теплообмінник під номером 3. У двох інших апаратах, а саме апаратах 4 і 5, з газового потоку абсорбується сірчаний ангідрид, що призводить до підвищення концентрації зрошуваних кислот. Щоб розбавити ці кислоти до потрібних концентрацій, до них додається вода. Вода подається в збірник моногідратного абсорбера під номером 5, а моногідрат подається до збірника олеумного абсорбера під номером 4. Надлишок олеуму, який утворюється, є готовим продуктом, який можна використовувати в інших процесах.

Основним фактором, що впливає на процес абсорбції і його ефективність у сушильно-абсорбційному відділенні, є концентрація зрошуваних кислот. Для кожного апарата в системі існує своє оптимальне значення цієї концентрації, яке потрібно дотримувати з великою точністю. Особливо високі вимоги ставляться до точності контролю концентрації зрошуваних кислот в першій сушильній башті і олеумному абсорбері, оскільки вони одночасно виробляють готові продукти.

Для регулювання концентрації зрошуваних кислот використовуються спеціальні системи автоматичного регулювання (САР). Датчики, які включають електрокондуктометричні концентратоміри, встановлені у всіх відповідних точках (позиції 3а, 3б, 6а, 6б, 10а, 10б, 13а та 13б) і вимірюють концентрацію. Регулятори концентрації (позиції 3в, 6в, 10в, 13в) впливають на відповідні регулюючі клапани (позиції 3г, 6г, 10г або 13г), які розташовані на лініях дозування кислоти або води до відповідних збірників. Об'єктом регулювання такого САР є збірник 8 циркуляційної кислоти, трубопровід, що з'єднує його з натискним баком 6, і сам цей бак.

Важливим параметром є динамічна характеристика цього процесу, яка характеризується часом запізнення, приблизно від 1,2 до 2 хвилин, і загальною

постійною часу близько 5 хвилин. Використання ПІ-регулятора дозволяє забезпечити точність контролю концентрації сірчаної кислоти в межах 0,1–0,2 %. Для підтримки матеріального балансу в системі і перерозподілу матеріальних потоків кислоти, використовуються регуляційні пристрої, які впливають на рівень рідини у відповідних збірниках. У збірниках першої сушильної камери і олеумного абсорбера, рівень регулюється шляхом регулювання кількості готового продукту, який береться з цих апаратів (позиції 2а, 2б, 2н і 9а, 9б, 9в). Рівень у збірнику другої сушильної камери регулюється за допомогою зміни обсягу кислоти, яка витікає з апарата на вихід до збірника першої сушильної камери (позиції 5а, 5б, 5е). Рівень у збірнику моногідратного абсорбера регулюється зміною кількості кислоти, яка подається з першої сушильної камери до цього збірника (позиції 12а, 12б, 12п).

Крім обов'язкових вимірювань концентрації кислот і рівнів у збірниках, автоматизована система сушильно-абсорбційного відділення включає в себе декілька важливих функцій для оптимальної роботи процесу. До них належать:

- Контроль тиску газу: на вході та виході з усіх абсорбційних колон (не представлені на схемі), обов'язково контролюються тиски газу. Це важливо для забезпечення стабільності процесу.

- Контроль температури: температура кислот на вході та виході з зрошувальних холодильників також має велике значення (не представлені на схемі). Це може впливати на ефективність абсорбції і потребує постійного моніторингу.

- Контроль витрати та кількості продукційної кислоти (поз. 1а, 1б, 1в і 8а, 8б, 8в): кількість продукційної кислоти, яка виходить з першої сушильної камери та олеуму з олеумного абсорбера, важливо контролювати, оскільки ці продукти використовуються на складі для подальшого використання.

- Контроль концентрації туману сірчаної кислоти (поз. 15а, 15б, 15в): для ефективного видалення сірчаного ангідриду з відпрацьованих газів у моногідратному абсорбері, концентрацію туману сірчаної кислоти необхідно контролювати за допомогою спеціального туманоміра типу АФТ.

