

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри

підпис, дата

Кваліфікаційна робота магістра

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

Тема роботи: Абсорбційне відділення у виробництві
вінілхлориду. Розробити та модернізувати абсорбційну
колону для поглинання дихлоретану із абгазів

Виконав:

студент групи ХМ.м-21/2

Гребенік Артем Євгенович

підпис

Залікова книжка

№ _____

Кваліфікаційна робота магістра
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою _____

" ____ " _____ 20 ____ р.

Підпис голови

(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Михайловський Я.Е.

підпис, дата

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	6
1.1 Аналіз методів виробництва дихлоретану	6
1.2 Технологічні особливості абсорбційних процесів	10
1.3 Застосування клапанних тарілок як спосіб модернізації абсорбера	13
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	15
2.1 Опис технологічної схеми виробництва вінілхлориду	15
2.2 Характеристика та вимоги до сировини та кінцевої продукції	18
2.3 Опис конструкції проектованого апарата	21
2.4 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата	25
2.5 Гідравлічні розрахунки	35
2.6 Вибір допоміжного обладнання	37
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	44
3.1 Вибір конструкційних матеріалів	44
3.2 Розрахунки на міцність та стійкість	47
4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА	71
4.1 Обґрунтування компоновки основного та допоміжного обладнання	71
4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання	74
5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	81
5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу	81
5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання	82

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ	85
6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів	85
6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора	88
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	92
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Виробництво вінілхлориду (ПВХ) є складним хімічним процесом, який включає кілька стадій і вимагає спеціалізованого обладнання. ПВХ є одним з найважливіших полімерів у світі і знаходить широке застосування в різних сферах, таких як будівництво, автомобільна промисловість, медицина, електротехніка та інші [1].

Основним сировинним матеріалом для виробництва ПВХ є етилен, який отримують з нафтового або вугільного газів. Основний процес виробництва ПВХ включає такі стадії [2]:

1. Отримання вінілхлориду. Етилен реагує з хлором у присутності каталізаторів для утворення вінілхлориду. Цей процес може мати кілька етапів, і реакція зазвичай відбувається при високих температурах.

2. Полімеризація вінілхлориду. Вінілхлорид переходить у полімерний стан через полімеризацію. Цей процес може відбуватися за різними методами, такими як полімеризація у масі або полімеризація у розчиннику.

3. Модифікація ПВХ. Додавання різних добавок для покращення властивостей ПВХ. Це може включати стабілізатори, пластифікатори, наповнювачі та інші добавки.

4. Формування виробу. Полімерний матеріал переходить у виріб через екструзію, пресування або інші технології формування.

5. Обробка та фінішна обробка. Виріб може піддаватися додатковій обробці, такій як різання, фарбування або інші завершальні операції.

Важливо відзначити, що виробництво ПВХ пов'язане з питаннями стосовно впливу на довкілля та безпеки, оскільки деякі стадії процесу можуть випускати небезпечні речовини. Таким чином, у виробництві ПВХ часто вживаються заходи для зменшення викидів та мінімізації впливу на навколишнє середовище [1, 2].

Саме тому абсорбційне відділення відіграє ключову роль у виробництві вінілхлориду (ПВХ), особливо на етапі отримання вінілхлориду з етилену та хлору. Цей процес є частиною важливого етапу, відомого як «хлорування», і полягає в реакції етилену з хлором за участю каталізаторів.

Основне призначення абсорбційного відділення полягає в тому, щоб поглинути хлор і відділяти його від решти суміші, утвореної під час реакції. Це досягається шляхом введення хлору в реакційний потік і піддавання його абсорбції в спеціальному апараті, який наповнений абсорбентом.

Використання абсорбційного відділення дозволяє покращити ефективність хлорування та отримання чистого вінілхлориду, що є ключовим кроком у виробництві ПВХ.

Таким чином, метою даного кваліфікаційного проекту є теоретичне обстеження абсорбційного відділення у виробництві вінілхлориду, а також отримання навичок щодо проектування та модернізації абсорбційної колони для поглинання дихлоретану із абгазів [3].

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Аналіз методів виробництва дихлоретану [1, 2, 4, 5]

Виробництво дихлоретану тісно пов'язане з вінілхлоридом, тому сучасні варіанти отримання вінілхлориду містять технологічні схеми отримання дихлоретану, як напівпродукту для переробки у вінілхлорид. Із вінілхлориду отримують полівінілхлорид, що займає за обсягом випуску друге місце після поліетилену серед полімерних матеріалів.

Загалом, дихлоретан або, як його ще називають, 1,2-дихлоретан ($C_2H_4Cl_2$) – це хімічна безбарвна летюча рідина із солодкуватим запахом. Дихлоретан змішується в усіх відношеннях зі спиртами, бензолом, ацетоном та іншими органічними сполуками. Він знаходить широке застосування в різних галузях промисловості у якості розчинника: для очищення нафтопродуктів від парафінів, для екстрагування жирів, для знежирення вовни, хутра, а також для очищення металевих виробів перед хромуванням або нікелюванням.

Виробництво дихлоретану є одним з найважливіших факторів у виробничому ланцюжку отримання полімерів, кінцева мета якого отримання полімерних і синтетичних матеріалів (пластмас), без яких не можна уявити життя сучасного суспільства.

Усі процеси хлорування можна підрозділити на дві основні групи: рідиннофазні і газофазні. Переваги перших полягають у застосуванні помірних температур (до 100–120°C) і легкості відведення тепла завдяки високим коефіцієнтам тепловіддачі від рідини до стінки.

З метою зменшення негативного впливу на довкілля та дотримання стандартів викидів, застосовуються різні методи очищення абгазів від дихлоретану.

1. Споживання дихлоретану у реакціях:

- каталітичне згоряння (безпосереднє згоряння) – дихлоретан може бути знищений шляхом згоряння у спеціальних каталітичних системах, де

відбувається окиснення до безшкідливих продуктів, таких як вуглекислий газ та вода;

- каталітичне згоряння з використанням кисню – цей метод використовує кисень як окисник для знищення дихлоретану; він може бути більш ефективним у порівнянні зі звичайним згорянням повітря.

2. Водяна або хімічна абсорбція: дихлоретан може бути абсорбований розчинами води або хімічних речовин, що дозволяє видалити його з газової фази. Після абсорбції може проводитися регенерація абсорбента або обробка вторинних відходів.

3. Окислювальні процеси (каталітичний окислювальний процес): дихлоретан може бути підданий окислюванню на каталізаторах для перетворення його в менш токсичні сполуки, такі як кислоти чи оксиди.

4. Вуглецеві або молекулярні сита: вуглецеві або молекулярні сита можуть використовуватися для видалення дихлоретану за допомогою фізичного поглиблення на поверхні абсорбента.

5. Деструкція за допомогою високотемпературних процесів: дихлоретан може бути розкладений на більш прості сполуки шляхом піролізу за високих температур.

Вибір конкретного методу залежить від багатьох факторів, таких як обсяг викидів, вартість та ефективність процесу, а також вимоги щодо стандартів викидів та безпеки. Часто використовується комбінація різних методів для досягнення оптимальної ефективності очищення абгазів від дихлоретану.

У промисловому масштабі дихлоретан отримують двома сполученими методами, які використовують хлор:

1. Пряме хлорування етилену в рідкій фазі. У цьому методі хлор змішують з етиленом у рідкій фазі (рідкому стані). Також використовується каталізатор, такий як хлорид заліза або інші каталізатори, які активізують реакцію хлорування. Реакція відбувається за керованих температур під тиском, щоб забезпечити найкращі умови для утворення дихлоретану.

2. Окислювальне хлорування етилену в газовій фазі. У цьому методі етилен та хлор подають у газовій фазі (газовому стані). Використовується кисень у якості окисника, а також каталізатори, наприклад, оксиди металів. Реакція також відбувається за певною температурою і тиском, щоб забезпечити оптимальні умови для утворення дихлоретану.

Обидва методи мають свої переваги і недоліки, і вибір конкретного методу може залежати від технічних, економічних та екологічних факторів. Важливо підкреслити, що виробництво дихлоретану пов'язане з важливими аспектами забезпечення безпеки працівників, захисту навколишнього середовища та дотримання стандартів якості продукції.

У процесі окисного хлорування, в якому етилен реагує з хлором за участі каталізатора у вигляді хлориду міді, відбувається екзотермічна реакція, супроводжена виділенням тепла. Каталізатор, представлений хлоридом міді, виступає активним учасником процесу, сприяючи здійсненню хлорування в масиві газів. Екзотермічний характер реакції супроводжується збільшенням виділення тепла пропорційно кількості введеного хлору. Проте, даний процес виявляється технічно викликаючим через труднощі в управлінні великим обсягом тепла, що утворюється.

Реакція відбувається у газовій фазі, що створює труднощі у відведенні тепла через великі обсяги газового середовища. Крім того, наявність парів води у реакційній масі припускає значний ризик сильної корозії апаратури під час окисного хлорування.

Для забезпечення надійного захисту корпусу реакторів від корозії, зазвичай використовуються керамічні матеріали. Додатково, для виготовлення охолоджуючих пристроїв, які здатні здійснювати ефективний теплообмін при високих температурах, застосовують спеціальні сплави, що підвищують ефективність та стійкість до умов окисного хлорування.

Цей метод також має свої недоліки, серед яких значиться утворення побічних продуктів заміщення, які можуть виникнути внаслідок конкурентних реакцій під час хлорування етилену. За таких умов може виникнути неочікуване

утворення хлорованих вуглеводнів, які не є бажаними продуктами і можуть збільшувати складність очищення отриманого дихлоретану.

Крім того, процес газофазного хлорування, в якому реакція відбувається у газовій фазі, ставить певні вимоги з питань техніки безпеки. Взаємодія хлору та етилену у газовій фазі може бути небезпечною через високу температуру і підвищену тиск у реакторі. Особливо важливо дотримуватися високих стандартів безпеки для запобігання небезпекам, пов'язаним із хлором та іншими хімічними речовинами, які використовуються у процесі.

Останнім часом спостерігається схильність до розвитку процесів, які спрямовані на зменшення споживання енергетичних ресурсів, і в цьому контексті виникла сучасна тенденція розвитку економії енергії в промисловості. У рамках цієї тенденції був розроблений та впроваджений процес прямого хлорування етилену з використанням тепла, що виділяється під час реакції, для ректифікації утворюючогося дихлоретану.

Цей підхід має на меті максимально використовувати тепловий ефект реакції хлорування етилену в процесі самоочищення та ректифікації утворюючогося продукту – дихлоретану. Процес прямого хлорування етилену може включати в себе використання тепла, що вивільняється під час реакції, для ефективного ректифікаційного очищення та отримання чистого дихлоретану. Цей метод має декілька переваг:

- енергоефективність – з використанням тепла реакції для ректифікації досягається збереження енергії та оптимізація процесу виробництва;
- менше відходів – використання тепла для ректифікації може допомогти зменшити утворення побічних продуктів та поліпшити виходи корисного продукту;
- екологічна ефективність – зменшення витрат енергії може сприяти зменшенню викидів та негативного впливу на довкілля.

Такий підхід представляє собою інноваційний спосіб оптимізації виробництва дихлоретану, де прагнуть максимально використовувати енергію, яка вивільняється в процесі, для покращення ефективності та сталості виробництва.

Отримання дихлоретану ґрунтується на хімічній реакції між етиленом та хлором. Цей процес зазвичай проводять у рідкій фазі, використовуючи каталізатор у вигляді хлориду заліза та температури від 49 до 65°C. Це робить процес безпечним та контрольованим.

У рідкій фазі реакції хлорування етилену в присутності каталізатора хлорного заліза забезпечує надійність та ефективність процесу. Наявність каталізатора допомагає активізувати хімічні реакції, спрямовані на утворення дихлоретану, та знижує температурні умови, необхідні для відбування реакції.

В результаті застосування рідкофазного методу отримання дихлоретану у присутності каталізатора та при визначених температурних умовах досягається не лише ефективність процесу, але й важлива складова – безпека виробництва.

1.2 Технологічні особливості абсорбційних процесів [6–14]

Другий закон термодинаміки грає важливу роль в основі законів перенесення маси та енергії в складних фізико-хімічних системах. Згідно з цим законом, всі фізико-хімічні процеси спрямовані до досягнення рівноваги, що є станом, в якому всі впливові фактори на систему збалансовані.

Рівноважні параметри – це параметри складної фізико-хімічної системи, в якій досягнуто рівноважний стан. Ці параметри включають в себе тиск, температуру, концентрації фаз, які характеризують систему в рівноважному стані.

Фізичні та термодинамічні умови рівноваги в усіх точках замкненої системи включають рівність температур, тисків та хімічних потенціалів. Це означає, що в рівноважному стані всі області системи мають однакову температуру, тиск і хімічні потенціали різних речовин у системі вирівнюються. Це дозволяє системі досягнути стану рівноваги, де немає подальших нетермодинамічних змін, і всі процеси зберігають баланс.

Число незалежних ступенів вільності системи дорівнює різниці між кількістю компонентів у системі та числом фаз плюс одиниця:

$$f = C - P + 2, \quad (1.1)$$

де f – число незалежних ступенів вільності;

C – кількість компонентів у системі;

P – кількість фаз в системі.

Отже, згідно з правилом фаз Гіббса, число незалежних ступенів вільності системи дорівнює різниці між кількістю компонентів і кількістю фаз плюс два.

Абсорбція в двофазній системі «газ – рідина» є типовим дифузійним процесом, і вона реалізується за допомогою поглинального компонента абсорбенту, який відділяється з газової фази і поглинається рідиною. У випадку простої абсорбції, де газова суміш має три компоненти (інертні гази – носії, поглинальний компонент і абсорбент), можна варіювати три незалежні параметри: температуру, тиск і концентрацію абсорбату в одній із фаз.

Проте, в більш складних сценаріях абсорбції, де газова суміш містить багато компонентів, і абсорбент може поглинати декілька компонентів, число незалежних параметрів значно ускладнюється. У таких випадках потрібно враховувати багато компонентів і їх взаємодію, що робить розрахунки більш складними.

У стані рівноваги для двофазної трикомпонентної системи за умови сталості температури і загального тиску існує однозначна залежність між концентраціями компонентів в газовій і рідкій фазах. Ця залежність описується законом Генрі, який вказує, що парціальний тиск компонента газової суміші над рідиною пропорційний його мольній концентрації в рідині. Математично це можна виразити наступним чином:

$$P_i = H_i \cdot x_i,$$

де P_i – парціальний тиск компонента "i" над рідиною в газовій фазі;

H_i – коефіцієнт Генрі для компонента "i";

x_i – мольна концентрація компонента "i" в рідині.

Коефіцієнти Генрі визначаються експериментально для кожного компонента і при певних умовах температури і тиску. Закон Генрі важливий для розуміння рівноваги газової і рідкої фази, і він знаходить широке застосування в хімічній інженерії для опису процесів абсорбції, екстракції та інших явищ розподілу речовин між фазами.

Закон Генрі найкраще відповідає експериментальним даним в умовах невеликих тисків газу і низьких концентрацій розчиненої речовини в розчиннику. Це відбувається тому, що при низьких тисках та низьких концентраціях розчиненої речовини відсутні значні взаємодії між молекулами газу та розчинника, і газ веде себе близько до ідеального газу. У такому випадку коефіцієнт Генрі може бути адекватно описаний вказаним законом.

Проте, при збільшенні тиску газу та концентрації розчиненої речовини, можуть виникнути неідеальності у системі, такі як взаємодії між молекулами газу, хімічні реакції, зміни в структурі розчину тощо. У цих умовах, Закон Генрі може виявити обмежену точність в передбаченні поведінки системи.

Тому в окремих випадках, де тиск або концентрація великі, може бути необхідно використовувати більш складні моделі, які враховують неідеальності в системі, такі як модель Ван-дер-Ваальса або інші рівняння стану.

Закон Дальтона встановлює, що сумарний тиск газової суміші є рівним сумі парціальних тисків окремих компонентів:

$$p_A = P \cdot y_A.$$

Поєднуючи ці два закони (Генрі і Дальтона), можна отримати залежність між концентрацією розчиненої речовини в рідкій фазі та сумарним тиском газової фази:

$$y_A^* = \frac{E_A}{P} \cdot x_A = m_A \cdot x_A \text{ або } x_A^* = \frac{P}{E_A} \cdot y_A = \frac{y_A}{m_A},$$

де m_A – коефіцієнт розподілу поглиненої речовини між газом і рідиною:

$$m_A = E_A/P.$$

У реальних абсорбційних процесах робочі концентрації розподільної речовини в фазах можуть відрізнятися від рівноважних значень. Зазвичай, робочі концентрації розподільної речовини визначаються на підставі режиму роботи конкретного апарата і можуть бути оптимізовані для досягнення певних технічних або економічних цілей.

Робоча лінія процесу – це графічне зображення залежності між робочими концентраціями в обох фазах на діаграмі рівноваги. Ця лінія відображає, як змінюються концентрації розподільної речовини при зміні умов роботи абсорбційного апарата, таких як тиск, температура, витрати рідини та газу, інші параметри.

1.3 Застосування клапанних тарілок як спосіб модернізації абсорбера

Використання клапанних тарілок у конструкції абсорбера може слугувати ефективним способом модернізації, поліпшуючи ефективність та функціональність системи. Наведемо деякі переваги та можливі перспективи використання клапанних тарілок для процесу поглинання дихлоретану із абгазів. По-перше, це контроль потоку. Адже клапанні тарілки можуть бути використані для регулювання потоку рідини або газу у внутрішньому просторі абсорбера. Це дозволяє підтримувати оптимальні умови для абсорбційного процесу. По-друге, збільшення контактної поверхні – застосування клапанних тарілок може сприяти підвищенню контактної площі між абсорбентом та поглинуваною речовиною, що може поліпшити загальну ефективність масообміну.

Також клапанні тарілки можуть сприяти рівномірному розподілу тиску на всю поверхню, зменшуючи можливі «гарячі точки» та нерівномірності у внутрішньому об'ємі абсорбера. До того ж, ефективне регулювання потоків за

допомогою клапанних тарілок може допомогти зменшити витрати енергії, особливо у випадках, коли потрібно підтримувати заданий режим абсорбції.

Використання клапанних тарілок дозволяє адаптувати абсорбер до різних умов та змінювати параметри процесу в залежності від потреб. Клапанні тарілки можуть бути менше схильні до засмічення та вимагати менше обслуговування порівняно із ситчастими контактними пристроями.

Таким чином, результатом використання клапанних тарілок може бути підвищення ефективності абсорбера, зменшення витрат енергії та забезпечення більш гнучкого та ефективного контролю над процесом абсорбції. Але, перш ніж впроваджувати конструктивні зміни, треба виконати технологічний та конструктивний розрахунки, які б підтвердили досконалість представленого рішення.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Опис технологічної схеми виробництва вінілхлориду

Вінілхлорид визнається одним із провідних продуктів у світовій хімічній промисловості, виявляючи вражаючі обсяги виробництва. Цей хімічний матеріал займає друге місце за обсягами виробництва, поступаючи лише етену, пропену, етанолу, бензину, метанолу та терефталевій кислоті. Важливо відзначити, що виробництво вінілхлориду займає третє місце за значущістю серед всіх напрямків використання етену, який, у свою чергу, є ключовою хімічною сировиною і складає 11,9 % від світового виробництва цього еталонного матеріалу.

У докризовий період світової економіки, а саме у 2019 році, виробництво вінілхлориду досягло вражаючої масштабності, досягаючи 36 мільйонів тонн щорічно. Це свідчить не лише про великий попит на цей продукт, але й про його важливу роль у глобальному хімічному виробництві.