- Контроль і сигналізація кислотності води в піддоні зрошувальних холодильників 7 (поз. 4а, 4б, 7а, 7б, 11а, 11б; 14а, 14б) здійснюваний за допомогою електрокондуктометричних сигналізаторів типу СК-5. Це важливо для запобігання корозії та забезпечення безпечної експлуатації.

Основні етапи процесу включають:

1. Система подачі повітря. Атмосферне повітря подається в сушильну башту за допомогою нагнітача через трубопровід. Це може бути необхідно для забезпечення окремого виду абсорбційного процесу чи для інших технологічних вимог.

2. Регулювання витрати газової суміші і абсорбенту. Для забезпечення встановленої продуктивності системи важливо регулювати витрату газової суміші та абсорбенту. Це може виконуватися за допомогою відповідних регуляторів або клапанів.

3. Контроль параметрів. Параметри тиску та температури газу контролюються на вході та виході з сушильної камери. Це дозволяє підтримувати оптимальні умови для процесу абсорбції.

4. Регулювання тиску в апараті. Тиск в самому апараті регулюється для забезпечення оптимальних умов абсорбційного процесу. Збереження цих параметрів в межах технологічних норм є важливим для ефективності та безпеки процесу.

Для оптимізації і контролю за процесом також використовуються автоматизовані системи управління та моніторингу.

Для забезпечення матеріального балансу в газовій фазі, тиск у верхній частині колони регулюється. Також важливо контролювати рівень абсорбенту в нижній частині колони, щоб уникнути переливання або повного виливу абсорбенту. На виході з башти виконується контроль кількості кислоти, яка подається в збірник для оцінки продуктивності апарату.

У збірниках важливо підтримувати потрібний температурний режим, оскільки кислота, яка подається наступним етапом, використовується як абсорбент. Контроль за температурою здійснюється за допомогою спеціальних пристроїв, а також регуляційних систем.

Крім того, контролюється концентрація кислоти в трубопроводі та на виході зі збірника, щоб визначити необхідну концентрацію абсорбента для процесу абсорбції.

## **5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання [15]**

Для охолодження кислоти, яка подається для абсорбції, використовуються два кожухотрубних холодильники. З метою забезпечення необхідної температури кислоти встановлюються контрольні прилади та системи регулювання.

Під час вибору автоматизаційних приладів варто керуватися принципом використання тих, що вже успішно випускаються серійно і мають відмінні рекомендації в практичному застосуванні. Деякі переваги можуть бути віддані тим приладам, які доступні для виробництва або закупівлі на території України.

Перший крок у виборі приладів – визначення необхідного діапазону вимірювань. Враховуючи особливості даного виробництва, доцільним може бути застосування пневматичних приладів з огляду на пожежонебезпеку.

Для досягнення кращого контролю та регулювання процесу, ми вирішили використовувати наступні прилади:

**Автоматичний контроль температури.** Для цієї задачі було обрано сімейство вимірювальних перетворювачів температури від фірми SIEMENS. Серія SITRANS T пропонує різні типи термоперетворювачів, включаючи термоперетворювачі опору і термопари, які дозволяють якісно вимірювати температуру в найрізноманітніших умовах, включаючи екстремальні. Ці датчики застосовуються в різних галузях промисловості, таких як хімічна, фармацевтична, харчова, енергетична тощо.

Деякі варіанти термометрів мають цифровий дисплей для зручного відображення значень температури. Крім того, доступні вибухозахищені версії цих датчиків для використання в потенційно небезпечних умовах.

Перетворювач SITRANS T серії TW – це універсальний перетворювач має вихідний сигнал 4-20 мА + HART і може бути програмований за допомогою комп'ютера для налаштування робочих параметрів.

**Автоматичний контроль витрати.** В сфері точного і надійного вимірювання витрати різних середовищ, варто звернути увагу на сімейство витратомірів SITRANS F, яке є ефективним рішенням для широкого спектру вимірювань витрати. Перетворювач SITRANS F, і зокрема серія M Magflo, використовує магнітоіндукційну технологію для точного вимірювання витрати рідин і суспензій, навіть тих, які мають провідність.

**Автоматичний контроль рівня.** Для контролю рівня різних типів рідин і сипких матеріалів, варто звернути увагу на рівнеміри з сімейства SITRANS L від SIEMENS. Ця гама пропонує рішення для різних завдань контролю рівня, дозволяючи виявляти рівень у широкому спектрі середовищ. Один із універсальних сигналізаторів граничного рівня, Pointek CLS 200, відзначається високою хімічною стійкістю, роблячи його ідеальним вибором для специфічних умов.

**Автоматичний контроль тиску.** Для вимірювання різних параметрів тиску в рідких, газо- і пароподібних середовищах, а також для вимірювання гідростатичного рівня рідини в ємностях, використовується сімейство вимірювальних перетворювачів SITRANS P. Зокрема, перетворювач SITRANS P серії ZD дозволяє точно виміряти надлишковий та абсолютний тиск і обладнаний цифровим індикатором для зручного відображення даних.

## РОЗДІЛ 6

### ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

#### 6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів [17]

Виробництво сірчаної кислоти – це складний технологічний процес, який вимагає використання різних видів електричного обладнання. Більше того, цей вид виробництва прямо пов'язаний зі шкідливими хімічними речовинами, що створює серйозну загрозу для безпеки. Якщо технологічний процес відхиляється від встановлених норм, це може викликати порушення техніки безпеки та призвести до нещасних випадків.

1. **Комкова сірка (S)** – це речовина є твердою і пиловидною, належить до III класу небезпеки, її граничнодопустима концентрація (ГДК) становить 6 мг/м<sup>3</sup>. Тонкоподрібнена сірка має тенденцію до самозаймання в присутності вологи, контакту з окислювачами, а також при змішуванні з вугіллям, жирами та маслами. Крім того, сірка може утворювати вибухонебезпечні суміші з нітратами, хлоратами і перхлоратами, і вона самозаймається при контакті з хлорним вапном. Для гасіння вогню, спричиненого сіркою, рекомендовано використовувати розпорошену воду і повітряно-механічну піну. Важливо зауважити, що пил сірки відноситься до вибухонебезпечних речовин, але для спричинення вибуху потрібна висока концентрація пилу, приблизно 20 г/м<sup>3</sup> (20000 мг/м<sup>3</sup>). Пари сірки утворюють вибухову суміш з повітрям.

Горіння сірки відбувається тільки в розплавленому стані, аналогічно горінню рідин. Під час горіння верхній шар палаючої сірки кипить і утворює пари, які створюють полум'я заввишки до 5 см. Температура полум'я при горінні сірки становить 1820°C. Оскільки повітря складається переважно із 21% кисню і 79% азоту за об'ємом, і під час горіння сірки один об'єм кисню видає один об'єм SO<sub>2</sub>, максимальний теоретично можливий вміст SO<sub>2</sub> у газовій суміші становить 21%. Проте на практиці горіння відбувається із певним надлишком повітря, і об'ємний вміст SO<sub>2</sub> у газовій суміші зазвичай менший, зазвичай становить 14–15%.

Виявлення пожежі, спричиненої горінням сірки, є завданням, яке створює значні труднощі для систем пожежної автоматики. Виявити полум'я сірки за допомогою звичайного спостереження людським оком або за допомогою відеокамери є складним завданням, оскільки спектральні характеристики блакитного полум'я сірки переважно лежать в ультрафіолетовому діапазоні, який є невидимим для більшості спостерігачів.

Також, полум'я сірки не випромінює значну кількість теплового випромінювання, як це роблять інші речовини під час горіння. Це означає, що температура полум'я сірки може бути нижчою, ніж температура інших пожежонебезпечних речовин.

Для ефективного виявлення полум'я сірки необхідно розміщувати теплові сповіщувачі надзвичайно близько до джерела сірки. Звичайні інфрачервоні сповіщувачі, які виявляють пожежі за тепловиділенням, не будуть працювати для виявлення полум'я сірки, оскільки спектральні характеристики цього полум'я не включають інфрачервоний діапазон.