Варто підкреслити, що вінілхлорид використовується в різних галузях та має властивості, які роблять його необхідним у виробництві різноманітних матеріалів. Його важливість полягає в універсальності застосування – від виробництва будівельних матеріалів до виготовлення електроніки.

На рис. 2.1 представлено типову схему виробництва вінілхлориду. Отримання вінілхлориду відбувається у високотехнологічному кожухотрубному реакторі, де використовується стаціонарний шар каталізатору. Цей процес є вкрай спеціалізованим та вимагає точного контролю параметрів реакції для забезпечення високої якості та ефективності виробництва.

У реакторі Р каталізатор, який залишається нерухомим, заповнений відповідним матеріалом, що сприяє взаємодії реагентів, які вступають у реакцію. Під тиском, що досягає 0,4 МПа, етен, гідроген хлорид і повітря подаються у реактор, де їхні температури підтримуються на рівні 423 К. Важливо підкреслити, що контрольована температура відіграє ключову роль у забезпеченні оптимальних умов для реакції.

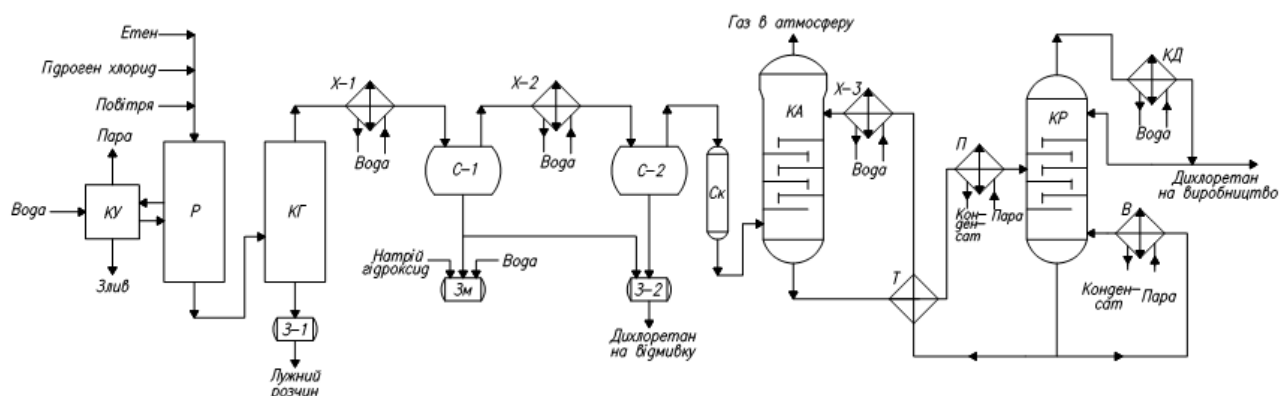


Рисунок 2.1 – Технологічна схема виробництва вінілхлориду:

Р – реактор; КУ – котел-утилізатор; КГ – колона гартувальна; X-1, X-2, X-3 – холодильники; C-1, C-2 – сепаратори; З-1, З-2 – збірники; Зм – змішувач; Ск – скруб-бер; КА – колона абсорбційна; КР – колона ректифікаційна; В – випарник; КД – конденсатор-дефлегматор; Т – теплообмінник; П – підігрівач

Сама реакція синтезу вінілхлориду відбувається при вищій температурі, а саме при 623 К. Цей високий тепловий рівень є необхідним для стимулювання процесу синтезу та отримання високоякісного вінілхлориду. Каталізатор в цьому контексті допомагає прискорити реакцію, підвищуючи ефективність процесу.

Усі ці етапи процесу взаємодії високотиснутого етену, гідроген хлориду та повітря при точно контрольованих температурних та тискових умовах є ключовими для забезпечення надійності та ефективності виробництва вінілхлориду в цьому важливому хімічному процесі.

Виробництво вінілхлориду охоплює технологічний процес, що складається з двох ключових етапів, які взаємодіють для досягнення оптимальної якості та виходу продукту. Першим етапом є пряме хлорування етену, а другим – це об'єднаний (спільний) процес окисного хлорування етену і піролізу дихлоретану.

На першому етапі етен піддається прямому хлоруванню, де здійснюється хімічна реакція з хлором. Цей етап відіграє критичну роль у введенні хлору до молекули етену, створюючи основний будівельний блок для виробництва вінілхлориду.

Другий етап є складним процесом, який включає об'єднаний (спільний) процес окисного хлорування етену і піролізу дихлоретану. Під час цього етапу,

етен, вже хлорований на попередньому етапі, піддається окисному хлоруванню за участю дихлоретану, що проходить під впливом тепла. Це важливий момент у виробництві, оскільки цей процес створює необхідні умови для утворення вінілхлориду.

Такий динамічний та взаємопов'язаний технологічний процес є ключовим для ефективного та економічно вигідного виробництва вінілхлориду, забезпечуючи високий ступінь конверсії етену в цінний хімічний продукт.

У процесі виконання хімічної реакції в реакторі Р, відбувається виділення тепла, яке потребує ефективного відведення. Для цього, у міжтрубний простір вводиться теплоносіє, який сприяє зняттю надлишкової теплоти. Процес регенерації теплоносія відбувається у спеціальному котлі-утилізаторі КУ.

Реакційні гази, що виходять з реактору, містять важливі компоненти, такі як вінілхлорид, дихлоретан, етилхлорид, непрореагований етен, гідроген хлорид, оксиди карбону, водяна пара та кисень, і ці гази спрямовуються у гартувальну колоду КГ. Температура цих газів на вході у колоду знижується до 383–393 К, створюючи оптимальні умови для подальших процесів у колоні.

Засвідчуючи цей технологічний підхід, реактор Р та гартувальна колода КГ взаємодіють для забезпечення оптимальних умов в різних частинах хімічного процесу. Цей метод інтегрованого керування теплом та компонентами газу є ключовим для ефективності та стабільності виробництва вінілхлориду на високому рівні якості.

Охолоджені та нейтралізовані гази з верхньої частини гартувальної колони КГ проходять подальший етап обробки у конденсаторі Х-1. У цьому конденсаторі відбувається часткова конденсація вологи та дихлоретану, процес, який сприяє утворенню конденсату. Цей конденсат потім подається на розділення фаз у сепаратор С-1, де дихлоретан відокремлюється і спрямовується у збірник дихлоретану-сирцю З-2. Водний компонент конденсату подається у змішувач Зм для підготовки лужного розчину.

Газовий потік, який містить вінілхлорид, етен, неконденсовані органічні продукти, вологу та інертні гази, направляється у холодильник Х-2. У цьому хо-

лодильнику газ охолоджується до температури 278 К. Далі газ проходить через сепаратор С-2 та скруббер Ск, де він майже повністю висушується, і прямує в абсорбційну колону КА.

Абсорбер КА має вигляд тарілчастої колони, що обладнана клапанними тарілками. Саме в ній відбувається відокремлення цільового компонента з газового потоку за допомогою рідкого поглинача. Цей процес є ключовим у виробництві вінілхлориду, оскільки забезпечує видалення небажаних компонентів та отримання чистого цільового продукту.

Абсорбент, насичений дихлоретаном, вводиться у десорбер, який складається з ректифікаційної колони КР, що оснащена випарником В та конденсатором-дефлегматором КД. Верхній рівень колони забирає дихлоретан із вмістом 98,5 %, тоді як з нижньої частини виходить регенований абсорбент з вмістом дихлоретану на рівні 0,7 % мас.

У десорбері гарячий регенований абсорбент взаємодіє з насиченим абсорбентом, що направляється для регенерації у теплообмінник Т. Остаточне підігрівання та охолодження потоків здійснюється в підігрівачі П та холодильнику Х-3. Процес регенерації демонструє ефективне використання теплової енергії для оптимізації хімічного процесу. Завдяки стратегічному розміщенню устаткування для підігрівання та охолодження, забезпечується ефективна робота десорбера та усього регенераційного процесу, що в кінцевому результаті підвищує якість та виходи цільового продукту.

2.2 Характеристика та вимоги до сировини та кінцевої продукції

Сировиною у виробництві вінілхлориду є низка хімічних речовин, які використовуються для синтезу цього важливого полімеру. Основними ж звичайно є етен та хлор.

Етен, також відомий як етилен, представляє собою ключовий компонент у виробництві вінілхлориду. Цей газовий вуглеводень виробляється з різних джерел, включаючи нафтогазову сировину та етан, який може бути виділений з при-

родного газу або отриманий в ході процесів різкої переробки нафти. Нафтогазова сировина, така як етан чи пропан, є одним із основних джерел етену. У процесах розкладання складних вуглеводнів, які містяться в нафтогазовій сировині, етен може вироблятися в результаті крекінгу або інших хімічних процесів. Цей етен може бути використаний як основний блок для подальшого виробництва вінілхлориду. Етен також може бути виділений з природного газу, який складається головним чином з метану. Процеси обробки газу можуть включати етапи відокремлення та очищення етену з природного газу для його подальшого використання у виробництві вінілхлориду. Крім того, виробництво етену може включати різну переробку нафти, де етен може бути отриманий з різних фракцій нафти через процеси, такі як паровий крекінг або каталітичний крекінг.

Хлор виступає другою ключовою складовою сировини для виробництва вінілхлориду, і його отримання в основному здійснюється шляхом електролізу солевих розчинів. Цей важливий процес відомий як хлор-лужний електроліз, і він визначається високою ефективністю та широким застосуванням у хімічній промисловості. У хлор-лужному електролізі використовуються солі, такі як натрій хлорид (NaCl) або калій хлорид (KCl), як джерело хлору. Процес розпочинається розділенням води на кисень та водень за допомогою електролізу. Крім того, у електролізері відбувається окиснення хлоридів, що призводить до утворення молекул хлору (Cl_2) та лужного розчину (наприклад, NaOH або KOH). Отриманий хлор слугує основним сировинним матеріалом для подальшого виробництва вінілхлориду. Цей газ застосовується у хімічних реакціях з етеном або іншими вуглеводневими з'єднаннями для створення вінілхлориду.

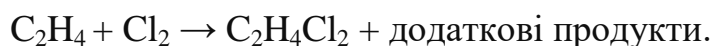
До додаткових сировин для виробництва вінілхлориду можна включити дихлоретан та ацетилен.

Дихлоретан, як правило, отримують хлоруванням етену в присутності каталізаторів.

Цей метод є ефективним і важливим етапом у виробництві хімічного сполуку дихлоретану. Процес розпочинається з введення етену (етилену) та хлору в реакційний резервуар в присутності певних каталізаторів, які активізують хлору-

вання. Каталізатори можуть бути різними, наприклад, металеві сполуки або оксиди, які прискорюють реакцію.

Хлорування етену призводить до взаємодії хлору з етенем, утворюючи дихлоретан та інші продукти. Хімічна реакція може бути узагальнена наступним чином:



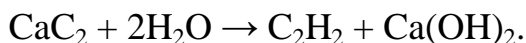
Отриманий дихлоретан може бути підданий додатковому очищенню і обробці для вилучення домішок та отримання продукту високої чистоти.

Виробництво вінілхлориду також включає використання ацетилену, який отримують через різні хімічні процеси, такі як піроліз кількох вуглеводнів чи взаємодію карбіду кальцію.

Піроліз вуглеводнів. У цьому методі вуглеводні, такі як метан або етан, піддаються піролізу при високих температурах (зазвичай від 800 до 1000°C) без доступу повітря. У результаті цього процесу утворюється ацетилен, який потім може бути використаний для отримання вінілхлориду.



Взаємодія карбіду кальцію (кальцієвого карбіду). Карбід кальцію взаємодіє з водою за утворення ацетилену та кальцію гідроксиду:



Утворений ацетилен потім може бути використаний у подальших процесах синтезу вінілхлориду.

У деяких виробничих методах можуть застосовуватися каталізатори. Сировинні матеріали для цих каталізаторів повинні мати високу активність і стабільність.

Вінілхлорид є важливою хімічною сировиною для виробництва полівінілхлориду (ПВХ) та інших хімічних продуктів. Для відповідності стандартам та забезпечення якісного та безпечного кінцевого продукту існують певні вимоги до вінілхлориду:

1. Вінілхлорид повинен бути чистим і не містити небажаних домішок, які можуть негативно впливати на властивості та якість полівінілхлориду. Домішки можуть включати інші органічні сполуки або хімічні забруднення.

2. Хлор відіграє ключову роль у властивостях ПВХ, тому важливо визначити точний вміст хлору в вінілхлориді відповідно до технічних вимог.

3. Високий вміст вологи у вінілхлориді може негативно впливати на його обробку та якість кінцевого продукту. Тому, вінілхлорид повинен мати низький вміст вологи.

4. Вінілхлорид повинен бути стабільним та не схильним до небажаних хімічних реакцій або деградації під впливом температури, світла чи інших факторів.

5. Вінілхлорид повинен мати визначений колір відповідно до технічних вимог. Колір може бути важливим показником якості для конкретних застосувань.

6. Взаємодія вінілхлориду з різними розчинниками повинна відповідати технічним вимогам та потребам виробництва.

Зазначені вимоги дозволяють забезпечити стандартизовану якість вінілхлориду, що важливо для його успішного використання у виробництві ПВХ та інших хімічних продуктів. Багато з цих вимог регулюються міжнародними та національними стандартами безпеки та якості.

2.3 Опис конструкції проектного апарата

Колонні апарати є невід'ємною частиною індустріальних процесів, де досягається повний контакт між різними речовинами, такими як рідини та пари. Вони знаходять застосування у широкому спектрі дифузних процесів, які включають абсорбцію, десорбцію, ректифікацію, а також охолодження та конденсацію промислових газів, а також зволоження газів та інші важливі операції. Ці колонні

апарати дозволяють здійснювати різноманітні технологічні процеси, які вимагають інтенсивного контакту між фазами. Наприклад, абсорбція використовується для видалення певних компонентів з газової фази шляхом їх поглинання рідиною, тоді як ректифікація служить для розділення різних компонентів у суміші парів.

Ці процеси мають різні застосування в промисловості, включаючи хімічну, нафтопереробну, енергетичну і інші галузі. Колонні апарати дозволяють покращити якість та ефективність цих процесів, забезпечуючи високий рівень контакту між речовинами та оптимізуючи умови їх взаємодії.

Проектована абсорбційна колона (див. рис. 2.2) являє собою вертикальний апарат, всередині якого на певній відстані одна від одної по висоті колони розміщуються горизонтальні перегородки – тарілки. Рідина та газ взаємодіють на кожній тарілці з метою ефективного вилучення конкретних компонентів газової фази. Цей процес здійснюється за допомогою великої кількості горизонтальних перегородок (тарілок), розташованих вертикально всередині колони.

Рідина, що містить абсорбент, подається на верхню тарілку, і вона спускається вниз по колоні через порожнистість між тарілками. У той час як рідина рухається вниз, газ, який містить абсорбат, поступово піднімається вгору через проміжки між тарілками. Цей напрямлений потік обумовлюється різницею у густині рідини та газу.

На кожній тарілці рідина і газ знаходяться у контакті, і виникає абсорбційний процес. Компоненти, які мають взаємодіювати між фазами, переходять з газової фази в рідку, забираючи з собою забруднюючі речовини. Таким чином, тарілки створюють додаткову поверхню, де відбувається інтенсивний контакт, що сприяє ефективній абсорбції.

Важливою характеристикою абсорбційних колон є їхнє конструктивне виконання, яке може включати різні типи тарілок або інших елементів для оптимізації контакту між фазами та підвищення ефективності процесу абсорбції.

Клапанні тарілки (рис. 2.3) є одним із типів тарілок, які використовуються в абсорбційних колонах. Вони мають специфічну конструкцію, яка дозволяє ефективно регулювати потік рідини та газу через колону.

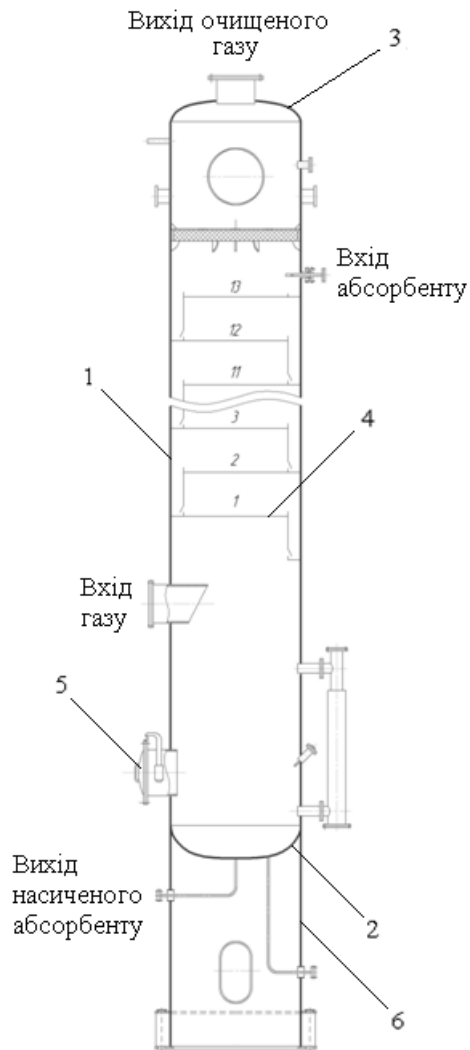


Рисунок 2.2 – Ескіз проектованої абсорбційної колони
для поглинання дихлоретану із абгазів:

1 – корпус; 2 – днище; 3 – кришка; 4 – тарілка; 5 люк; 6 – опора

Основною особливістю даного пристрою є наявність клапанів на тарілці. Ці клапани можуть відчинятися або закриватися в залежності від потоку рідини та газу (див. рис. 2.4). Клапани регулюють потік рідини вниз і газу вгору. Це дозволяє контролювати та оптимізувати умови абсорбційного процесу.

Клапанні тарілки забезпечують регульований контакт між рідиною та газом на кожній тарілці, що може бути корисним для оптимізації ефективності абсорбції. Також клапанні механізми можуть допомогти зменшити розсіювання рідини під час спуску, що сприяє ефективнішому контакту і переносу маси.

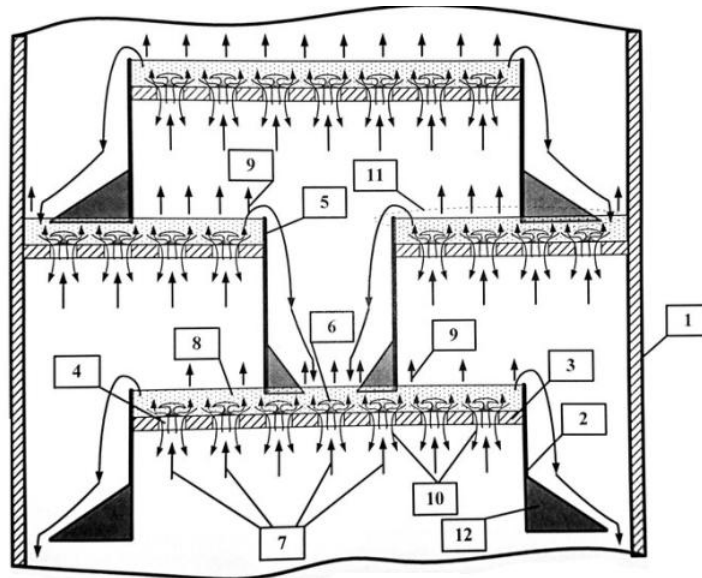


Рисунок 2.3 – Устрій клапанної тарілки:

1 – корпус колони; 2 – зливна кишеня; 3 – полотно тарілки; 4 – отвір у тарілці; 5 – перегородка, що регулює рівень на тарілці; 6 – фіксований клапан; 7 – газова суміш знизу колони; 8 – рівень рідини на тарілці; 9 – очищена газова суміш; 10 – потік абсорбенту; 11 – гідрозатвор; 12 – розподільчий пристрій

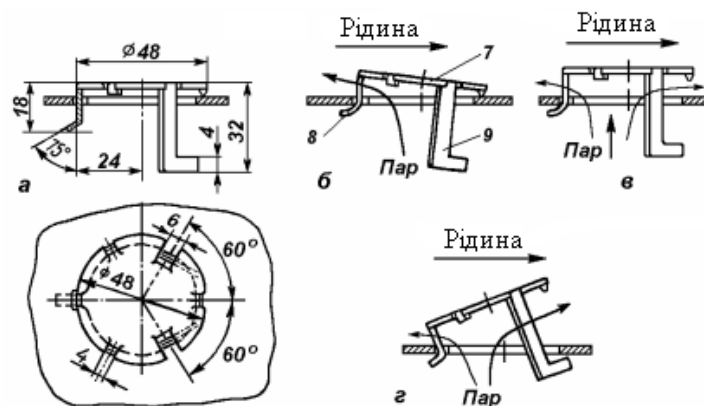


Рисунок 2.4 – Схеми клапанів:

а – будова піднімально-поворотного клапана; б, в, г – відповідно положення клапана при мінімальному, середньому і максимальному навантаженнях

Клапанні тарілки можуть працювати ефективно при різних температурах і тиску, що робить їх універсальними для різноманітних умов процесу. Вони можуть бути особливо ефективними при роботі в умовах з низькими різницями тиску між рідиною та газом. У порівнянні з іншими типами тарілок, клапанні тарілки можуть бути більш ефективними при роботі з в'язкими рідинами.