Також важливо відзначити, що полум'я сірки не виділяє пари води, і, отже, інфрачервоні детектори, які реагують на вологість, також не здатні виявити його. Для ефективного виявлення полум'я сірки рекомендується використовувати ультрафіолетові сповіщувачі з детекторами, які виготовлені на основі молибдену. Ці детектори мають спектральний діапазон чутливості від 1850 до 2650 ангстрем, що є ідеальним для ефективного виявлення полум'я сірки в умовах, коли інші типи детекторів можуть бути неефективними.

Для дотримання вимог пожежної безпеки на сховищах сірки необхідно вживати наступні заходи:

- Регулярно очищати конструкції та технологічне устаткування від пилу, оскільки сірка може накопичуватися у вигляді пилу і становити пожежну загрозу.

- Забезпечувати постійну природну вентиляцію приміщень сховища, особливо при відкритих дверях, щоб уникнути накопичення можливих газових викидів та забезпечити належний обмін повітрям.

- Дробити грудки сірки на решітці бункера, використовуючи дерев'яні



кувалди або інструменти, що не видають іскри, оскільки сірка може бути чутливою до спалаху при зіткненні з іскрами.

- Забезпечувати конвеєри для подачі сірки в виробничі приміщення металопідіймаючими, які можуть виявляти металеві предмети, що потрапили в сипучий матеріал.

- Встановлювати пристрої, такі як бортики та пороги з пандусом, що можуть запобігти розливанню розплаву сірки за межі приміщення або відкритого майданчика в аварійних ситуаціях.

Заборонено проводити такі дії на складах сірки:

- використовувати відкритий вогонь для виконання будь-яких видів робіт.
- зберігати промаслені ганчір'я на сховищах сірки.
- використовувати інструмент, який містить іскри, під час ремонтних робіт.

Важливо враховувати, що контакт з пилом сірки може бути шкідливим для здоров'я людини, викликаючи подразнення слизових оболонок очей і дихальних шляхів, а також може призвести до захворювань шлунково-кишкового тракту та роздратування шкіри. Тому важливо обладнувати робочі приміщення та лабораторії, де проводяться роботи з технічною сіркою, припливно-витяжною механічною вентиляцією, яка забезпечить дотримання безпечних концентрацій шкідливих речовин в повітрі робочої зони.

**2. Рідка сірка (S)** – це речовина третього класу небезпеки. Рідка сірка є токсичною речовиною, і при її зливанні, наливанні та зберіганні утворюються пари органічних речовин, пари сірки та сірководню, які можуть викликати отруєння.

**3. Сірководень (H<sub>2</sub>S)** – це пароподібна речовина третього класу небезпеки; ГДК – 10 мг/м<sup>3</sup>. Сірководень є отруйним, горючим і вибухонебезпечним газом у суміші з киснем та повітрям. При вдиханні повітря, забрудненого сірководнем, можуть виникати нудота, запаморочення та головний біль. Висока концентрація сірководню може спричинити блювоту та утруднений дихання, і, в окремих випадках, призвести до смертельних наслідків. У разі отруєння сірководнем потерпілого необхідно вивести на свіже повітря і негайно викликати лікаря.

4. **Сода кальцинована ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )** – це тверда (пиловидна) речовина третього класу небезпеки; ГДК –  $2,0 \text{ мг/м}^3$ . Вдихання пилу соди може викликати подразнення дихальних шляхів, кон'юнктивіт, захворювання шлунково-кишкового тракту та виразки на слизовій оболонці носа. Довготривале контактування з розчинами соди, особливо гарячими, може призводити до розвитку екземи.

5. **Сірчистий ангідрид ( $\text{SO}_2$ )** – це пароподібна речовина третього класу небезпеки; ГДК –  $10 \text{ мг/м}^3$ . Цей безбарвний газ має різкий запах сірки. Його густина вища за густину повітря і становить  $2,264 \text{ г/л}$ . Сірчистий ангідрид може подразнювати верхні та, при значних концентраціях, нижні дихальні шляхи. Межа сприйняття запаху становить  $0,006 \text{ мг/л}$ , і при цій концентрації спостерігається подразнення очей. Концентрація  $0,05 \text{ мг/л}$  викликає подразнення горла, а кашель спостерігається при концентраціях  $0,02\text{--}0,03 \text{ мг/л}$ . Продовжене вдихання повітря, в якому концентрація сірчистого ангідриду перевищує ГДК, може спричинити хронічні запальні процеси дихальних шляхів, шлунка, кон'юнктивіту очей і пошкодження зубів. Дуже великі концентрації можуть призвести до задишки, синюшності слизових оболонок шкіри і навіть втрати свідомості. У випадку аварійного викиду сірчистого ангідриду необхідно використовувати фільтруючий протигаз. При отруєнні сірчистим ангідридом потерпілого слід негайно вивести на свіже повітря, надавши першу допомогу, напоїти слабким розчином соди, а важких випадках провести штучне дихання і негайно звернутися до лікаря.

6. **Сірчаний ангідрид ( $\text{SO}_3$ )** – це пароподібна речовина другого класу небезпеки; ГДК –  $1 \text{ мг/м}^3$ . Цей безбарвний газ негайно реагує з водяними пари, утворюючи туман із сірчаної кислоти. Контакт з слизовими оболонками верхніх дихальних шляхів може призводити до подразнення та почервоніння. Великі концентрації сірчаного ангідриду можуть викликати сильний кашель та запалення верхніх дихальних шляхів. Для захисту дихальних шляхів та очей від сірчаного ангідриду використовуються промислові фільтруючі протигази, такі як марки В (коробка пофарбована в жовтий колір), Е (чорний), БКФ і МКФ (захисний), а також респіратори протигазові РПГ-67-В і універсальні РУ-60М-В, РУ -60МУ-В, а також цивільні протигази, наприклад ГП-5, ГП-7 та дитячі.

**7. Аміачна вода** (розчин синтетичного аміаку в воді, **NH<sub>3</sub>** не менше 25%) – це рідина четвертого класу небезпеки; ГДК – 20 мг/м<sup>3</sup>. Ця безбарвна і прозора рідина має гострий запах. При контакті зі шкірою вона може викликати почервоніння, а при попаданні в очі - повну втрату зору. При розливанні аміачної води може створюватися значна концентрація аміаку в повітрі, що становить загрозу для оточуючого середовища. Аміак є токсичною речовиною, яка подразнює слизові оболонки. Великі концентрації можуть спричинити сильне слезовиділення та біль в очах, а також призвести до удушення, сильного кашлю, запаморочення та болю у шлунку. Для захисту від аміачної води рекомендується вживати засоби індивідуального захисту, такі як захисні маски, шкіряні рукавиці та засоби захисту для очей.

**8. Сірчана кислота (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>)** – ця рідина відноситься до першого класу небезпеки; ГДК – 1 мг/м<sup>3</sup>. Важливо відзначити, що пари цієї кислоти є токсичними, а контакт з кислотою на тілі може призвести до сильних опіків. При значних пошкодженнях шкіри може виникнути навіть загроза життю, а контакт з очима може призвести до повної втрати зору.

Задля уникнення небезпек важливо дотримуватися наступних правил:

- Всі працівники повинні бути обладнані спецодягом, який відповідає встановленим нормам, а також захисним обладнанням, таким як захисні окуляри, гумові рукавички та протигази.

- На всіх фланцевих з'єднаннях необхідно встановлювати фланцеві кожухи, щоб попередити можливі витіки або розливання кислоти.

- Рухомі частини обладнання, які обслуговують майданчики та переходи, повинні бути обгороджені, а сходи повинні мати перила для забезпечення безпеки персоналу.

- Заборонено проводити ремонт обладнання на ходу, що може призвести до небезпеки для працівників.

- Огляд кислотопроводів, а також апаратів і збірників із кислотою, повинен виконуватися працівниками, які одягнуті в захисні окуляри і гумові рукавички.