Загалом, клапанні тарілки можуть бути використані для підвищення точності та ефективності абсорбційного процесу в абсорбційних колонах, особливо в умовах, де потрібно систематичне регулювання потоків рідини та газу.

2.4 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата [13]

Виконаємо розрахунок абсорберу з клапанними тарілками для поглинання дихлоретану з абгазів у виробництві вінілхлориду. Витрата газу, приведена до нормальних умов, $V_{\Gamma}^0 = 27000 \text{ м}^3/\text{год}$. Температура газу $t_{\Gamma} = 20^{\circ}\text{C}$, тиск $P = 3,2 \text{ ат}$. Початкова концентрація дихлоретану у суміші $c_{\Pi} = 1,3 \text{ \% об}$. Коефіцієнт вилучення $\eta = 0,96$. Вміст дихлоретану в регенованому абсорбенті $x^- = 0,7 \text{ \% мас}$. Абсорбент – фракція нафтенно-парафінових вуглеводнів з молекулярною масою 128, коефіцієнтом динамічної в'язкості $\mu = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$, густиною $\rho_p = 750 \text{ кг/м}^3$, поверхневим натягом $\sigma = 0,024 \text{ Н/м}$.

Рівноважні концентрації дихлоретану у рідкому поглиначі при тиску 3,2 ат і лінійному розподіленні температур по висоті колони виражаються рівнянням:

$$y^* = \exp(0,254 \cdot x^{1,945}) - 1,$$

де y^* , x – мольні долі дихлоретану в газі та рідині.

За нормальних умов 1 кмоль газу займає $22,4 \text{ м}^3$. Отже, мольна витрата газової суміші становитиме:

$$G_{\Gamma} = \frac{V_{\Gamma}^0}{22,4} = \frac{27000}{22,4} = 1205 \frac{\text{кмоль}}{\text{год}}$$

Об'ємні концентрації ДХЕ у газі співпадають з мольними: $y_{\Pi} = c_{\Pi}$. Тому витрата дихлоретану дорівнює:

$$G_{\text{ДХЕ}}^{\Pi} = G_{\Gamma} \cdot y_{\Pi} = 1205 \cdot 0,013 = 15,7 \frac{\text{кмоль}}{\text{год}}$$

Витрата інертного носія:

$$G = G_{\Gamma} - G_{\text{ДХЕ}}^{\text{п}} = 1205 - 15,7 = 1189,3 \frac{\text{кмоль}}{\text{год}} = 0,33 \frac{\text{кмоль}}{\text{с}}$$

Масова витрата інертного носія (повітря):

$$\bar{G} = G \cdot M_{\text{пов}},$$

де $M_{\text{пов}}$ – молярна маса повітря, кг/кмоль; $M_{\text{пов}}=29$ кг/кмоль.

$$\bar{G} = 1189,3 \cdot 29 = 34490 \frac{\text{кг}}{\text{год}} = 9,6 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Кількість дихлоретану газі на виході з абсорберу:

$$G_{\text{ДХЕ}}^{\text{к}} = G_{\text{ДХЕ}}^{\text{п}} \cdot (1 - \eta) = 15,7 \cdot (1 - 0,96) = 0,63 \frac{\text{кмоль}}{\text{год}}$$

Знаходимо відносні концентрації дихлоретану:

$$y_{\text{п}} = \frac{G_{\text{ДХЕ}}^{\text{п}}}{G} = \frac{15,7}{1189,3} = 0,0132 \frac{\text{кмоль ДХЕ}}{\text{кмоль повітря}}$$

$$y_{\text{к}} = \frac{G_{\text{ДХЕ}}^{\text{к}}}{G} = \frac{0,63}{1189,3} = 0,00053 \frac{\text{кмоль ДХЕ}}{\text{кмоль повітря}}$$

Відносна концентрація дихлоретану у регенованому абсорбенті:

$$X_{\text{п}} = \frac{M_{\text{в}} \cdot \bar{x}}{M_{\text{а}} \cdot (1 - \bar{x})} = \frac{128 \cdot 0,007}{98 \cdot (1 - 0,007)} = 0,0092 \frac{\text{кмоль ДХЕ}}{\text{кмоль НП}}$$

Для побудови кривої рівноваги завдамо ряд значень y в діапазоні від $y=0$ до $y=0,014$ (табл. 2.1) і розрахуємо відповідні їм значення x за рівнянням:

$$y^* = \exp(0,254 \cdot x^{1,945}) - 1$$

Таблиця 2.1 – Рівноважні концентрації

мол. долі		кмоль ДХЕ/кмоль повітря	
y^*	x	Y^*	X
0,014	0,225	0,0143	0,290
0,012	0,208	0,0122	0,262
0,010	0,190	0,0101	0,235
0,008	0,169	0,008	0,203
0,006	0,146	0,006	0,171
0,004	0,119	0,004	0,135
0,002	0,083	0,002	0,090
0,001	0,0058	0,001	0,058
0	0	0	0

Наприклад, для $y=0,010$:

$$x = \left[\frac{\ln(y + 1)}{0,254} \right]^{\frac{1}{1,945}} = \left[\frac{\ln(0,01 + 1)}{0,254} \right]^{\frac{1}{1,945}} = 0,19 \text{ мол. д.}$$

На рис. 2.5 наведена рівноважна лінія. Одну точку робочої лінії А будемо за концентраціями газу на виході $Y_k^* = 0,00053$ кмоль ДХЕ/кмоль повітря та $X_{II} = 0,0092$ кмоль ДХЕ/кмоль НП. При максимальній витраті абсорбенту робоча лінія буде перетинати рівноважну в точці В' ($X_k^* = 0,190$ кмоль ДХЕ/кмоль НП).

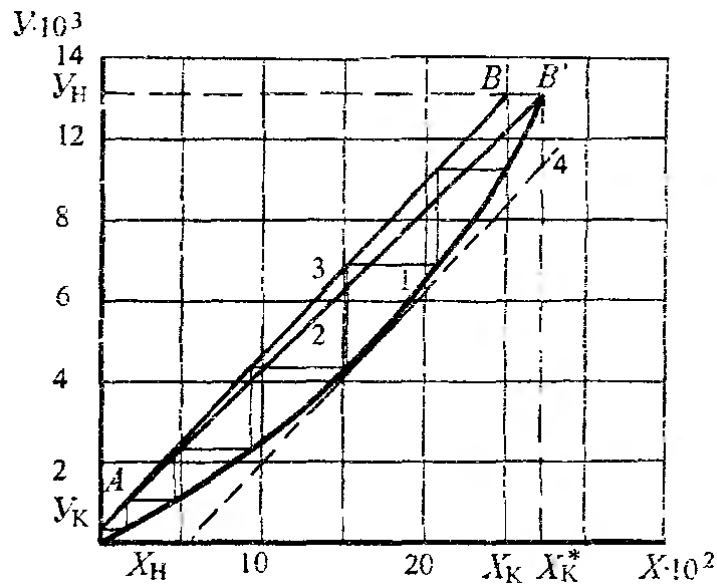


Рисунок 2.5 – Лінія рівноваги (1), робочі лінії (2, 3) при різних витратах абсорбенту і дотична до кривої рівноваги (4)

Мінімальна витрата абсорбенту:

$$L_{min} = G \cdot \frac{Y_{\Pi} - Y_K}{X_K^* - X_{\Pi}} = 1189,3 \cdot \frac{0,0132 - 0,00053}{0,190 - 0,0092} = 83,34 \frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{ГОД}}$$

Приймаємо коефіцієнт надлишку абсорбенту $\beta=1,1$.

Робоча витрата абсорбенту:

$$L = \beta \cdot L_{min} = 1,1 \cdot 83,34 = 91,67 \frac{\text{КМОЛЬ}}{\text{ГОД}}$$

Масова витрата абсорбенту:

$$\bar{L} = L \cdot M = 91,67 \cdot 128 = 11733,76 \frac{\text{КГ}}{\text{ГОД}} = 3,26 \frac{\text{КГ}}{\text{С}}$$

Об'ємна витрата абсорбенту:

$$V_p = \frac{\bar{L}}{\rho_p} = \frac{11733,76}{750} = 15,645 \frac{\text{М}^3}{\text{ГОД}} = 0,004 \frac{\text{М}^3}{\text{С}}$$

Концентрація ДХЕ на виході:

$$X_K = \left[G \cdot \frac{(Y_{\Pi} - Y_K)}{L} \right] + X_H = \left[1189,3 \cdot \frac{(0,0132 - 0,00053)}{91,67} \right] + 0,0092$$

$$= 0,174 \frac{\text{кмоль ДХЕ}}{\text{кмоль НП}}$$

Другу точку робочої лінії В будуємо за координатами:

$$Y_H = 0,0132 \text{ кмоль ДХЕ/кмоль повітря; } X_K = 0,174 \text{ кмоль ДХЕ/кмоль НП}$$

Для визначення числа теоретичних ступенів вписуємо лому лінію між робочою і рівноважною. Кількість теоретичних ступенів – $n_{TC} = 6$ (рис. 2.1, п.1.4.2) [13].

Оскільки вміст дихлоретану є малим, фізичні властивості газу ототожнюємо з властивостями повітря: $\rho_r^0 = 1,29 \text{ кг/м}^3$, $\mu_r = 1,8 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

Густина повітря при тиску $P = 3,2 \text{ ат}$ і середній температурі $t_r = 20^\circ\text{C}$ знаходимо за законом газového стану:

$$\rho_r = \rho_r^0 \cdot \frac{P \cdot T_0}{P_0 \cdot T} = 1,29 \cdot \frac{3,2 \cdot 273}{1 \cdot 293} = 3,85 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Максимальна допустима швидкість газу в колоні:

$$w_{\text{макс}} = c \cdot \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_r}{\rho_r}} = 0,1 \cdot \sqrt{\frac{750 - 3,85}{3,85}} = 1,4 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Приймаємо робочу швидкість газу в колоні на рівні 50 % від її максимального значення:

$$w_p = 0,5 \cdot w_{\text{макс}} = 0,5 \cdot 1,4 = 0,7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Об'ємна витрата газу, приведена до умов в апараті:

$$V_T = V_T^0 \cdot \frac{P_0 \cdot T}{P \cdot T_0} = \frac{27000}{3600} \cdot \frac{1 \cdot 293}{3,2 \cdot 273} = 2,51 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Площа поперекового перерізу абсорбера:

$$S = \frac{V_T}{w_p} = \frac{2,51}{0,7} = 3,6 \text{ м}^2$$

Діаметр абсорбера:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,6}{3,14}} = 2,14 \text{ м}$$

Приймаємо найближчий стандартний діаметр $D=2,2$ м.

Дійсна швидкість газу в колоні:

$$w_k = \frac{4 \cdot V_T}{\pi \cdot D^2} = \frac{4 \cdot 2,51}{3,14 \cdot 2,2^2} = 0,66 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Приймаємо клапанну тарілку з наступними характеристиками:

- робочій переріз тарілки – $S_1=2,76 \text{ м}^2$;
- периметр зливу – $l_w=1,74$ м;
- переріз переливу – $S_2=0,52 \text{ м}^2$;
- відносний вільний переріз тарілки – $f_c=0,0944$;
- кількість клапанів – $n=256$;
- кількість рядів клапанів – 22.

Коефіцієнт молекулярної дифузії дихлоретану в повітрі розраховуємо за формулою:

$$D_{\Gamma} = \frac{4,22 \cdot 10^{-2} \cdot T^{3/2}}{P \cdot (v_{\text{ДХЕ}}^{1/3} + v_{\text{ПОВ}}^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_{\text{ДХЕ}}} + \frac{1}{M_{\text{ПОВ}}}},$$

де $v_{\text{ДХЕ}}$, $v_{\text{ПОВ}}$ – мольні об'єми дихлоретану та повітря, $\text{см}^3/\text{моль}$;
 $M_{\text{ДХЕ}}$, $M_{\text{ПОВ}}$ – молярні маси дихлоретану та повітря, кг/кмоль .

$$D_{\Gamma} = \frac{4,22 \cdot 10^{-2} \cdot (273 + 20)^{3/2}}{0,31 \cdot 10^6 \cdot (93,6^{1/3} + 29,9^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{98} + \frac{1}{29}} = 2,48 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

Коефіцієнт молекулярної дифузії дихлоретану в рідині:

$$D_p = 7,4 \cdot 10^{-15} \cdot (\Phi \cdot M_{\text{НП}})^{0,5} \cdot \frac{T}{\mu_{\text{НП}} \cdot v_{\text{ДХЕ}}^{0,6}}$$

$$D_p = 7,4 \cdot 10^{-15} \cdot (1 \cdot 128)^{0,5} \cdot \frac{295}{0,8 \cdot 10^{-3} \cdot 93,6^{0,6}} = 2,03 \cdot 10^{-9} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Число одиниць перенесення у газовій фазі:

$$N_{\Gamma} = 1770 \cdot h_1^{1,2} \cdot \left(\frac{w_k \cdot h_1}{D_{\Gamma}}\right)^{-0,5}$$

$$N_{\Gamma} = 1770 \cdot 0,075^{1,2} \cdot \left(\frac{0,66 \cdot 0,075}{2,48 \cdot 10^{-6}}\right)^{-0,5} = 0,56$$

Число одиниць перенесення в рідині:

$$N_p = 126000 \cdot h_1^{1,9} \cdot \left(\frac{U \cdot h_1}{D_{\text{ж}}}\right)^{-0,5}$$

$$N_p = 126000 \cdot 0,075^{1,9} \cdot \left(\frac{0,0011 \cdot 0,075}{2,03 \cdot 10^{-9}} \right)^{-0,5} = 4,55$$

Середнє значення константи рівноваги визначимо з графіка. З цією метою проводимо дотичну до кривої рівноваги:

$$m = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{(8,5 - 0) \cdot 10^{-3}}{(25 - 5) \cdot 10^{-2}} = 0,0425$$

Фактор відхилення:

$$\lambda = \frac{m \cdot G}{L} = \frac{0,0425 \cdot 1189}{62,8} = 0,805$$

Загальне число перенесення:

$$N_{0e} = \frac{N_r \cdot N_p}{N_p + \lambda \cdot N_r} = \frac{0,56 \cdot 4,55}{4,55 + 0,805 \cdot 0,56} = 0,51$$

Локальна ефективність контакту:

$$E_0 = 1 - e^{-N_{0e}} = 1 - e^{-0,51} = 0,4$$

Коефіцієнт турбулентної дифузії:

$$D_{LS} = 0,58 \cdot 10^{-4} \cdot w_k^m \cdot w_p^{-0,5} \cdot h_0^{-0,7}$$

$$D_{LS} = 0,58 \cdot 10^{-4} \cdot 0,66^{0,21} \cdot 0,0383^{-0,5} \cdot 0,0375^{-0,7} = 0,0027 \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

$$m = \frac{1,3}{3600 \cdot V_p \cdot l_w} = \frac{1,3}{3600 \cdot 0,003 \cdot 1,74} = 0,21$$

$$w_p = \frac{V_p \cdot z_w}{S_1 \cdot h_0} = \frac{0,003 \cdot 1,32}{2,76 \cdot 0,0375} = 0,0383 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Критерій Фур'є:

$$Fo_{LS} = \frac{D_{LS} \cdot h_0 \cdot l_w}{V_{ж} \cdot z_w} = \frac{0,00270 \cdot 0,0385 \cdot 1,74}{0,003 \cdot 1,32} = 0,045$$

Допоміжний коефіцієнт ξ :

$$\xi = \sqrt{1 + 4 \cdot \lambda \cdot E_{0r} \cdot Fo} = \sqrt{1 + 4 \cdot 0,805 \cdot 0,4 \cdot 0,045} = 1,029$$

Ефективність тарілки по Мерфі:

$$E_{MT} = \frac{(1 + \xi)^2 \cdot \exp\left(\frac{\xi - l}{2 \cdot Fo}\right) - (1 - \xi)^2 \cdot \exp\left(-\frac{\xi + l}{2 \cdot Fo}\right)}{4 \cdot \xi \cdot \lambda} - \frac{l}{\lambda}$$

$$E_{MT} = \frac{(1 + 1,029)^2 \cdot \exp\left(\frac{1,029 - l}{2 \cdot 0,045}\right) - (1 - 1,029)^2 \cdot \exp\left(-\frac{1,029 + l}{2 \cdot 0,045}\right)}{4 \cdot 1,029 \cdot 0,805} - \frac{l}{0,805} = 0,47$$

Число дійсних тарілок в колоні:

$$n_{дт} = \frac{n_T}{E_{MT}} = \frac{6}{0,47} = 13$$

Приймаємо відстань між тарілками 0,5 м та визначаємо висоту робочої частини абсорбера:

$$H = H_{\text{мг}} \cdot (n_{\text{дт}} - 1) = 0,5 \cdot (13 - 1) = 6 \text{ м.}$$

Діаметр штуцерів визначаємо з рівняння витрати за формулою:

$$d_{\text{шт}} = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w_{\text{шт}}}},$$

де V – об’ємна витрата газу (рідини), м³/с;

$w_{\text{шт}}$ – швидкість газу (рідини), м/с.

Приймаємо величину швидкостей: для газу – $w_{\text{г}}=20$ м/с; для поглинача – $w_{\text{р}}=2$ м/с.

Вхід (вихід) газу:

$$d_{\text{шт}} = \sqrt{\frac{2,51}{0,785 \cdot 20}} = 0,4 \text{ м;}$$

Приймаємо $d_{\text{шт}}=400$ мм зі стандартного ряду.

Вхід (вихід) поглинача:

$$d_{\text{шт}} = \sqrt{\frac{0,004}{0,785 \cdot 2}} = 0,050 \text{ м.}$$

Приймаємо $d_{\text{шт}}=50$ мм зі стандартного ряду.

2.5 Гідравлічні розрахунки [15]

Оскільки колона працює під середнім надлишковим тиском, приймаємо глибину барботажу $h_6=0,075$. Для клапанних тарілок динамічна глибина барботажу $h_d=h_6$.