- При виділенні шкідливих газів в приміщенні необхідно негайно надягати протигаз для захисту дихальних шляхів.

- Задача обладнання на ремонт і його приймання після ремонту повинно проводитися відповідно до встановлених інструкцій і процедур.

- Пуск устаткування в роботу дозволяється тільки за допомогою майстра зміни.

- Заборонено вводити в експлуатацію устаткування, яке не обладнано необхідними огорожами та контрольно-вимірювальними приладами, що забезпечують безпеку під час його обслуговування.

## 6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора

У сушильно-абсорбційному відділенні газова суміш, що нагнітається вентиляторами в абсорбери, знаходиться під тиском, тому через нещільності вентиляторів, з'єднань і засувок трубопроводів, змішувачів можливе виділення оксидів азоту, сірчаного і сірчистого ангідриду в робочі приміщення. При зберіганні сірчаної кислоти в збірниках можливе виділення парів сірчаної кислоти. Розрахунок вентиляції зводиться до визначення необхідної кількості вентиляційного повітря  $L$  для того, щоб розбавити шкідливі виділення до значень, що не перевищують гранично допустимих концентрацій.

Вихідні дані:

– кількість шкідливих виділень, що надходять в приміщення: сірчаного ангідриду  $G_1 = 24$  г/год.; сірчистого ангідриду  $G_2 = 42$  г/год.; парів сірчаної кислоти  $G_3 = 17$  г/год.;

– загальний обсяг сушильно-абсорбційного відділення  $V = 6000$  м<sup>3</sup>;

– кількість тепла, що надходить в приміщення  $Q_{надх} = 113$  кДж/с;

– концентрація шкідливих виділень в приміщенні: сірчаного ангідриду  $C_1 = ГДК_1 = 1$  мг/м<sup>3</sup>; сірчистого ангідриду  $C_2 = ГДК_2 = 10$  мг/м<sup>3</sup>; парів сірчаної кислоти  $C_3 = ГДК_3 = 1$  мг/м<sup>3</sup>;

– теплоємність і густина повітря  $c = 1,01 \frac{кДж}{кг \cdot K}$ ,  $\rho = 1,29 \frac{кг}{м^3}$ ;

– температура повітря, що приходить  $t_{прих} = 12^\circ C$ ;

– температура повітря, що викидається  $t_{вик} = 25^\circ C$ .

Кількість повітря, необхідного для розчинення шкідливих виділень, визначається за формулою:

$$L = \frac{G}{(C - C_n)} = \frac{G}{ГДК}$$

$$L_1 = \frac{G_1}{ГДК_1} = \frac{24}{1 \cdot 10^{-3}} = 24000 \frac{м^3}{год.};$$

$$L_2 = \frac{G_2}{ГДК_2} = \frac{42}{10 \cdot 10^{-3}} = 4200 \frac{м^3}{год.};$$

$$L_3 = \frac{G_3}{ГДК_3} = \frac{17}{1 \cdot 10^{-3}} = 17000 \frac{м^3}{год.}.$$

Оскільки сірчаний і сірчистий ангідрид відносяться до шкідливих речовин, що характеризуються сумациєю шкідливої дії [10], то сумарний повітрообмін буде дорівнювати:

$$L = L_1 + L_2 = 28200 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Кратність повітрообміну складе:

$$n = \frac{L}{V} = \frac{28200}{6000} = 4,7 \text{ год.}^{-1}$$

Повітрообмін для видалення надлишкового тепла визначаємо за формулою:

$$L' = \frac{Q_{надх}}{c \cdot \rho \cdot (t_{вук} - t_{прив})} = \frac{113}{1,01 \cdot 1,29 \cdot (25 - 12)} = 24012 \frac{м^3}{год.} = 6,67 \frac{м^3}{с}$$

Кратність повітрообміну дорівнює:

$$n = \frac{L}{V} = \frac{24012}{6000} = 4 \text{ год.}^{-1}$$

Максимальна шкідливість по шкідливим речовинам, оскільки кратність повітрообміну при цьому становить  $4,7 \text{ год.}^{-1}$ , що більше  $4 \text{ год.}^{-1}$  при теплонадлишках. У зв'язку із цим в цеху передбачена не тільки природна вентиляція (через дверні та віконні прорізи), але і вентиляція за допомогою приточно-витяжних систем (промислова приточно-витяжна вентиляційна установка з номінальною об'ємною витратою (подачею) повітря  $L = 30000 \text{ м}^3/\text{год.}$ ) кратністю повітрообміну  $n = 5$ .