Підпір рідини над зливною перегородкою:

$$h_{ow} = 0,0667 \cdot \left(\frac{0,003}{1,74} \right)^{0,66} = 0,001 \text{ м}$$

Нехтуючи градієнтом рівня Δ , знаходимо висоту зливної перегородки:

$$h_{\Pi} = h_6 - h_{ow} = 0,075 - 0,001 = 0,074 \text{ м}$$

Фактор аерації:

$$\beta = \left[\frac{0,1}{0,3 \cdot w_{\kappa} \cdot f_c + 4} \right] + \frac{0,253}{h_d^{0,25}}$$

$$\beta = \left[\frac{0,1}{0,3 \cdot 0,66 \cdot 0,0944 + 4} \right] + \frac{0,253}{0,075^{0,25}} = 0,5$$

Газовміст шару:

$$\varphi = 1 - \beta = 1 - 0,5 = 0,5$$

Приймаємо висоту двофазного шару $h_f=h_6$, визначимо висоту шару рідини на тарілці:

$$h_0 = h_f \cdot (1 - \varphi) = 0,075 \cdot (1 - 0,5) = 0,0375 \text{ м}$$

Щільність газорідного шару:

$$\rho_{\Gamma-p} = \rho_p \cdot \beta = 750 \cdot 0,5 = 375 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Опір стовпа рідини:

$$\Delta P_{\text{ст}} = h_b \cdot \rho_{\Gamma-p} \cdot g = 0,075 \cdot 375 \cdot 9,81 = 276 \text{ Па}$$

Опір сухої тарілки:

$$\Delta P_{\text{сух}} = \xi \cdot \frac{\rho_{\Gamma} \cdot w_{\text{к}}^2}{2 \cdot f_c^2} = 3 \cdot \frac{3,85 \cdot 0,66^2}{2 \cdot 0,0944^2} = 282 \text{ Па}$$

Опір, зумовлений силами поверхневого натягу:

$$\Delta P_{\sigma} = \frac{4 \cdot \sigma}{d_e} = \frac{4 \cdot 0,024}{0,02} = 5 \text{ Па}$$

Гідравлічний опір тарілки:

$$\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{сух}} + \Delta P_{\sigma} = 276 + 282 + 5 = 563 \text{ Па}$$

Прийнята відстань між тарілками становить $H_{\text{мт}}=0,5$ м.

Висота сепараційного простору:

$$H_c = H_{\text{мт}} - h_f = 0,5 - 0,075 = 0,425 \text{ м}$$

Краплинонос:

$$e = \left(\frac{5,7 \cdot 10^{-6}}{\sigma} \right) \cdot \left(\frac{w_{\text{к}}}{H_c} \right)^{3,2}$$

$$e = \left(\frac{5,7 \cdot 10^{-6}}{0,024} \right) \cdot \left(\frac{0,66}{0,425} \right)^{3,2} = 0,001 \frac{\text{кг рідини}}{\text{кг газу}}$$

Краплинонос є допустимим, оскільки $e < 0,1$.

Швидкість рідини у переливному пристрої:

$$u = \frac{V_p}{S_2} = \frac{0,003}{0,52} = 0,006 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Допустима швидкість рідини у переливному пристрої:

$$u_d = 0,008 \cdot K_5 \cdot [H_{\text{мт}} \cdot (\rho_p - \rho_r)]^{0,5}$$

$$u_d = 0,008 \cdot 0,9 \cdot [0,5 \cdot (750 - 3,85)]^{0,5} = 0,14 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Переливи вправляються, оскільки $u < u_d$.

Швидкість рідини, віднесена до активної площі тарілки:

$$U = \frac{V_p}{S_1} = \frac{0,003}{2,76} = 0,0011 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Гідравлічний опір абсорберу:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{т}} \cdot n_{\text{дт}} = 563 \cdot 13 = 7320 \text{ Па}$$

2.6 Вибір допоміжного обладнання [15, 16]

Розрахунок теплообмінника. Виконаємо розрахунок теплообмінника, призначеного для охолодження поглинача до температури абсорбції (позначення на технологічній схемі – холодильник Х-3). У якості охолоджуючого агенту використовуємо оборотну воду.

Приймаємо індекс «1» для гарячого теплоносія (мастило), індекс «2» – для холодного теплоносія (оборотної води).

Приймаємо початкову і кінцеву температури воді відповідно 10 і 15⁰С, тоді її середня температура в теплообміннику становитиме:

$$t_2 = 0,5(10 + 15) = 12,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Температура мастила в процесі охолодження змінюється від 80 до 20⁰С.

Складаємо температурну схему процесу охолодження:

$$80 \text{ } ^\circ\text{C} \rightarrow 20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$15 \text{ } ^\circ\text{C} \leftarrow 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\delta} = 80 - 15 = 65 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{м}} = 20 - 10 = 10 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Delta t_{\text{сеп}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{65 - 10}{\ln \frac{65}{10}} = 29,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Визнаємо середню температуру поглинача за формулою:

$$t_1 = t_2 + \Delta t_{\text{сеп}}$$

$$t_1 = 12,5 + 29,4 = 41,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Визначаємо теплове навантаження холодильника з урахуванням теплових втрат у навколишнє середовище в розмірі 5 %:

$$Q = 1,05 \cdot G_1 \cdot c_1 (t_{1\text{н}} - t_{1\text{к}})$$

де $G_1 = 3,26 \text{ кг/с}$ – витрата поглинача;

c_1 – питома теплоємність поглинача, Дж/(кг·К).

Питома теплоємність суміші нафтопродуктів при $t=41,9^{\circ}\text{C}$ становить 2305 Дж/(кг·К).

Отримуємо:

$$Q = 1,05 \cdot 3,26 \cdot 2305 \cdot (80 - 20) = 473401 \text{ Вт}$$

Витрата води визначається за формулою:

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 \cdot (t_{2\text{к}} - t_{2\text{н}})}$$

де $Q = 37543 \text{ Вт}$ – споживання тепла;

$c_2 = 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$ – питома теплота води при $t = 12,5^{\circ}\text{C}$.

$$G_2 = \frac{473401}{4190 \cdot (15 - 10)} = 22,6 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$$

Приймаємо орієнтовне значення коефіцієнту теплопередачі в холодильнику $K_{\text{ор}} = 150 \text{ Вт}(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ і визначаємо площу поверхні теплообміну за формулою:

$$F_{\text{ор}} = \frac{Q}{K_{\text{ор}} \cdot \Delta t_{\text{сер}}}$$

$$F_{\text{ор}} = \frac{473401}{150 \cdot 29,4} = 107,35 \text{ м}^2$$

Приймаємо стандартизований теплообмінник 800 ХН–1,6–0/25-4-4 з поверхнею теплообміну 127 м^2 .

Розрахунок насосу. Виконаємо розрахунок насосу для перекачування поглинача в абсорбер, враховуючи наявність холодильника на лінії та необхідність подачі поглинача на певну висоту апарату. Приймаємо наступні вихідні дані для розрахунку потужності насосної установки:

- продуктивність по поглиначу – 3,26 кг/с;

- висота підйому – 6,5 м;
- надлишковий тиск перед абсорбером – $P_{\text{надл}}=0,035$ МПа;
- щільність поглинача – 750 кг/м³;
- загальний КПД насосної установки – $\eta=0,6$.

Приймаємо, що трубопровід має два вентиля, чотири коліна під кутом 90° С та загальну довжину $L = 10$ м.

Потужність, споживана насосом, визначається по формулі:

$$N = \frac{V \cdot \Delta P}{\eta \cdot 1000}$$

де V – об'єм рідини, що подається, м³/с ; $V=0,004$ м³/с;

ΔP – тиск, що розвивається насосом, Па;

η – загальний КПД насосної установки.

$$\Delta P = \Delta P_{\text{ск}} + \Delta P_{\text{тр+м.оп}} + \Delta P_{\text{під.}} + \Delta P_{\text{над.}} + \Delta P_{\text{хол.}}$$

де $\Delta P_{\text{ск}}$ – тиск, необхідний для створення швидкісного напору, Па;

$\Delta P_{\text{тр+м.оп.}}$ – втрата тиску на тертя та місцеві опори, Па;

$\Delta P_{\text{під.}}$ – тиск, необхідний для підйому рідини, Па;

$\Delta P_{\text{над.}}$ – надлишковий тиск перед абсорбером;

$\Delta P_{\text{хол.}}$ – втрати тиску при руху поглинача через холодильник, Па.

Швидкість рідини в трубопроводах допускається у межах $0,5 \dots 4$ м/с; приймаємо $\omega' = 1,5$ м.

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot \omega'}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,004}{3,14 \cdot 1,5}} = 0,058 \text{ м}$$

Приймаємо сталевий трубопровід діаметром $89 \times 4,5$ мм.

Уточнюємо швидкість руху рідини:

$$\omega_x = \frac{4 \cdot V}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 0,004}{3,14 \cdot 0,080^2} = 0,8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Швидкісний тиск:

$$\Delta P_{\text{ск}} = \frac{\rho \cdot \omega^2}{2} = \frac{750 \cdot 0,8^2}{2} = 240 \text{ Па}$$

Втрати тиску на тертя і місцеві опори:

$$\Delta P_{\text{тр+м.оп.}} = \left(\lambda \cdot \frac{L}{d} + \sum \xi_i \right) \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho}{2} = \left(\lambda \cdot \frac{L}{d} + \sum \xi_i \right) \cdot \Delta P_{\text{ск}}$$

Попередньо порахуємо значення критерія Рейнольдса:

$$Re = \frac{\omega \cdot d \cdot \rho}{\mu} = \frac{0,8 \cdot 0,080 \cdot 750}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 60000$$

де $\mu = 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – динамічна в'язкість поглинача при 20°C .

При $Re = 60000$ і $\frac{d_\varepsilon}{\xi} = \frac{80}{0,2} = 400$, $\lambda = 0,026$.

Для колін під кутом 90° можна прийняти $\xi_{\text{к}} = 0,38$; для вентиля $\xi_{\text{в}} = 4,4$.

Таким чином:

$$\sum \xi_i = 4 \cdot 0,38 + 2 \cdot 4,4 = 10,32,$$

$$\Delta P_{\text{тр+м.оп.}} = 0,026 \cdot \left(\frac{10}{0,080} + 10,32 \right) \cdot 240 = 844,40 \text{ Па}$$

Тиск, необхідний для підймання рідини на висоту $H = 6,5$ м:

$$\Delta P_{\text{під.}} = \rho \cdot g \cdot H = 750 \cdot 9,81 \cdot 6,5 = 47823,75 \text{ Па}$$

Надлишковий тиск перед абсорбером:

$$\Delta P_{\text{над.}} = 0,035 \text{ МПа} = 35000 \text{ Па}$$

Перед подачею поглинача в абсорбер він охолоджується у холодильнику. У трубному просторі теплообмінника наступні місцеві опори: вхід в камеру та вихід з неї, чотири входи в труби та чотири виходи з неї, тоді гідравлічний опір трубного простору визначаємо за формулою:

$$\Delta P_{\text{хол}} = \left[\lambda \cdot \frac{L \cdot z}{d} \cdot \left(\frac{w_{\text{тр}}^2 \cdot \rho}{2} \right) \right] + [2,5 \cdot (z - 1) + 2 \cdot z] \cdot \left(\frac{w_{\text{тр}}^2 \cdot \rho}{2} \right) + 3 \cdot \left(\frac{w_{\text{ш}}^2 \cdot \rho}{2} \right),$$

де $w_{\text{тр}}$ – швидкість руху поглинача у трубному просторі, м/с; приймаємо $w_{\text{тр}} = 0,8$ м/с;

$w_{\text{ш}}$ – швидкість руху поглинача у штуцерах, м/с; приймаємо $w_{\text{ш}} = 1,2$ м/с.

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{тр}} &= \left[0,026 \cdot \frac{4 \cdot 4}{0,021} \cdot \left(\frac{0,8^2 \cdot 750}{2} \right) \right] + [2,5 \cdot (4 - 1) + 2 \cdot 4] \cdot \left(\frac{0,8^2 \cdot 750}{2} \right) + 3 \cdot \left(\frac{1,2^2 \cdot 750}{2} \right) \\ &= 10094,30 \text{ Па} \end{aligned}$$

Тоді тиск, який має розвивати насос, складатиме:

$$\Delta P = 240 + 844,4 + 47823,75 + 35000 + 10094,30 = 94002,45 \text{ Па}$$

Споживча потужність насосу:

$$N = \frac{0,004 \cdot 94002,45}{0,6 \cdot 1000} = 0,63 \text{ кВт}$$

Встановлюємо відцентровий насос X20/18 з наступними характеристиками:

- потужність – 0,0055 м³/с;
- напір – 10,5 м стовпа рідини;
- потужність двигуна – 3 кВт (тип двигуна – АО2-31-2).

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Вибір конструкційних матеріалів [17]

Вибір конструкційного матеріалу для виготовлення абсорбера та його складових частин є ключовим етапом в проектуванні, особливо коли має значення корозійна та механічна стійкість. Оскільки розділювальна газова суміш не є сильно агресивною (швидкість корозії можна прийняти $P_m=0,1$ мм/рік), а також знаючи середній термін амортизації абсорбційної колони $T_a=10$ років, можна обрати матеріали, які задовольняють зазначені критерії. Ось кілька матеріалів, які можуть бути варіантами для наших умов:

1. Нержавіюча сталь. Цей матеріал має високу міцність, відмінну корозійну стійкість та добре витримує агресивні середовища.

2. Нікель або його сплави. Матеріали, такі як нікель чи його сплави, можуть бути відмінними у відношенні механічної та корозійної стійкості.

3. Титан та його сплави. Титан володіє високою корозійною стійкістю і може бути ефективним в умовах, де інші матеріали можуть виявити свою обмежену ефективність.

4. Пластмаси (наприклад, поліпропілен, PTFE). Деякі полімерні матеріали можуть бути ефективними у випадках, коли не вимагається велика міцність, але важлива корозійна стійкість.

5. Карбонові сталі. Деякі види вуглецевих сталей можуть також виявити відмінну корозійну стійкість та міцність у відповідних умовах.

Перед вибором матеріалу важливо врахувати інші параметри, такі як температурні умови, тиск, вартість матеріалу та його обробки. Також рекомендується звернутися до місцевих стандартів та рекомендацій для вашої конкретної галузі промисловості.

Надбавку до товщини матеріалу, яка враховує корозійний процес, розраховуємо за формулою:

$$C=P_m \cdot T_a;$$

$$C=0,1 \cdot 10=1 \text{ мм.}$$

Як відомо, найбільш часто у хімічному машинобудуванні використовується нержавіюча сталь різних марок. Для проєктованого апарата вибираємо листову сталь марки 12X18H10T. Далі розглянемо технічні характеристики цієї сталі:

1. Хімічний склад: вміст хрому (Cr) 17–19 %; вміст нікелю (Ni) 9–11 %; вміст титану (Ti) до 0,8 %; вміст вуглецю (C) не більше 0,12 %; вміст марганцю (Mn) не більше 2 %; вміст сірки (S) не більше 0,02 %; вміст фосфору (P) не більше 0,035 %.

2. Механічні властивості: межа плинності – не менше 245 МПа; межа міцності – не менше 520 МПа; подовження при розриві – не менше 35 %; твердість по Роквеллу (HRC) – не більше 21.

3. Фізичні властивості: щільність 7,93 г/см³; температура плавлення 1370–1420°C; теплопровідність 25 Вт/(м·К); теплоємність 0,5 Дж/(г·°C); корозійна стійкість – добре стійка до корозії у ряді хімічних середовищ, особливо в агресивних умовах.

Зазначені технічні характеристики свідчать про те, що сталь 12X18H10T є високоякісним матеріалом для хімічного обладнання, особливо при вимогливих умовах експлуатації, де потрібна стійкість до корозії та високі механічні властивості.

Використання нержавіючої сталі марки 12X18H10T для виготовлення основних частин абсорбера (корпусу, днища, обичайки, люків, тарілок) є логічним вибором, особливо в умовах, де важлива стійкість до корозії та високі механічні властивості. Стосовно матеріалу для з'єднувальних деталей, то пропонуємо використовувати сталь марки 20К. Давайте розглянемо деякі характеристики сталі 20К:

1. Хімічний склад: вміст вуглецю (C) 0,18–0,24 %; вміст кремнію (Si) до 0,35 %; вміст марганцю (Mn) 0,50–0,80 %; вміст фосфору (P) не більше 0,035 %; вміст сірки (S) не більше 0,035 %.

2. Механічні властивості: межа плинності – не менше 245 МПа; межа міцності – не менше 390 МПа; подовження при розриві – не менше 24 %.

3. Фізичні властивості: щільність 7,85 г/см³; температура плавлення близько 1480°C.

4. З'єднувальні властивості: з'єднувальна здатність сталі марки 20К забезпечує ефективно з'єднання з іншими елементами конструкції.

Загалом, такий підхід до вибору матеріалів для виготовлення різних частин обладнання може забезпечити оптимальний баланс між витратами та властивостями матеріалів у вашому конкретному проекті.

При виборі прокладкового матеріалу для абсорбера, важливо враховувати робоче середовище, температурні умови, тиск і хімічну сумісність з реагентами, які використовуються в процесі. Розглянемо декілька можливих прокладкових матеріалів:

1. Гумові прокладки. Гумові матеріали, такі як нітриль, епідерміс або вітон, можуть бути використані для прокладок у випадках, коли робоче середовище не містить агресивних хімічних сполук і не вимагає високої температурної стійкості.

2. Пароніт (без асбесту). Існують безасбестові варіанти пароніту, які можуть бути використані для прокладок. Вони можуть бути відмінним вибором для робочих середовищ з помірною хімічною агресією та низьким тиском.

3. Фторопласт. Матеріали на основі фторопласту, такі як PTFE (політетрафторетилен), відомі своєю високою хімічною стійкістю і можуть бути використані для прокладок у хімічних процесах. Вони володіють хорошою термічною стійкістю та відмінними властивостями антипригарного ковзання.

4. Силіконові прокладки. Силіконові матеріали можуть бути використані в діапазоні температур від низьких до помірних та мають хорошу відповідність для деяких хімічних реагентів.

У нашому випадку вибираємо безасбестовий пароніт. Це модифікований пароніт, який не містить асбесту у своєму складі, але все ще має подібні характеристики і властивості до традиційного пароніту. Він створюється шляхом заміни асбесту іншими волокнами або матеріалами, які не мають канцерогенних властивостей та є менш шкідливими для здоров'я та навколишнього середовища.

3.2 Розрахунки на міцність та стійкість [18–20]

Розрахунок товщини стінки абсорбера.

Визначаємо допустиму напругу $[\sigma]$ за формулою:

$$[\sigma] = \eta \cdot \sigma^*$$

де η – поправковий коефіцієнт, який дорівнює 1;

σ^* – нормативна напруга, яка приймається відповідно до робочих умов експлуатації апарату, МПа; $\sigma^* = 140$ МПа.

Враховуючи, що поздовжні та поперечні шви обечайки сталевих апаратів повинні бути тільки стиковими, та припускаючи двостороннє зварювання, виконане автоматично, приймаємо $\varphi = 1$ (рис. 3.1).

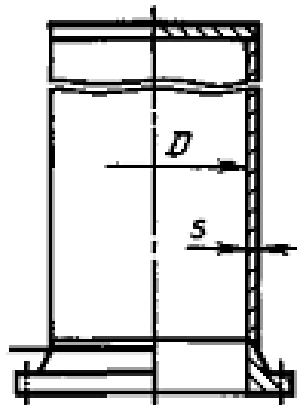


Рисунок 3.1 – Схема стінки обечайки

Розрахунковим приймаємо тиск при гідровипробуванні, який не перевищує величину робочого тиску колони:

$$P_{\text{розр}} = P_{\text{роб}} = 3,2 \text{ ат} = 0,31 \text{ МПа}$$

Розрахунок товщини стінки обечайки апарату виконуємо за формулою:

$$s_p = \frac{P \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - P'}$$

де D – діаметр апарату, м; $D=2,2$ м;

φ_p – коефіцієнт міцності зварного шва, $\varphi_p = 1$

$$s_p = \frac{0,31 \cdot 2,2}{2 \cdot 140 \cdot 1 - 0,31} = 0,0024 \text{ м} = 2,4 \text{ мм}$$

Суму додатків до розрахункової товщини стінки визначаємо по формулі:

$$c=c_1+c_2+c_3,$$

де c_1 – збільшення компенсації корозії, мм:

$$c_1=\Pi \cdot \tau,$$

де Π – глибинний показник швидкості корозії матеріалу; $\Pi=0,1$ мм/рік;

τ – термін експлуатації апарату; $\tau=10$ років.

$$c_1=0,1 \cdot 10=1 \text{ мм.}$$

c_2 – збільшення компенсації мінусового допуску; $c_2=0,5$ мм;

c_3 – збільшення компенсації товщини стінки при технологічних операціях; $c_3=0$.

$$c = 1 + 0,5 + 0 = 1,5 \text{ мм}$$

$$s \geq 2,4 + 1,5 = 3,9 \text{ мм}$$

Приймаємо товщину стінки абсорберу $s=5$ мм.

Визначаємо допустимий надлишковий тиск:

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s - c)}{D + (s - c)}$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 140 \cdot 1 \cdot (0,005 - 0,0015)}{2,2 + (0,005 - 0,0015)} = 0,45 \text{ МПа}$$

$$0,31 \text{ МПа} < 0,45 \text{ МПа}$$

Умова міцності для обичайки виконується.

Розрахунок товщини стінки днища та кришки.

Товщину днища (кришки) визначаємо по формулі:

$$s \geq s_{1p} + c,$$

де s_{1p} – розрахункова товщина стінки, мм:

$$s_{1p} = \frac{P \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - 0,5 \cdot P'}$$

де R – радіус кривизни у вершині днища (кришки), мм:

$$R = \frac{D^2}{4 \cdot H'}$$

де H – висота опуклої частини днища (кришки) без урахування циліндричної частини; для еліптичних днищ та кришок $H = 0,25 \cdot D$ (рис. 3.2).

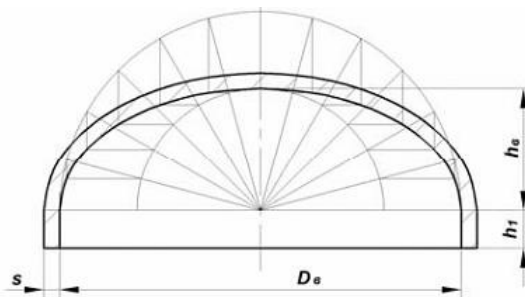


Рисунок 3.2 – Схема еліптичної кришки

$$R = \frac{2,2^2}{4 \cdot 0,25 \cdot 2,2} = 2,2 \text{ м}$$

$$s_{1p} = \frac{0,31 \cdot 2,2}{2 \cdot 140 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,31} = 0,0024 \text{ м} = 2,4 \text{ мм}$$

Приймаємо суму додатків до розрахункової товщини стінки $s=1,5$ мм (див. вище).

$$s \geq 2,4 + 1,5 = 3,7 \text{ мм}$$

Приймаємо $s = 5,0$ мм.

Визначаємо допустимий надлишковий тиск:

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (s_1 - c)}{R + 0,5 \cdot (s_1 - c)}$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 140 \cdot 1 \cdot (0,005 - 0,0015)}{2,2 + 0,5 \cdot (0,005 - 0,0015)} = 0,45 \text{ МПа}$$

$$0,31 \text{ МПа} < 0,45 \text{ МПа}$$

Умова міцності для днища (кришки) виконується.

Розрахунок зміцнення стінок у зоні отворів.

Отвір, який зміцнюється – отвір під штуцер введення газу (рис. 3.3).

Діаметр елемента, який зміцнюється, для циліндричної обичайки дорівнює:

$$D_p = D = 2,2 \text{ м}$$

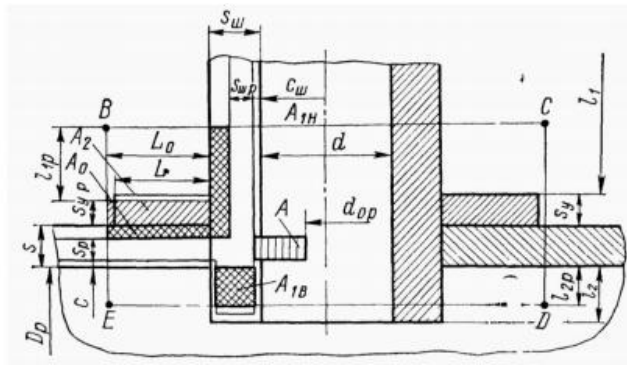


Рисунок 3.3 – Схема до розрахунку зміцнення стінки в зоні отвору

Розрахунковий діаметр отвору в стінці обичайки, за наявності штуцера з круглим поперечним перерізом, вісь якого збігається з нормаллю до поверхні в центрі отвору, обчислюють за формулою:

$$d_p = d + 2 \cdot c_s,$$

де d – внутрішній діаметр штуцера; $d=400$ мм (п. 1.7).

Суму додатків до розрахункової величини товщини штуцера приймаємо $c_s=c=1,5$ мм.

$$d_p = 400 + 2 \cdot 1,5 = 403 \text{ мм}$$

Коефіцієнт міцності, якщо площина, що проходить через поздовжній шов вальцьованого штуцера і вісь цього штуцера, утворюють кут 90° з площиною поздовжнього осевого перерізу циліндричної обичайки $\varphi_1 = 1$.

Розрахункову товщину стінки штуцера, навантаженого як внутрішнім, так і зовнішнім тиском, обчислюємо за формулою:

$$s_{1p} = \frac{P \cdot (d + 2 \cdot c_s)}{2 \cdot [\sigma]_1 \cdot \varphi_1 - P}$$

де $[\sigma]_1$ – допустима напруга для матеріалу зовнішньої частини штуцера;
 $[\sigma]_1=147$ МПа для сталі 20 К.

$$s_{1p} = \frac{0,31 \cdot 0,403}{2 \cdot 147 \cdot 1 - 0,31} = 0,0004 \text{ м} = 0,4 \text{ мм} = 1 \text{ мм}$$

Розрахункову довжину зовнішньої частини круглого штуцера, що бере участь у зміцненні отвору, та враховується під час розрахунку, визначаємо як:

$$l_{1p} = \min \left\{ l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_1 - c_s)} \right\},$$

де l_1 – виконавча зовнішня довжина штуцера, м; $l_1 = 500$ мм;
 s_1 – виконавча товщина стінки штуцера, $s_1=3$ мм.

$$1,25 \cdot \sqrt{(0,4 + 2 \cdot 0,0015) \cdot (0,003 - 0,0015)} = 0,031 \text{ м} = 31 \text{ мм}$$

$$l_{1p} = \min\{500; 31\} = 31 \text{ мм}$$

Розрахункову довжину внутрішньої частини круглого штуцера, що бере участь у зміцненні отвору та враховується під час розрахунку, визначаємо як:

$$l_{3p} = \min \left\{ l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot c_s) \cdot (s_3 - c_s - c_{s1})} \right\},$$

де l_3 – внутрішня виконавча довжина штуцера, $l_3 = 80$ мм;
 s_3 – виконавча товщина внутрішньої стінки штуцера; $s_3 = s_1 = 3$ мм

$$0,5 \cdot \sqrt{(0,4 + 2 \cdot 0,0015) \cdot (0,003 - 0,0015 - 0,001)} = 0,007 \text{ м} = 7 \text{ мм}$$

$$l_{3p} = \min\{80; 7\} = 7 \text{ мм}$$

Ширину зони зміцнення в обичайках , переходах та днищах обчислюємо за формулою :

$$l_0 = \sqrt{D_p \cdot (s - c)}$$

$$l_0 = \sqrt{2,2 \cdot (0,003 - 0,0015)} = 0,057 \text{ м} = 57 \text{ мм.}$$

Розрахункову ширину зони укріплення в стінці обичайки за відсутності тороподібної вставки або вварного кільця визначаємо як:

$$l_p = L_0 = 200 \text{ мм}$$

Розрахункову ширину накладного кільця визначаємо за формулою:

$$l_{2p} = \min \left\{ l_2; \sqrt{D_p \cdot (s_2 + s - c)} \right\},$$

де l_2 – виконавча ширина накладного кільця, мм; $l_2 = 400$ мм;

s_2 – виконавча товщина накладного кільця; $s_2 = 4$ мм.

$$\sqrt{2,2 \cdot (0,004 + 0,003 - 0,0015)} = 0,11 \text{ м} = 110 \text{ мм.}$$

$$l_{2p} = \min \{400; 110\} = 110 \text{ мм.}$$

Відношення допустимих напруг для штуцера:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1,0; \frac{[\sigma]_д}{[\sigma]} \right\}$$

$$\chi_1 = \frac{147}{147} = 1,0$$

Відношення допустимих напруг для накладного кільця приймаємо аналогічно: $\chi_2 = 1,0$.

Відношення допустимих напруг для внутрішньої частини штуцера приймаємо аналогічно: $\chi_3 = 1,0$.

Розрахунковий діаметр отвору, що не вимагає додаткового зміцнення, визначаємо за формулою:

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (s - c)}$$

$$d_{0p} = 0,4 \cdot \sqrt{2,2 \cdot (0,003 - 0,0015)} = 0,23 \text{ м} = 23 \text{ мм}$$

Отвір вважається поодиноким, якщо найближчий до нього отвір не впливає на нього, що має місце, коли відстань між зовнішніми поверхнями штуцерів задовольняє умові:

$$b \geq \sqrt{d_p \cdot (s - c)} + \sqrt{d_p' \cdot (s - c)},$$

де $d_p' = 403$ мм – діаметр найближчого зміцнюваного елемента штуцера.

$$b = 500 \text{ мм}$$

$$\sqrt{0,400 \cdot (0,003 - 0,0015)} + \sqrt{0,403 \cdot (0,003 - 0,0015)} = 0,49 \text{ м} = 49 \text{ мм}$$

$500 > 49$ – умови виконуються.

Обчислюємо допустимий внутрішній надлишковий тиск:

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot K_1 \cdot (s - c)}{D_p + (s - c) \cdot V} \cdot V,$$

де K_1 – коефіцієнт для циліндричної обичайки, $K_1=1$;

V – коефіцієнт зниження міцності.

$$V = \min \left\{ 1; \frac{1 + \frac{l_{1p} \cdot (s_1 - c_s) \cdot \chi_1 + l_{2p} \cdot s_2 \cdot \chi_2 + l_{3p} \cdot (s_3 - c_s - c_{s1}) \cdot \chi_3}{l_p \cdot (s - c)}}{1 + 0.5 \cdot \frac{d_p - d_{0p}}{l_p} + K_1 \cdot \frac{d + 2c_s}{D_p} \cdot \frac{\varphi}{\varphi_1} \cdot \frac{l_{1p}}{l_p}} \right\}$$

$$V = \min\{1; 0,893\} = 0,893$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 147 \cdot 1 \cdot (0,003 - 0,0015)}{2,2 + (0,003 - 0,0015) \cdot 0,893} \cdot 0,893 = 2,2 \text{ МПа}$$

$0,31 \text{ МПа} < 2,2 \text{ МПа}$ – умова виконується

Розрахунок та вибір опори апарата.

Визначаємо вагу колони в робочих умовах за формулою:

$$G_1 = G_p + G_{кр} + G_{дн} + G_T + G_{роб.с} + G_L + G_{м.о} + G_o$$

де G_p – вага робочої частини колони, Н

$$G_p = \pi \cdot D \cdot s \cdot H_p \cdot \rho_{ст} \cdot g$$

де $\rho_{ст}$ – щільність сталі, кг/м^3 ; для марки 12Х18Н10Т $\rho_{ст}=7800 \text{ кг/м}^3$;

H_p – загальна висота робочої частини колони; $H_p=6 \text{ м}$

$$G_p = 3,14 \cdot 2,2 \cdot 0,005 \cdot 6 \cdot 7800 \cdot 9,81 = 15857,59 \text{ Н}$$

$G_{кр}$ – вага кришки, Н

$$G_{кр} = \pi \cdot D \cdot s \cdot H_{кр} \cdot \rho_{ст} \cdot g$$

$$G_{кр} = 3,14 \cdot 2,2 \cdot 0,005 \cdot 0,55 \cdot 7800 \cdot 9,81 = 1453,61 \text{ Н}$$

$G_{дн}$ – вага днища, Н

$$G_{дн} = \pi \cdot D \cdot s \cdot H_{кр} \cdot \rho_{ст} \cdot g$$

$$G_{дн} = 3,14 \cdot 2,2 \cdot 0,005 \cdot 0,55 \cdot 7800 \cdot 9,81 = 1453,61 \text{ Н}$$

G_T – вага тарілок, Н

$$G_T = n \cdot m_T \cdot g,$$

де n – число тарілок в колоні, шт.; $n=13$ шт;

m_T – маса однієї тарілки, кг; для колони діаметром 2,2 м $m_T=105$ кг.

$$G_T = 13 \cdot 225 \cdot 9,81 = 28694,25 \text{ Н}$$

$G_{р.с}$ – вага робочого середовища, Н

$$G_{р.с} = H_{р.с} \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho_{р.с} \cdot g,$$

де $H_{р.с}$ – висота стовпа робочої рідини від нижньої точки днища апарату, м;

$H_{р.с}=2,8$ м.

$\rho_{р.с}$ – густина робочого середовища, кг/м^3 ; $\rho_{р.с}=750$ кг/м^3 .

$$G_{р.с} = 2,8 \cdot \frac{3,14 \cdot 2,2^2}{4} \cdot 750 \cdot 9,81 = 78271,44 \text{ Н.}$$

G_L – вага люків, Н

$$G_L = n_L \cdot m_L \cdot g,$$

де $n_{\text{л}}$ – число люків при даній висоті колони; $n_{\text{л}} = 2$;
 $m_{\text{л}}$ – маса одного люка діаметром 500 мм, кг; $m_{\text{л}}=281$ кг.

$$G_{\text{л}} = 2 \cdot 281 \cdot 9.81 = 5513,22 \text{ Н.}$$

$G_{\text{м.о}}$ – вага майданчика обслуговування, Н:

$$G_{\text{м.о}} = n_{\text{м.о}} \cdot m_{\text{м.о}} \cdot g,$$

де $n_{\text{м.о}}$ – число майданчиків обслуговування, шт.; $n_{\text{м.о}} = 2$
 $m_{\text{м.о}}$ – маса одного майданчика обслуговування, кг:

$$m_{\text{м.о}} = \nu \cdot S_{\text{м.о}}$$

де ν – поверхнева щільність майданчика обслуговування, кг/м².

Маса майданчика обслуговування знаходиться з умови, що один майданчик дорівнює приблизно одній клапанній тарілці.

Маса клапанної тарілки для колони діаметром 2,2 м дорівнює 225 кг.

Тоді поверхнева щільність дорівнює:

$$\nu = \frac{4 \cdot 225}{3,14 \cdot 1^2} = 286,62 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2}$$

$S_{\text{м.о}}$ – площа майданчика обслуговування, м²:

$$S_{\text{м.о}} = \frac{\pi}{4} \cdot (D_{\text{зовн}}^2 - D^2),$$

де $D_{\text{зовн}}$ – зовнішній діаметр майданчика обслуговування, м:

$$D_{\text{зовн}} = D + 2 \cdot s + 2$$

$$D_{\text{зовн}} = 2,2 + 2 \cdot 0,005 + 2 = 4,21 \text{ м}$$

$$S_{\text{м.о}} = \frac{3,14}{4} \cdot (4,21^2 - 2,2^2) = 10,11 \text{ м}^2$$

$$m_{\text{м.о}} = 286,62 \cdot 10,11 = 2897,73 \text{ кг}$$

$$G_{\text{м.о}} = 2 \cdot 2897,73 \cdot 9,81 = 56853,46 \text{ Н}$$

G_o – вага опорної обичайки, Н:

$$G_o = \pi \cdot D \cdot s \cdot H_o \cdot \rho_{\text{ст}} \cdot g,$$

$$G_{\text{оп}} = 3,14 \cdot 2,2 \cdot 0,005 \cdot 2 \cdot 7800 \cdot 9,81 = 5285,86 \text{ Н}$$

Знаходимо суму ваги всіх елементів колони:

$$G_1 = 15857,59 + 1453,61 + 1453,61 + 28694,25 + 78271,44 + 5513,22 \\ + 56853,46 + 5285,63 = 193382,81 \text{ Н}$$

Приймаємо кількість опор $Z_o = 6$

Навантаження на одну опору складе:

$$G_0 = \frac{\sum G_i}{Z_o} = \frac{193382,81}{6} = 32230,47 \text{ Н} = 0,03223 \text{ МН}$$

Приймаємо циліндричну опору (типу 2 з зовнішніми стійками під болти рис. 3.4) колонних пристроїв зі приведеним мінімальним навантаженням 0,125 МН і максимальним навантаженням 0,25 МН.

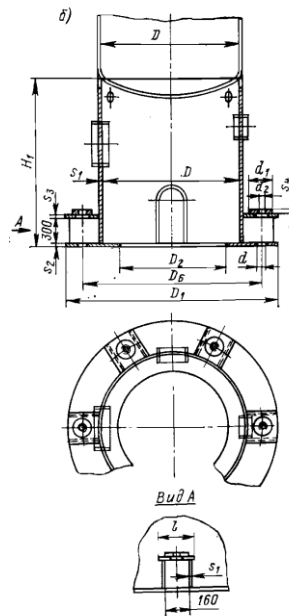


Рисунок 3.4 – Конструкція стандартної циліндричної опори тип 2

Параметри опори:

- висота опорної оболонки $H_1 = 2$ м;
- товщина опорної оболонки $S_1 = 6$ (мм);
- товщина опорного кільця $S_2 = 20$ (мм);
- товщина опори (лап):

$$S_4 \geq 0,5S_2 = 0,5 \cdot 20 = 10 \text{ (мм);}$$

- висота опори (лап) $h = 0,3$ м;
- ширина опори:

$$l = 160 + 4S_1 = 160 + 4 \cdot 6 = 184 \text{ мм;}$$

- діаметри $d = 60$ мм, $d_1 = 90$ мм, $d_2 = 28$ мм, $d_b = M24$.
- діаметр опори (зовнішній діаметр кільця: $D_1 = 2480$ мм; діаметр кола болта: $D_B = 2360$ м; внутрішній діаметр кільця: $D_2 = 2440$ м.)

Вага майданчика в умовах гідровипробування:

$$G_2 = G_1 - G_{p.c} + \rho_B \cdot V_K \cdot g,$$

де V_K – об'єм колони, що заповнюється водою при гідровипробуванні, м³:

$$V_K = \frac{\pi \cdot D^3}{24} + \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H_B$$

$$V_K = \frac{3,14 \cdot 2,2^3}{24} + \frac{3,14 \cdot 2,2^2}{4} \cdot 8 = 34,58 \text{ м}^3$$

$$G_2 = 193382,81 - 78271,44 + 1000 \cdot 34,58 \cdot 9,81 = 454341,17 \text{ Н}$$

Максимальне навантаження від власної ваги в умовах монтажу:

$$G_3 = G_1 - G_{p.c} = 193382,81 - 78271,44 = 115111,37 \text{ Н}$$

Мінімальне навантаження від власної ваги в умовах монтажу (після встановлення колони у вертикальне положення):

$$G_4 = G_K + G_{кр} + G_{дн} + G_{л} + G_o$$

$$G_4 = 339229,8 + 1453,61 + 1453,61 + 5513,22 + 5285,63 = 352935,87 \text{ Н}$$

Визначимо розрахункові зусилля від вітрових та сейсмічних впливів при робочих умовах.