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Електронний підручник з виробництва сірчаної кислоти контактним способом [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://jak.koshachek.com/articles/elektronnij-pidruchnik-z-nictvo-sirchanoi-kisloti.html>
2. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи / укладачі: В. І. Склабінський, Я. Е. Михайловський, Р. О. Острога, М. С. Скиданенко. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 52 с.
3. Васильев Б. Т. Технология серной кислоты / Б. Т. Васильев, М. И. Отвагина. – Москва : Химия, 1985. – 384 с.
4. Процеси та обладнання хімічних технологій. Базові принципи теорії тепломасообміну: практикум з кредитного модуля : навч. посіб. / уклад.: С.В. Гулієнко, Я.В. Грובовенко. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 120 с.
5. Теплові й масообмінні процеси та обладнання хімічних і нафтогазопереробних виробництв у системах "газ (пара) – рідина" : підручник / Я.Е. Михайловський, А.Є. Артюхов, М.П. Юхименко, Н.О. Артюхова ; за заг. ред. Я.Е. Михайловського. – Суми : СумДУ, 2021. – 391 с.
6. Конструювання і розрахунок елементів тонкостінних посудин та апаратів, які знаходяться під зовнішніми навантаженнями: навч. посіб. для студ. / І.А. Андреев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ: КПІ, 2018. – 121 с.
7. Врагов А.П. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв : навчальний посібник / А.П. Врагов, Я.Е. Михайловський, С.І. Якушко. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 170 с.
8. Тютюнников А. Б. Контактні елементи масообмінних колон : Навчальний посібник / А. Б. Тютюнников, Л. Л. Товажнянський, А. П. Готлинська. – Київ : ІСДО, 1993. – 440 с.

9. Андреев, І. Роз'ємні міцно-щільні з'єднання: навчальний посібник для студентів спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / Ігор Андреев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 138 с.
10. Розрахунок колонних апаратів на міцність і стійкість: навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / І. А. Андреев; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 112 с.
11. Методичні вказівки до вивчення дисципліни «Проектування хімічних підприємств та основи САПР» для студентів спеціальності «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» / Укладачі О. О. Ляпощенко, В. М. Маренок. – Суми : Вид-во СумДУ, 2007. – 80 с.
12. Обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів : Навчальний посібник / А.І. Дубинін, В.М. Атаманюк, В.П. Дулеба, Д.М. Симака. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 292 с.
13. Обладнання заготівельних та котельно-зварювальних ділянок ремонтно-механічних цехів хімічних виробництв : навч. посіб. / С.М. Яхненко, М.С. Скиданенко, Є.М. Піддубний. – Суми : СумДУ, 2022. – 170 с.
14. САПР технологічних ліній та комплексів хімічних і нафтогазопереробних виробництв / О. О. Ляпощенко, О. Є. Старинський // Дистанційний курс. – Суми : СумДУ, 2020. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://elearning.sumdu.edu.ua/s/4b-z0x>
15. Промислові прилади та засоби автоматизації: Довідник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безповська, В.А. Бек та ін.. Київ : Вид-во «Віста», 2017. – 847 с.
16. Виготовлення обладнання хімічних виробництв : підруч. [для студ. закл. вищ. освіти]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 233 с.
17. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний, Д.В. Зеркалов, Р.В. Сабарно, О.І. Полукаров, В.С. Коз'яков, Л.О. Мітюк. За ред. К.Н. Ткачука і М.О. Халімовського. – Київ : Основа, 2006. – 448 с.