Період основного тону власних коливань апарату:

$$T^{(1)} = 2 \cdot \pi \cdot H \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^s (G_i^{(1)} \cdot \alpha_i^2)}{g \cdot \left(\frac{H}{2 \cdot E \cdot I_1} \cdot \gamma + \frac{1}{C_F \cdot I_F} \right)}}$$

де E – модуль поздовжньої пружності матеріалу при розрахунковій температурі, Па; $E = 1,9 \cdot 10^{11}$ Па;

C_F – коефіцієнт нерівномірності стиснення ґрунту, Н/м³; $C_F = 6 \cdot 10^7$ Н/м³;

I_F – мінімальний момент інерції підосви фундаменту м⁴:

$$I_F = \frac{\pi}{64} \cdot D_F^4$$

де D_F – діаметр підосви фундаменту, м:

$$D_F = D_{\text{зовн.к}} + 1$$

де $D_{\text{зовн.к}}$ – зовнішній діаметр фундаментного кільця, м:

$$D_{\text{зовн.к}} = D_{\text{зовн}} \cdot (1 + 1,35 \cdot K_0),$$

де $D_{\text{зовн}}$ – зовнішній діаметр опорної обичайки, м, $D_{\text{зовн}} = 2,22$ м

K_0 – довідковий коефіцієнт; $K_0 = 0,063$

$$D_{\text{зовн.к}} = 2,22 \cdot (1 + 1,35 \cdot 0,063) = 2,409 \text{ м}$$

$$D_F = 2,409 + 1 = 3,409 \text{ м}$$

$$I_F = \frac{\pi}{64} \cdot 3,409^4 = 6,626 \text{ м}^4$$

I_1 – момент інерції верхнього основного металевого перерізу щодо центральної осі, м⁴:

$$I_1 = \frac{\pi}{64} \cdot ((D + 2 \cdot \varepsilon)^4 - D^4)$$

$$I_1 = \frac{3,14}{64} \cdot ((2,2 + 2 \cdot 0,01)^4 - 2,2^4) = 0,042 \text{ м}^4$$

γ – безрозмірний коефіцієнт:

$$\gamma = \frac{2}{H^3} \cdot \left(H_1^{*3} \cdot (\Delta^* + \lambda) + H_2^* \cdot \mu + 2 \cdot \frac{I_1}{I_3} \cdot H_1^* \cdot H_2^* \cdot H_3^* \right)$$

де H_1^* , H_2^* , H_3^* – висоти верхньої, нижньої частин колони, а також висота опори (рис. 3.5), м: $H_1^* = 5,2$ м; $H_2^* = 2,8$ м; $H_3^* = 2$ м.

Δ^* , – безрозмірний коефіцієнт:

$$\Delta^* = \frac{1}{3} + \frac{I_1}{I_2} \cdot \frac{H_2^*}{H_1^*} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{H_2^*}{H_1^*} \right)^2 + \frac{H_2^*}{H_1^*} + 1 \right),$$

де I_2 – момент інерції нижнього основного металевого перерізу щодо центральної осі:

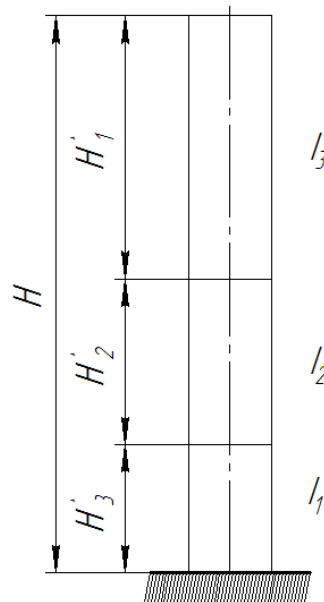


Рисунок 3.5 – Основні перерізи апарату

$$I_2 = \frac{3,14}{64} \cdot ((2,2 + 2 \cdot 0,01)^4 - 1,4^4) = 0,042 \text{ м}^4.$$

$$\Delta^* = \frac{1}{3} + \frac{0,042}{0,042} \cdot \frac{2,8}{5,2} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2,8}{5,2} \right)^2 + \frac{2,8}{5,2} + 1 \right) = 1,21$$

$$\lambda = \frac{I_1}{I_3} \cdot \frac{H_3^*}{H_1^*} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{H_3^*}{H_1^*} \right)^2 + \frac{H_3^*}{H_1^*} + 1 \right),$$

де I_3 – момент інерції металевого перерізу опори щодо центральної осі,
 $I_3 = I_2 = 0,042 \text{ м}^4$.

$$\lambda = \frac{0,042}{0,042} \cdot \frac{2}{5,2} \cdot \left(\frac{1}{3} \cdot \left(\frac{2}{5,2} \right)^2 + \frac{2}{5,2} + 1 \right) = 0,55$$

$$\mu = \frac{I_1}{I_3} \cdot \frac{H_3^*}{H_2^*} \cdot \left(\frac{H_3^*}{H_2^*} + 1 \right)$$

$$\mu = \frac{0,042}{0,042} \cdot \frac{2}{2,8} \cdot \left(\frac{2}{2,8} + 1 \right) = 1,22$$

Звідси знаходимо γ :

$$\gamma = \frac{2}{8^3} \cdot \left(5,2^3 \cdot (1,21 + 0,55) + 2,8 \cdot 1,22 + 2 \cdot \frac{0,042}{0,042} \cdot 5,2 \cdot 2,8 \cdot 2 \right) = 1,21$$

α_i – відносне переміщення центрів ваги ділянок, $1/(H \cdot m)$:

$$\alpha_i = \gamma \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_1} \cdot \beta_i + \frac{\chi_i}{H \cdot C_F \cdot I_F},$$

де β_i – коефіцієнт координат перерізу.

Значення коефіцієнтів, координат середин ділянок і розрахованих відносних переміщень наведено в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Значення коефіцієнтів та відносних переміщень

$x_i, \text{м}$	9,03	4,52	1,51
β_i	0,66	0,13	0,0025
$\alpha_i \cdot 10^9, \frac{1}{\text{Н} \cdot \text{м}}$	9,316	5,642	2,816

Звідси знаходимо:

$$T^{(1)} = 2 \cdot \pi \cdot 8 \cdot \sqrt{\frac{10^{-11} \cdot (9,316^2 \cdot 26269,88 + 5,642^2 \cdot 52050,23 + 2,316^2 \cdot 8463,23)}{9,81 \cdot \left(\frac{8}{2 \cdot 1,902 \cdot 10^{11} \cdot 0,042} \cdot 0,605 + \frac{1}{6 \cdot 10^7 \cdot 6,626} \right)}} = 0,931 \text{ с}$$

Нормативні значення статичної складової вітрового навантаження на середині i -ої ділянки апарату:

$$q_{ст} = q_0 \cdot \theta_i \cdot K,$$

де q_0 – швидкісний напір вітру, згідно з вітровим районом II; $q_0=300 \text{ Н/м}^2$;
 θ_i – коефіцієнт, що враховує зміну швидкісного напору за висотою:

$$\theta_i = \left(\frac{x_i}{10} \right)^{0,31}$$

$$\theta_1 = \left(\frac{9,03}{10} \right)^{0,31} = 0,97$$

$$\theta_2 = \left(\frac{4,52}{10} \right)^{0,31} = 0,78$$

$$\theta_3 = \left(\frac{1,51}{10} \right)^{0,31} = 0,56$$

де K – аеродинамічний коефіцієнт; $K=0,7$

$$q_{1ст} = 300 \cdot 0,97 \cdot 0,7 = 203,7 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

$$q_{2ст} = 300 \cdot 0,78 \cdot 0,7 = 163,8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

$$q_{3ст} = 300 \cdot 0,56 \cdot 0,7 = 117,6 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

Статична складова вітрового навантаження на i -й ділянці:

$$P_{іст} = q_{іст} \cdot D_i \cdot h_i$$

де D_i – зовнішній діаметр i -ої ділянки колони;

h_i – висота i -ої ділянки колони, м.

$$P_{1ст} = 203,7 \cdot 2,22 \cdot 5,2 = 2351,51 \text{ Н}$$

$$P_{2ст} = 163,8 \cdot 2,22 \cdot 2,8 = 1018,18 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

$$P_{3ст} = 117,6 \cdot 2,22 \cdot 2 = 522,14 \text{ Н}$$

Динамічна складова вітрового навантаження на i -й ділянці:

$$P_{ідин} = v \cdot G_i^{(1)} \cdot \xi \cdot \eta_i,$$

де v – коефіцієнт кореляції пульсації тиску вітру:

$$v = 0,968 - 0,025 \cdot \sqrt{H}$$

$$v = 0,968 - 0,025 \cdot \sqrt{8} = 0,897$$

ζ – коефіцієнт динамічності при вітровому навантаженні:

$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot \varepsilon},$$

де ε – параметр:

$$\varepsilon = \frac{T \cdot \sqrt{q_0}}{790} = \frac{0,93 \cdot \sqrt{300}}{790} = 0,02$$

$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot 0,02} = 1,662$$

η_i – наведене відносне прискорення центру тяжкості i -ої ділянки:

$$\eta_i = \alpha_i \cdot \frac{\sum_{k=1}^x \alpha_k \cdot m_k \cdot P_{kst}}{\sum_{k=1}^x (G_k^{(1)} \cdot \alpha_k^2)}$$

де m_k – коефіцієнт пульсації швидкісного напору середини k -ої ділянки:

$$m_k = \left(\frac{x_k}{10} \right)^{-0,15}$$

$$m_1 = \left(\frac{9,03}{10} \right)^{-0,15} = 1,02$$

$$m_2 = \left(\frac{4,52}{10} \right)^{-0,15} = 1,13$$

$$m_3 = \left(\frac{1,51}{10} \right)^{-0,15} = 1,33$$

Результати розрахунків зведено в табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків

$\alpha_i \cdot 10^9, (1/(H \cdot m))$	9,316	5,642	2,816
η_i	0,12	0,073	0,036

Таким чином, знаходимо:

$$P_{1\text{дин}} = 0,842 \cdot 26269,88 \cdot 1,662 \cdot 0,12 = 4415,73 \text{ Н}$$

$$P_{2\text{дин}} = 0,842 \cdot 51050,23 \cdot 1,662 \cdot 0,073 = 5197,53 \text{ Н}$$

$$P_{3\text{дин}} = 0,842 \cdot 8463,23 \cdot 1,662 \cdot 0,036 = 430,08 \text{ Н}$$

Загальне вітрове навантаження на і-й ділянці:

$$P_i = P_{\text{іст}} + P_{\text{ідин}}$$

$$P_1 = 2351,51 + 4415,73 = 6767,24 \text{ Н}$$

$$P_2 = 1018,18 + 5197,53 = 6215,71 \text{ Н}$$

$$P_3 = 522,14 + 430,08 = 952,22 \text{ Н}$$

Згинальний момент у розрахунковому перерізі висоти від дії вітрового навантаження на обслуговуючий майданчик:

$$M_{\text{в}} = K \cdot q_0 \cdot \theta_j \cdot (x_j - x_0) \cdot (1 + 0,75 \cdot \zeta \cdot \chi_j \cdot m_j) \cdot A_j$$

де A_j – площа, обмежена контуром j -го майданчика, $A_j, \text{м}^2$:

$$A_j = (D_{\text{жк}} + 2 \cdot s + 2 \cdot s_{\text{мерил.ш}} + 2,6) \cdot h_{\text{пл.обсл}}$$

де $h_{\text{пл.обсл}}$ – висота профілю майданчика обслуговування, м.

Усі майданчики обслуговування знаходяться в робочій частині колони, отже величина площі, обмеженої контуром майданчика, буде однаковою для всіх майданчиків $h_{\text{м.о}} = 1,01$

$$A = (2,2 + 2 \cdot 0,01 + 2 \cdot 0,10 + 2,6) \cdot 1,01 = 5,07 \text{ м}^2$$

χ_j – коефіцієнт:

$$\chi_j = 1,56 \cdot \left(\frac{\chi_j}{H}\right)^{1,6}$$

$$\chi_1 = 1,56 \cdot \left(\frac{5,2}{8}\right)^{1,6} = 0,78$$

$$\chi_2 = 1,56 \cdot \left(\frac{2,8}{8}\right)^{1,6} = 0,29$$

$$\chi_3 = 1,56 \cdot \left(\frac{2}{8}\right)^{1,6} = 0,17$$

Розраховані значення наведено в табл. 3.3.

Загальний згинальний момент у розрахунковому перерізі на висоті визначається за формулою:

$$M_v = \sum_{i=1}^z (F_i \cdot (x_i - x_0)) + \sum_{j=1}^m (M_{\psi_j})$$

Таблиця 3.3 – Зведена таблиця результатів

Параметр	Значення x_{13}	Значення x_{12}	Значення x_{11}
$x_i, \text{м}$	9,03	4,51	1,51
θ_i	0,97	0,78	0,56
m_i	1,02	1,13	1,33
χ_i	0,78	0,29	0,17
$M_{vj} \cdot 10^4, \text{Н} \cdot \text{м}$ для перерізу W – W	5,329	3,012	0
$M_{vj} \cdot 10^4, \text{Н} \cdot \text{м}$ для перерізу Z – Z	2,317	1,987	0
$M_{vj} \cdot 10^4, \text{Н} \cdot \text{м}$ загальний	3,398	1,904	1,066

Напругу в суцільному зварному шві, що кріпить корпус апарату до циліндричної опорної частини, визначають у небезпечному перерізі W – W:

$$\sigma_c = (Q_{\max} / F_c) + (M' / W_c)$$

f_c – площа небезпечного перерізу шва, для кола діаметром 2,2 м дорівнює:

$$f_c = \pi \cdot D_{\text{зовн}}^2 / 4$$

$$f_c = 3,14 \cdot 2,22^2 / 4 = 3,87 \text{ м}^2$$

W_c – момент опору зварного шва згину, прийmemo рівним 0,4;

Q_{\max} – вага апарату при гідровипробуванні, знайдений раніше 352935,87 Н;

M – згинальний момент щодо перерізу зварного шва від вітрових та ексцентрично доданих масових навантажень, що діють вище зварного шва:

$$\sigma_c = (m_{\max} / F_c) + (M' / W_c)$$

Підставивши дані, отримаємо:

$$\sigma_c = (352935,87/3,87) + (3,398.104/0,4) = 5,024 \text{ МПа}$$

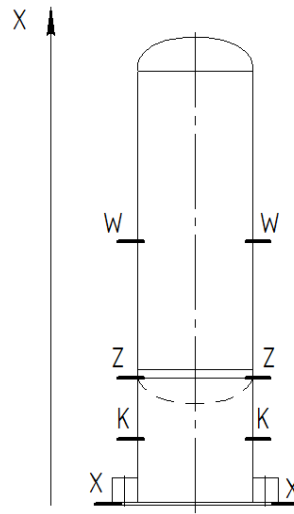


Рисунок 3.6 – Розташування розрахункових перерізів

Напруга в зварному шві під час роботи на зріз:

$$\sigma_c \leq 0,8 \cdot \varphi \cdot [\sigma]$$

$[\sigma] = 108$ – допустима напруга розтягування для основного металу,

$\varphi = 0,8$ – коефіцієнт міцності зварного шва.

$$\sigma_c \leq 0,8 \cdot 108 \cdot 0,8 = 69,12 \text{ МПа,}$$

$5,024 \text{ МПа} \leq 69,12 \text{ МПа}$ – конструкція стійка

4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА

4.1 Обґрунтування компоновання основного та допоміжного обладнання [21]

За функціональним призначенням промислові будівлі поділяють на декілька категорій в залежності від їхнього призначення та функціональних завдань:

1. Виробничі будівлі. Ці будівлі призначені для виробництва готової продукції або напівфабрикатів. Вони можуть включати в себе цехи, лінії виробництва, обладнання та приміщення для виробничого процесу.

2. Підсобно-виробничі будівлі. Ця категорія включає в себе будівлі для експериментів, інструментальні майстерні, ремонтні майстерні та інші приміщення, які служать для підтримки виробничого процесу.

3. Енергетичні будівлі. Сюди входять будівлі та споруди, призначені для енергопостачання підприємства, такі як котельні, теплоелектроцентрали (ТЕЦ), компресорні станції та інші енергетичні об'єкти.

4. Складські та транспортні будівлі. Ці споруди використовуються для зберігання сировини, готової продукції, транспортування товарів та інших логістичних функцій.

5. Санітарно-технічні будівлі. Сюди входять насосні станції, очисні споруди та інші об'єкти, які служать для забезпечення санітарних та технічних потреб.

6. Допоміжні будівлі. Ця категорія включає в себе приміщення для керівництва підприємством, конструкторські бюро, медичні пункти та навчальні приміщення.

Правильне розміщення обладнання є дуже важливим. Саме компоновання має безпосередній вплив на ключові аспекти безпечної і ефективної експлуатації промислових об'єктів.

Оптимізація процесу. Перш за все, слід ретельно розробити процес переробки нафти і визначити оптимальний порядок операцій та послідовність

роботи установки. Це може включати в себе розділення фракцій, конденсацію, крекінг, гідроочищення і інші процеси. Важливо розміщувати обладнання так, щоб забезпечити ефективність цих операцій.

Безпека. Безпека перш за все. Установку слід компонувати так, щоб забезпечити належну вентиляцію, доступ до систем пожежогасіння, дотримання вимог щодо уникнення викидів та можливостей для рятування в разі аварійних ситуацій.

Технічний контроль. Забезпечення можливості технічного контролю та обслуговування обладнання – це важливий аспект. Обладнання повинно бути розташовано так, щоб фахівці могли легко здійснювати інспекції, обслуговування та ремонт в разі необхідності.

Ефективність використання простору. Оптимізація використання простору може зменшити витрати на будівництво та експлуатацію. Розташування обладнання повинно дозволити максимально використовувати наявний простір.

Економічність. Важливо враховувати економічні аспекти при компонуванні обладнання. Оптимізація розташування обладнання і систем підйому/транспортування може зменшити витрати на будівництво та експлуатацію.

Спрощення процесів. При компонуванні обладнання слід думати про спрощення процесів та мінімізацію зайвих операцій. Це може покращити продуктивність та знизити витрати.

Доступність та логістика. Розміщення обладнання слід планувати з урахуванням можливостей постачання матеріалів та транспортування виробленої продукції.

Обираючи варіант розташування обладнання на відкритому майданчику, ми враховуємо ряд ключових факторів, які дозволять забезпечити оптимальні умови для газопереробного виробництва. Використання відкритого майданчика дозволяє нам раціонально розташувати обладнання та інфраструктуру, що може сприяти значній економії при будівництві нашого підприємства. Відкритий майданчик забезпечує зручний доступ для монтажу нового обладнання та

проведення ремонтних робіт. Це дозволить нам ефективно виконувати роботи з технічного обслуговування та знизити витрати на них.

Компонування на відкритому майданчику дозволяє ефективно розсіювати викиди газів та тепловиділення, що сприяє зменшенню їхнього впливу на навколишнє середовище та забезпечує дотримання екологічних норм. Відкритий майданчик дозволяє ефективно контролювати вибухи та пожежі, які можуть виникнути на виробництві, а також залишає простір для майбутнього розширення виробничих потужностей та об'єктів, що сприяє динамічному розвитку підприємства.

При обранні розташування обладнання на відкритому майданчику, важливо дотримуватися рекомендацій та керуватися технічними нормами і стандартами безпеки. Ось докладніші вказівки щодо розташування обладнання:

1. Розміщення важкого обладнання. Бажано розташовувати важке і габаритне обладнання на позначці землі, оскільки це забезпечить стійкість та надійність під час експлуатації. Важливо враховувати необхідність високопрочних опорних конструкцій.

2. Використання залізобетонних опор. Для опорних пристроїв рекомендується використовувати типові конструкції залізобетону. Вони відомі своєю міцністю та стійкістю до навантажень і погодних умов.

3. Максимізація несучої здатності стінок. Для великогабаритних апаратів можна максимально використовувати несучу здатність їхніх стінок. Це може включати встановлення етажерок, сходів і майданчиків для обслуговування. Такий підхід дозволить оптимізувати простір і полегшити доступ до обладнання.

4. Розташування на нульовій позначці щодо фундаменту. Усе обладнання слід розміщувати на нульовій позначці щодо загального (групового) фундаменту. Це спрощує процес монтажу та обслуговування.

5. Індивідуальні фундаменти для окремих об'єктів. Ємності, насоси і теплообмінне обладнання, які вимагають додаткової стійкості і стабільності, можуть бути розташовані на індивідуальних фундаментах. Це забезпечить надійну підтримку для цих об'єктів.

Також розміщення обладнання на відкритих майданчиках має враховувати ряд важливих вимог та рекомендацій з метою забезпечення безпеки, зручності обслуговування та ефективності робочих процесів:

Проходи та безпека. Передбачте наявність проходів між обладнанням, щитами і конструкціями таким чином, щоб забезпечити безпечний доступ для обслуговування обладнання, рух людей і транспорту. Мінімальна ширина проходів між найвиступнішими частинами обладнання, щитами і конструкціями повинна бути не менше 1 метра. Це сприяє запобіганню заторам і забезпечує швидкий доступ у разі аварій.

Вібрація та шум. Технологічне обладнання, яке створює вібрацію і шум на робочих місцях, рекомендується встановлювати на спеціальних фундаментах і амортизаторах. Це допомагає знизити вплив вібрації та шуму на працівників і забезпечує комфортні умови роботи.

Групування обладнання. Під час розміщення обладнання рекомендується виділяти групи апаратів, які мають спільні ознаки або призначення. Це сприяє організації робочих зон і полегшує обслуговування. Наприклад, апарати однієї технологічної лінії можуть бути розташовані поруч для зменшення витрат часу на переміщення працівників.

Враховуючи ці вимоги та рекомендації, можна створити безпечну та ефективну робочу обстановку на відкритому майданчику, що сприятиме надійній роботі обладнання та підвищить загальну продуктивність.

4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання [22, 23]

Монтаж колонних апаратів в промислових об'єктах може бути складним процесом, і встановлення апаратів на відкритому майданчику на відмітках від землі вимагає певних технічних і організаційних підходів. Важливо забезпечити надійний монтаж та безпеку на всіх етапах робіт.

Також, контрольні зборки, маркування та ризики для легшого монтажу – це дуже важливі елементи, які спрощують процес монтажу та забезпечують правильне з'єднання деталей. Важливо дотримуватися всіх стандартів та безпечних практик під час монтажу, особливо в контексті промислових споруд, де безпека і надійність грають критичну роль.

При необхідності розбирання апарата для транспортування, це також вимагає великої уваги до деталей та правильної документації для збирання на монтажному майданчику. Такий підхід спрощує роботу монтажних бригад та зменшує ризики пошкодження або помилок під час монтажу.

Проектування трубопроводів є важливим етапом в процесі створення хімічного обладнання та інженерних систем для транспортування і обробки різних речовин. Виправлення трубопроводів має бути грамотно відпрацьоване для забезпечення безпеки, ефективності та надійності експлуатації.

Під час розробки схеми трубопроводів важливо враховувати фізико-хімічні властивості речовин, які будуть транспортуватися, а також дані, отримані на етапі розрахунку апаратного оформлення процесу. Це дозволяє правильно підібрати матеріали труб, їх діаметри, тиск та температурний режим.

Залежно від призначення та характеристик перекачуваних речовин, трубопроводи поділяються на групи. Це важливо для визначення вимог до матеріалів та безпекових заходів. Зокрема, група I включає трубопроводи для небезпечних речовин, група II – для менш небезпечних, і група III – для інших речовин.

При трасуванні трубопроводів важливо враховувати низку факторів, таких як ефективність, безпека, зручність обслуговування і т. д. Пряма прокладка «від штуцера до штуцера» допускається лише у виняткових випадках, коли інші варіанти неможливі. Шлангові труби слід прокладати так, щоб вони були якнайкоротшими і не перетинали обслуговуючі майданчики апарату.

Треба враховувати технологічні особливості об'єкта і процесу. Наприклад, шланги мають бути розташовані з урахуванням можливих вібрацій та впливу токсичних речовин.

Правила трасування трубопроводів є важливими для забезпечення безпеки та ефективності експлуатації систем транспортування різних речовин:

1. Розміщення в одному пучку. Трубопроводи мають бути розташовані в одному пучку, де перетини труб мають просту форму, такі як горизонтальні або вертикальні ряди. Це дозволяє легше обслуговувати фланцеві з'єднання та інші пристрої.

2. Гарячі трубопроводи. Гарячі трубопроводи, які працюють при підвищених температурах, мають бути розміщені на відстані 3-5 діаметрів труби. Для компенсації температурних напружень на довгих гарячих трубопроводах може бути необхідно використовувати П-подібні ділянки.

3. Запобігання гідравлічним ударам. Для запобігання гідравлічним ударам на довгих трубопроводах слід передбачити можливість відведення рідини з мішків. На газопроводах також необхідно встановлювати дренажні трубки для відведення конденсату.

4. Теплоізоляція. При необхідності, трубопроводи повинні бути теплоізовані. Це допомагає підтримувати температурний режим роботи і запобігає втраті тепла.

Використання монтажних стендів і упорів для підйому та установки окремих блоків апарату є важливим елементом. Це допомагає забезпечити рівномірний підйом і уникнути пошкоджень під час монтажу. Розроблення конкретного технологічного процесу для монтажу кожного апарату є важливим. Враховуючи вагу та розміри апаратів, такі процеси повинні бути ретельно сплановані.

Монтаж апаратів на великих висотах вимагає додаткових заходів безпеки та засобів захисту. Робочі площадки, засоби захисту від падіння та інші заходи повинні бути введені для забезпечення безпеки працівників.

Спочатку апарат збирається із окремих блоків, які можуть бути виготовлені завчасно в інших локаціях або майстернях. Це дозволяє зменшити час монтажу на місці та знизити витрати на працю. Приварювання опори після збирання апарата з блоків забезпечує правильне позиціонування апарата та його стійкість. Важливо впевнитися, що опора правильно вирівнює апарат і витримує необхідні навантаження. Підтягування частин апарата один до одного трубоукладачами або тракто-

рами є важливим кроком для забезпечення точності і герметичності з'єднань. Це допомагає уникнути витоків та інших проблем.

Приварювання напрямних планок для збігу стиків (рис. 4.1) є важливим для забезпечення точності та стійкості апарата. Після прихватки стику короткими звареними швами і вирізання зайвих частин газокисневим різанням створюється рівна та гладка поверхня.

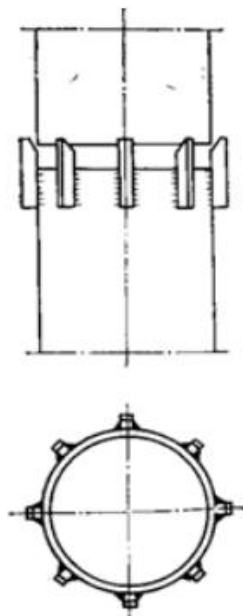


Рисунок 4.1 – Стиковка обичайок

Під час монтажу важливо проводити контроль якості всіх етапів, включаючи збирання блоків, приварювання опори та приварювання напрямних планок. Це допомагає уникнути дефектів та забезпечити безпеку та ефективність апарата.

Для підняття колонного апарата використовуються вантажопідйомні механізми, такі як стрілові крани та щогли. Важливо, щоб ці механізми були належно підготовлені та перевірені на безпеку перед початком монтажу. Для забезпечення безпеки під час підняття обладнання використовують сталеві стропи або ланцюги. Стропування повинно бути виконано з великою увагою до деталей та навантажень, щоб уникнути пошкоджень апарата.

Для забезпечення стабільності апарата, його фіксують в горизонтальному положенні за допомогою кутків або швелерів, які закріплюються внизу апарату. Це допомагає уникнути перекосів та забезпечити правильне положення. Під час

монтажу важливо проводити контроль якості усіх етапів, зокрема стропування, фіксації та підняття. Такий контроль допомагає уникнути потенційних проблем та небезпеки.

Весь процес монтажу повинен виконуватися відповідно до стандартів безпеки. Робочий персонал повинен бути підготовлений до виконання таких операцій, і необхідно вживати всі необхідні заходи для уникнення травм і аварій.

Встановлення колонного апарату в проектне положення – це завдання, яке може бути дуже складним і вимагати використання різних методів і обладнання в залежності від габаритних розмірів, маси та інших параметрів апарату. Розглянемо два основні методи підйому – це ковзання та поворот навколо шарніру (рис. 4.2).

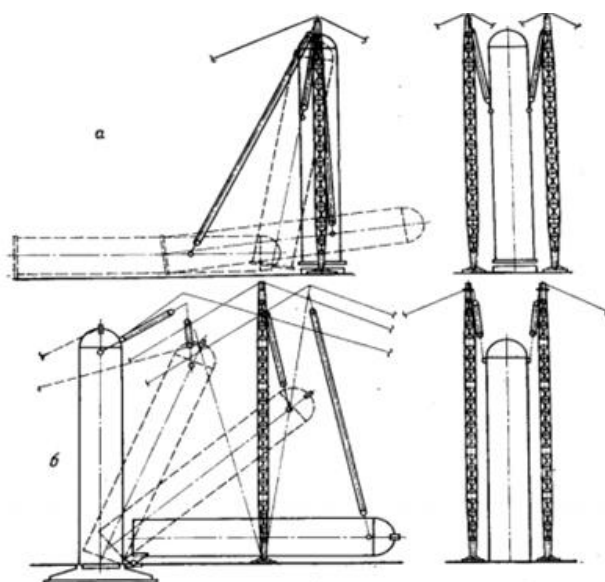


Рисунок 4.2 – Способи підйому колонного апарату:

а – способом ковзання опорної частини; б – поворотом навколо шарніру

Ковзання (склізання). Цей метод використовується для підняття важкого обладнання, такого як колонні апарати, вздовж горизонтальної поверхні. Для цього створюють спеціальну платформу або конструкцію, яка дозволяє обладнанню ковзати. Зазвичай, використовуються великі ковзаючі бруски або валки, що дозволяють здійснити плавний рух вздовж горизонталі.

Поворот навколо шарніру. Цей метод використовується для повороту апарату навколо вертикальної осі. Висота шарніру зазвичай визначається габаритними розмірами та масою апарату. Після підняття апарату він поворачується навколо цього шарніру для досягнення правильного положення.

Абсорбери можуть піддаватися різноманітним пошкодженням з часом, які можна визначити шляхом систематичного обстеження та діагностики. Наведемо основні види пошкоджень та загальні правила щодо їх ремонту в абсорберах:

1. Корозія. Корозія може призвести до утворення корозійних відкладень на внутрішній поверхні абсорбера. Під час ремонту необхідно видалити корозійні відкладення та обробити пошкоджені ділянки антикорозійними засобами. Іноді вимагається заміна пошкоджених частин.

2. Абразія. Абразивні частки у рідині чи газі можуть призводити до абразії внутрішніх поверхонь абсорбера. Необхідно видалити абразивні частки та відновити пошкоджені ділянки. Застосування антиабразивних матеріалів може зменшити ризик подібних пошкоджень у майбутньому.

3. Корозійно-механічні пошкодження. Об'єднання корозії та механічних впливів може призводити до утворення тріщин та виразок. Залежно від ступеня пошкодження, може знадобитися заміна пошкоджених частин, а також проведення робіт з антикорозійного захисту.

4. Втрати герметичності. Пошкодження ущільнень або з'єднань може викликати витік рідини чи газу. Заміна ущільнень, відновлення з'єднань та проведення герметичних випробувань для перевірки ефективності ущільнення.

5. Забруднення тарілок. Забруднення тарілок може призвести до зменшення ефективності абсорбції через обмеження поверхні контакту між рідиною та газом. Необхідно видалити забруднення та, за необхідності, провести очищення або заміну тарілок.

6. Втрата ефективності абсорбенту. Зміни у властивостях абсорбенту можуть виникнути через взаємодію з іншими речовинами або внаслідок термічних впливів. Необхідно провести аналіз та, можливо, заміну або поновлення абсорбенту відповідно до проектних параметрів.

Ремонт тарілчастого абсорбера з клапанними тарілками включає в себе кілька ключових етапів та особливостей. По-перше, це діагностика та оцінка пошкоджень. Початковий етап включає в себе визначення причин пошкодження або несправностей клапанних тарілок. Діагностика може включати в себе візуальний огляд, вимірювання параметрів роботи та, за необхідності, використання додаткових інструментів, таких як відеоінспекція або рентгенографія.

Зняття тарілок для детального огляду та ремонту. Це може включати в себе видалення клапанів, перевірку стану ущільнень та виявлення будь-яких механічних пошкоджень. Пошкоджені або зношені клапани повинні бути замінені новими екземплярами. Забезпечення належної герметичності та правильного руху клапанів є ключовим аспектом цього етапу.

Важливо перевірити герметичність всіх з'єднань та ущільнень, щоб уникнути витoku рідини чи газу. Після зборки важливо перевірити та налаштувати різноманітні параметри, такі як тиск, температура та інші, для забезпечення оптимальної ефективності абсорбера.

Після виконання всіх ремонтних робіт та тестів, тарілки з клапанними механізмами повертають на свої місця в абсорбері.

Важливо зазначити, що ремонт тарілчастого абсорбера вимагає досвіду та фаховості, оскільки неправильний ремонт може призвести до витoku або нестабільності процесу абсорбції. Дотримання стандартів безпеки та відповідних технічних рекомендацій є важливими частинами процедури ремонту.

5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу [24]

Контрольовані параметри під час очищення газу від дихлоретану в тарілчастій колоні можуть включати різні фізичні, хімічні та технологічні параметри для забезпечення ефективного функціонування процесу та досягнення заданих цілей.

Точне вимірювання концентрації дихлоретану в вхідному газі є дуже важливим для ефективного очищення газу від дихлоретану і керування процесом абсорбції. Для цього використовуються різні методи і прилади.

Газові аналізатори, включаючи газові хроматографи, є одними з найточніших і найпоширеніших методів вимірювання концентрації дихлоретану в газовій фазі. Ці прилади розділяють компоненти газу і визначають їхню концентрацію за допомогою детекторів, таких як теплові або електронні детектори.

Електрохімічні сенсори – це електронні прилади, які реагують на наявність дихлоретану в газовому потоці та генерують сигнал. Вони широко використовуються в мобільних газових детекторах для моніторингу безпеки на місцях.

Фотометричні методи вимірюють поглинання світла дихлоретаном у видимому або ультрафіолетовому спектрі. За зміною поглинання можна визначити концентрацію Контрольовані параметри під час очищення газу від дихлоретану в тарілчастій колоні.

Температура також має значний вплив на розчинність дихлоретану під час процесу абсорбції. Зміна температури може впливати на швидкість реакції і, відповідно, ефективність очищення газу від дихлоретану. Зазвичай розчинність газів у рідинах збільшується зі зростанням температури. Тобто, при підвищенні температури розчинність дихлоретану зростає, що може бути корисним для більш ефективного видалення дихлоретану з газової фази.

Температура ще впливає на швидкість реакцій, які відбуваються під час абсорбції. Зазвичай підвищення температури прискорює реакції, що може бути корисним для зниження часу зупинки та збільшення продуктивності.

Зміна тиску в колоні впливає на фазові стани рідини і газу, а також на розчинність дихлоретану в рідині. Оптимальне регулювання тиску допомагає досягти найкращої продуктивності та результатів у процесі абсорбції. Підвищення тиску може призвести до збільшення кількості компонентів газу, які можуть бути розчинені в рідині. Це зазвичай відбувається за рахунок збільшення концентрації молекул газу в газовій фазі, що сприяє їхній розчинності у рідині. Зі збільшенням тиску розчинність дихлоретану збільшується, що дозволяє більше дихлоретану розчинити в абсорбенті.

Керування та моніторинг параметрів процесу очищення газу від дихлоретану є критичними аспектами для досягнення оптимальних результатів, забезпечення безпеки та відповідності стандартам якості продукції. Керування параметрами, такими як температура, тиск, швидкість газу і рідини, дозволяє досягнути найкращої продуктивності процесу абсорбції. Оптимальні параметри забезпечують ефективне видалення сірководню з газової фази і максимізують якість очищеного газу.

Газоповітряна суміш, забруднена дихлоретаном, контактує з абсорбентом у тарілчастій колоні. Дихлоретан розчиняється в рідині, утворюючи розчин. Для досягнення заданого ступеня очищення газу від дихлоретану встановлено систему автоматичного керування. Вона регулює витрату абсорбенту відповідно до вимог щодо концентрації дихлоретану в очищеному газі.

5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання [25]

Система включає датчик для моніторингу поточної концентрації $C_2H_4Cl_2$ в газоповітряній суміші. Цей датчик надсилає сигнал ПІ-регулятору на основі замірів концентрації $C_2H_4Cl_2$ в газі. ПІ-регулятор (ПР3.21) і ПІ-регулятор співвідно-

шення (ПРЗ.24), які використовуються для регулювання витрати абсорбенту та забезпечення, щоб концентрація $C_2H_4Cl_2$ була на заданому рівні. Щоб встановити бажану концентрацію $C_2H_4Cl_2$, слід використовувати ручний задатчик вторинного приладу.

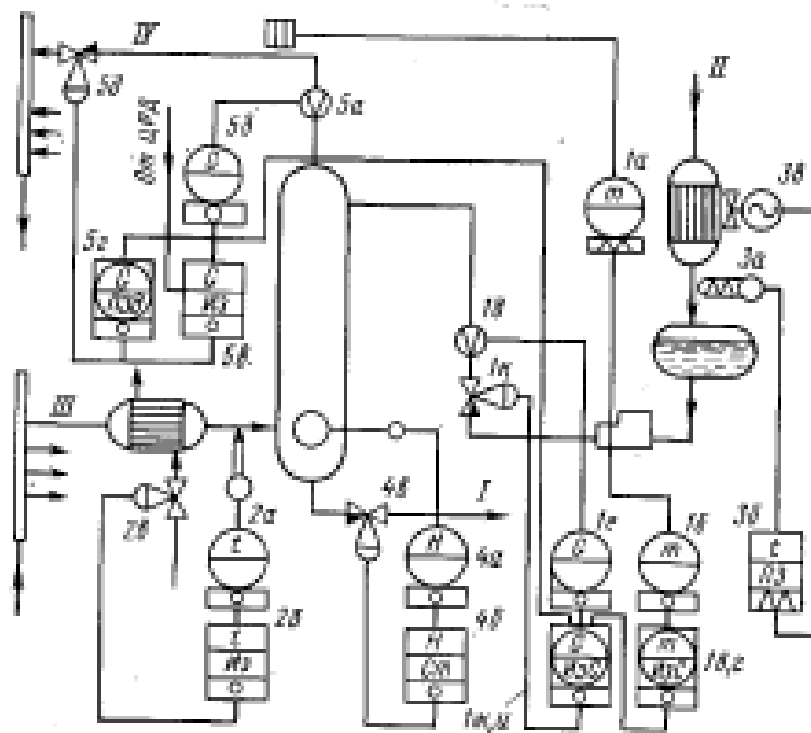


Рисунок 5.1 – Схема каскадного автоматичного керування процесом абсорбції:

- I – насичений абсорбент; II – зрошення колони;
 III – ненасичений абсорбент; IV – очищена суміш

Звідси видно, що система керування регулює витрату абсорбенту таким чином, щоб забезпечити заданий рівень очищення газу від дихлоретану. Це дозволяє досягнути ефективності процесу при мінімальних витратах енергії та матеріалів та дотримуватися стандартів якості продукції та безпеки.

Вибір приладів автоматизації повинен проводитися з тих засобів автоматизації, які випускаються серійно і вже себе зарекомендували. По можливості необхідно вибирати з тих приладів, які випускаються на Україні.

Вибір приладів будемо проводити, спираючись на необхідний діапазон вимірювань. Застосування пневматичних приладів обґрунтовано пожежонебезпекою

спиртового виробництва. Для проведення, контролю і регулювання процесом були обрані наступні прилади.

Автоматичний контроль температури. Сімейство вимірювальних перетворювачів температури фірми SIEMENS представлено перетворювачами SITRANS T, термоперетворювачами опору і термопарами для якісного вимірювання температури в будь-яких, навіть самих екстремальних, умовах. Датчики застосовуються в хімічній, фармацевтичній, харчовій, енергетичній та інших галузях промисловості.

Існують варіанти термометрів з цифровою індикацією показань. Також доступні вибухозахищене виконання датчиків.

Перетворювач SITRANS T серії: TW – універсальний перетворювач з виходом 4–20 мА + HART, програмований за допомогою РС.

Автоматичний контроль витрати. Сімейство витратомірів SITRANS F здатне вирішити задачу точного і надійного вимірювання витрати практично будь-якого середовища, використовуючи сучасні, перевірені часом, способи вимірювання витрати. Перетворювач SITRANS F серії M Magflo – магнітоіндукційні витратоміри. Застосовуються для вимірювання витрати електропровідних рідин і суспензій.

Автоматичний контроль рівня. Гама рівнемірів SIEMENS для контролю рівня рідких і сипких середовищ втілена в сімействі SITRANS L і дозволяє знайти рішення для широкого спектра задач. Сигналізатор граничного рівня (ємнісний) Pointek CLS 200 – універсальний сигналізатор із високою хімічною стійкістю.

Автоматичний контроль тиску. Сімейство вимірювальних перетворювачів SITRANS P служить для вимірювання надлишкового, вакууметричного, абсолютного і диференціального тиску рідких, газо- і пароподібних середовищ, а також для вимірювання гідростатичного рівня рідини в ємностях. Перетворювач SITRANS P серії ZD – перетворювач надлишкового та абсолютного тиску з цифровим індикатором.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів [26, 27]

Виробництво вінілхлориду (ПВХ) є складним технологічним процесом, який включає в себе різні утворення, обробки та перетворення хімічних речовин. Абсорбційне відділення, яке застосовується для очищення газових викидів, також може викликати певні потенційні небезпеки та шкідливості.

Однією з найбільш значущих небезпек у виробництві ПВХ є наявність отруйних речовин, таких як хлор та вуглеводні, в газових викидах. Ці речовини можуть бути небезпечними для здоров'я працівників.

Дихлоретан, як і багато інших хімічних сполук, має ряд небезпечних властивостей, які потрібно враховувати при роботі з ним. Дихлоретан є токсичною речовиною, яка може впливати на центральну нервову систему. Вдихання високих концентрацій дихлоретану може викликати головний біль, запаморочення, атаксію (втрата координації рухів), слабкість та інші симптоми отруєння.

Випари дихлоретану важчі за повітря, і вони можуть утворювати небезпечні зони у низьких частинах приміщень. Це може призвести до небезпечних умов для працівників та інших осіб. Контакт з дихлоретаном може викликати подразнення шкіри, очей та слизових оболонок. Це може призвести до почервоніння, свербіжу, обпіку та інших подібних симптомів.

Дихлоретан може утворювати легковогнебезпечні суміші з повітрям. Висока концентрація дихлоретану може призвести до небезпечних умов для пожежі та вибуху.

Викиди та витікання дихлоретану можуть мати негативний вплив на довкілля, забруднюючи повітря, воду та ґрунт. Дихлоретан може перебувати у середовищі довгий час та накопичуватися в екосистемах. Існують деякі дані, які вказують на можливі канцерогенні властивості дихлоретану.

Взаємодія хімічних речовин у відділенні може створювати вибухонебезпечні або горючі умови. Необхідно уважно контролювати та управляти цими умовами для запобігання пожежам та вибухам.

Агресивні хімічні речовини можуть спричиняти корозію та знос устаткування, трубопроводів та обладнання, що може призвести до аварій та витоків. Рухливі частини обладнання та великі пристрої у відділенні можуть становити ризик травм для працівників, особливо при проведенні обслуговування та ремонтних робіт.

Взаємодія хімічних компонентів у процесі абсорбції може призводити до утворення неочікуваних продуктів, які можуть бути небезпечними.

Існує можливість утворення статичної електрики при відносному переміщенні двох перебуваючих у контакті тіл, шарів рідини, тобто в потоці, в струмені пари або газу. Накопичення статичної електрики відбувається при транспортуванні органічних речовин в трубопроводах, при наливних і зливних операціях, що веде до пожеж і вибухів, у результаті яких можуть загинути люди.

Для усунення потенційних небезпек і шкідливостей передбачені наступні заходи:

1) для усунення небезпеки отримання термічних опіків застосувати теплоізоляцію, щоб знизити температуру стінки до 45°C;

2) для усунення отруєння газами передбачено:

- застосування паронітових прокладок в місцях з'єднання царг і трубопроводів;

- перевірка якості повітря в робочій зоні. При підвищенні норм – автоматичне включення припливно-витяжної вентиляції;

3) для усунення небезпеки вибуху і пожежі необхідно передбачити наступне:

- приміщення відділення забезпечити надійною загальнообмінною припливно-витяжною вентиляцією із застосуванням радіальних вентиляторів іскрозахищеного виконання;

- приміщення відділення обладнати стаціонарними установками пожежогашіння згідно з переліком вибухонебезпечних і пожежонебезпечних виробництв мікробіологічної, харчової промисловості, що підлягають обладнанню автоматич-

ними засобами пожежогасіння, пожежним водопроводом, ящиками з піском і лопатами, вогнегасниками типу ОХП і ОУ;

- освітлювальні і силові електропроводки виконати із дотриманням правил вибухонебезпечності і містити в справному стані;

- установка електроприводів, пускачів, засобів автоматизації допускається тільки у вибухобезпечному виконанні. Електромотори й пускачі, виконані не у вибухобезпечному виконанні, виносяться за межі приміщення;

- приміщення відділення забезпечити аварійною вентиляцією, з сигналізатором РГД, який автоматично включає аварійну вентиляцію в приміщенні при досягненні кількості парів спирту в повітрі 50 % ГДК. Аварійна вентиляція повинна забезпечувати 8–10-ти кратний повітрообмін в годину на додаток до роботи основної вентиляції. Крім автоматичного включення систем аварійної вентиляції передбачити також і ручне дистанційне їх включення з розташуванням пускових пристроїв у одній з основних дверей зовні приміщення;

- здійснити блискавкозахист відділення відповідно до СН 205-77 по I категорії;

4) для усунення небезпеки падіння з висоти необхідно застосувати огорожі обслуговуючих майданчиків і стежити за їх чистотою;

5) для усунення небезпеки виникнення статичної електрики необхідно заземлити. Заземлювальні пристрої для захисту від статичної електрики слід об'єднувати з заземлюючими пристроями для електрообладнання.

Застосування перерахованих вище заходів допоможе поліпшити умови праці і звести виробничий травматизм до мінімуму.

Перед зварювальними роботами всередині абсорбційної колони треба:

- закінчити зливання робочих речовин з установки не менше ніж за 2 години до початку зварювання;

- повністю видалити середовища з установки, контрольних снарядів тощо;

- ретельно провентилувати приміщення.

При проведенні зварювальних робіт не дозволяється вносити в приміщення балони з киснем. Для освітлення апаратів всередині при ремонті, чищенні і огляді

слід застосовувати низьковольтні переносні лампи (12–24 В), для переносного освітлення при експлуатації установки дозволяється користуватися тільки електричним ліхтарем напругою 2–3,5 В.

Усі працівники виробництва повинні знати і суворо дотримуватися правил техніки експлуатації обладнання і установки в цілому.

6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора [27]

Система заходів, спрямованих на усунення впливу атмосферної електрики, відома як система блискавкозахисту. Сила струму у каналі блискавки досягає 200 тисяч ампер, а напруга - 1 мільярд вольт. При входженні до об'єкта потенціал, через втрати, зменшується до рівня 30-50 мільйонів вольт. Довжина блискавкового розряду може сягати сотень і тисяч метрів. Тривалість існування блискавкового розряду коливається від 0,1 до 1 секунди. Температура у каналі може досягати від 6000 до 10000 градусів Цельсія.

Прямий удар може призвести до руйнування будівель, споруд і обладнання через миттєве нагрівання повітря, різке його розширення і ударну хвилю. Він також може спричинити загоряння горючих матеріалів.

Захист будівель і споруд від удару блискавки залежить від наступних факторів: призначення; інтенсивності грозової діяльності у місцевості їх розташування; передбачуваної кількості ураганів у році відповідно до категорій блискавкозахисту та типу зони захисту.

Інтенсивність грозової активності (годин на рік) визначається за допомогою спеціальної карти або на підставі даних метеостанцій. Дніпропетровська область віднесена до районів, де спостерігається від 60 до 80 годин грозової активності на рік.

Кількість очікуваних ударів блискавки на рік для будівель і споруд, які не обладнані захистом від блискавки, розраховується за допомогою наступної формули [27]:

$$N = \left[(B + 6 \cdot h_x) \cdot (L + 6 \cdot h_x) - 7,7 \cdot h_x^2 \right] \cdot n \cdot 10^{-6},$$

де B – ширина об'єкта, що захищається, м;

L – довжина об'єкта, що захищається, м;

h_x – висота об'єкта з його бокових сторін, м;

n – середня кількість поразок блискавкою 1 кв. км. земної поверхні на рік.

На практиці для захисту будівель і споруд від прямих ударів блискавки найбільше поширення отримали стрижневі та тросові відводи блискавки (рис. 6.1).

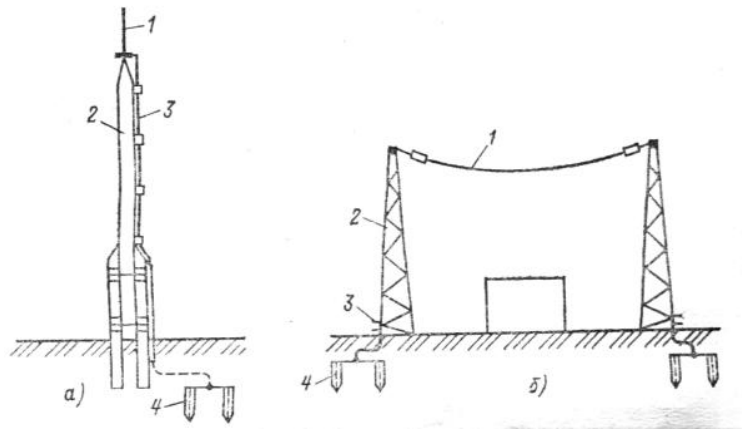


Рисунок 6.1 – Конструкція стрижневого (а) та тросового (б) відводів блискавки:

1 – блискавкоприймач, що безпосередньо приймає прямий удар блискавки;

2 – несуча конструкція, призначена для встановлення блискавковідводу;

3 – струмовідведення, що забезпечує відведення блискавки в землю;

4 – заземлювач, що відводить струм блискавки в землю.

Тип, кількість та взаємне розташування блискавковідводів визначають геометричну форму зони захисту. Схематично зона захисту одиничного відводу блискавки наведена на рис. 6.2.

Насамперед, визначаємо очікувану кількість уражень блискавкою на рік будівель та споруд за формулою (6.1):

$$N = \left[(25 + 6 \cdot 10) \cdot (25 + 6 \cdot 10) - 7,7 \cdot 10^2 \right] \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 0,036 \frac{\text{разів}}{\text{рік}}.$$

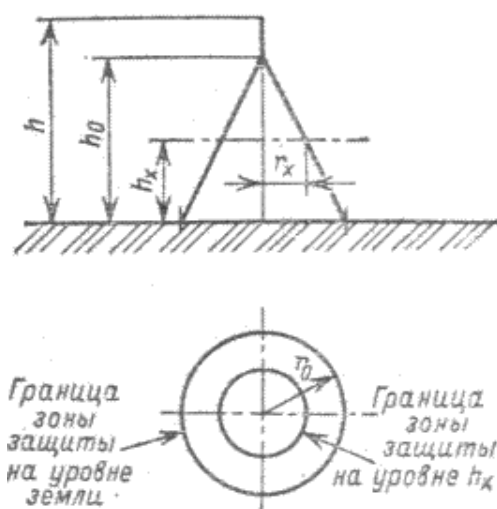


Рисунок 6.2 – Зона захисту одиничного стрижневого блискавковідводу висотою менше 150 м є конусом, вершина якого знаходиться на висоті h_0

Таблиця 6.2 – Розрахунок зони захисту одиничного стрижневого блискавковідведення [27]

Надійність захисту P_3	Висота блискавковідведення h , м	Висота конуса h_0 , м	Радіус конуса r_0 , м
0,9	від 0 до 100	$0,85h$	$1,2h$
	від 100 до 150	$0,85h$	$[1,2 - 10^{-3}(h-100)]h$
0,99	від 0 до 30	$0,8h$	$0,8h$
	від 30 до 100	$0,8h$	$[0,8 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)] h$
	від 100 до 150	$[0,8 - 10^{-3}(h-100)]h$	$0,7h$
0,999	від 0 до 30	$0,7h$	$0,6h$
	від 30 до 100	$[0,7 - 7,14 \cdot 10^{-4}(h-30)]h$	$[0,6 - 1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)] h$
	від 100 до 150	$[0,65 - 10^{-3}(h-100)]h$	$[0,5 - 2 \cdot 10^{-3}(h-100)]h$

Таблиця 6.3 – Вихідні дані для розрахунку

Геометричні розміри об'єкта, що захищається		
Довжина	Ширина	Висота (максимальна)
L, м	B, м	h_x , м
25	25	10

Тут середня кількість поразок блискавкою 1 кв. км земної поверхні на рік визначаємо за таблицею залежно від інтенсивності грозової діяльності [27]: при 60–80 годин на рік грозової діяльності $n=5,5$ 1/(км²·год).

Далі ведемо розрахунок основних параметрів блискавковідведення. Відповідно до табл. 6.2 при надійності захисту $P_3=0,9$ та висоті блискавковідводу $h=30$ м отримаємо наступне.

Висота конуса:

$$h_0 = 0,85 \cdot h = 0,85 \cdot 30 = 25,5 \text{ м.}$$

Радіус конуса:

$$r_0 = 1,2 \cdot h = 1,2 \cdot 30 = 36 \text{ м.}$$

Радіус об'єкта, що захищається, визначаємо за формулою [27]:

$$r_x = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot \left(h - \frac{h_x}{0,85} \right) = (1,1 - 0,002 \cdot 30) \cdot \left(30 - \frac{10}{0,85} \right) = 19,0 \text{ м.}$$

Правильність вибору блискавковідводу перевіряється за допомогою нерівності:

$$\frac{\sqrt{B^2 + L^2}}{2} < r_x.$$

$$\frac{\sqrt{25^2 + 25^2}}{2} = 17,7 \text{ м} < 19,0 \text{ м.}$$

Отже, обраний блискавковідвід зможе забезпечити безпеку абсорбційного відділення у виробництві вінілхлориду.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шпарій М.В. Удосконалення технології хлорування етилену: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.04 / М.В. Шпарій. – Львів, 2021. – 175 с.
2. Хімія і технологія хлорорганічних сполук : монографія / С.А. Курта. – Івано-Франківськ : Видавництво “Плай” ЦІТ Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, 2009. – 265 с.
3. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» освітньої програми «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» : для студентної, заочної та дистанційної форм навчання / В.І. Склабінський, Я.Е. Михайловський, Р.О. Острога, М.С. Скиданенко. – Суми : СумДУ, 2019. – 53 с.
4. Хімія і технологія хлорорганічних сполук і полімерів: Способи одержання, властивості та використання 1,2-дихлоретану ($C_2H_4Cl_2$) [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://kc.pnu.edu.ua/wp-content/uploads/sites/11/2020/09/%D0%A5%D0%A5%D0%9E%D0%A1%D0%9F-Lecture-%E2%84%962.pdf>
5. Виробництво 1,2-дихлоретану [Електронний ресурс]. – Режим доступу : https://ua-referat.com/%D0%92%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%BE_12%D0%B4%D0%B8%D1%85%D0%BB%D0%BE%D1%80%D0%B5%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%83
6. Врагов А.П., Михайловський Я.Є, Якушко С.І. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв. – Суми: видавництво СумДУ, 2008. – 170 с.
7. Коваленко І.А., Малиновський В.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв. – Київ: Воля, 2006. – 253 с.
8. 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.

9. Онищук О.О., Кормош Ж.О. Процеси та апарати хімічних виробництв: курс лекцій. – Луцьк: Вежа-Друк, 2020. – 155 с.

10. 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.

11. Поперечний А.М., Черевко О.І., Гаркуша В.Б., Кирпиченко Н.В., Ласкіна Н.А. Процеси і апарати харчових виробництв. – К.: «Центр учбової літератури», 2007. – 304 с.

12. Піх З.Г., Реутський В.В., Івасів В.В., Іващук О.С. Хімія і технологія органічних речовин: Електроний навчальн. посібник ВНС ЛП (<http://vns.lp.edu.ua/moodle/course/view.php?id=9369>). – Зареєстровано НМУ НУ «ЛП» (№ Е41-216-2/2011 від 10.03.2011).

13. Ульянов Б.А., Баденников В.Я., Ликучев В.Г. Процессы и аппараты химической технологии. – Ангарск: изд-во АГТА, 2006. – 744 с.

14. Шалугін В.С., Шмандрій В.М. Процеси та апарати промислових технологій. – К.: «Центр учбових технологій», 2007. – 392 с.

15. Процеси та обладнання хімічних технологій. Базові принципи теорії тепломасообміну: практикум з кредитного модуля : навч. посіб. / уклад.: С.В. Гулієнко, Я.В. Гробовенко. – К. : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 120 с.

16. Онищук О.О. Процеси та апарати хімічних виробництв: курс лекцій / О.О. Онищук, Ж.О. Кормош. – Луцьк : Вежа-Друк, 2020. – 155 с.

17. Обладнання хімічних виробництв та підприємств будівельних матеріалів : Навчальний посібник / А.І. Дубинін, В.М. Атаманюк, В.П. Дулеба, Д.М. Симак. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 292 с.

18. 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.

19. 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.

20. 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.

21. Методичні вказівки до вивчення дисципліни «Проектування хімічних підприємств та основи САПР» / Укл.: О.О. Ляпощенко, В.М. Маренок. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 81 с.

22. Обладнання заготівельних та котельно-зварювальних дільниць ремонтно-механічних цехів хімічних виробництв : навч. посіб. / С.М. Яхненко, М.С. Скиданенко, Є.М. Піддубний. – Суми : СумДУ, 2022. – 170 с.

23. Виготовлення обладнання хімічних виробництв : підруч. [для студ. закл. вищ. освіти]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 233 с.

24. 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>

25. Промислові прилади та засоби автоматизації: Довідник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безповська, В.А. Бек та ін.. Київ : Вид-во «Віста», 2017. – 847 с.

26. Основи охорони праці [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ztec.com.ua/ztec/e-lib/>

27. Денисенко, А.Ф. Охорона праці : конспект лекцій для студ. екон. спец. заочної форми навчання. Ч.2 / А.Ф. Денисенко. — Суми : СумДУ, 2007. — 130 с.