

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

## Кваліфікаційна робота магістра

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

Тема роботи: Ректифікаційна установка виділення бензолу і  
толуолу. Розробити та модернізувати випарник толуолу

Виконав:  
студент групи ХМ.м-21/2  
Карлов Даниїл Ігорович

\_\_\_\_\_  
підпис

Залікова книжка

№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота магістра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

докт. техн. наук, професор

Склябінський В.І.

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

## ЗМІСТ

	С.
<b>ВСТУП</b>	<b>4</b>
<b>1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ</b>	<b>6</b>
1.1 Способи отримання ароматичних вуглеводнів	6
1.2 Методика теплових розрахунків	9
<b>2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА</b>	<b>15</b>
2.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки виділення бензолу і толуолу	15
2.2 Опис конструкції проектованого апарата	19
2.3 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата	21
2.4 Гідрравлічні розрахунки	28
2.5 Вибір допоміжного обладнання	30
<b>3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА</b>	<b>35</b>
3.1 Вибір конструкційних матеріалів	35
3.2 Розрахунки на міцність та стійкість	36
<b>4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА</b>	<b>44</b>
4.1 Обґрунтування компонування основного та допоміжного обладнання	44
4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання	48
<b>5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ</b>	<b>54</b>
5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу	54
5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання	56
<b>6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ</b>	<b>59</b>
6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів	59

6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора

62

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

**67**

**ДОДАТКИ. Специфікації до графічної частини**

## ВСТУП

Виробництво ароматичних вуглеводнів є важливою галуззю хімічної промисловості, і воно базується на переробці нафтових та вугільних сировин. Коксування кам'яного вугілля є процесом термічної обробки кам'яного вугілля в вакуумі або при високому тиску. У результаті цього процесу утворюється кокс із вуглецю, а також ароматичні вуглеводні. Вихід ароматичних вуглеводнів при коксуванні вугілля може коливатися від 0,8 до 1,5 % сухої шихти [1].

Нафтопереробні заводи використовують каталітичний риформінг для отримання ароматичних вуглеводнів. Бензинові фракції переробляються під впливом каталізаторів для підвищення вмісту ароматичних компонентів, таких як бензол та толуол. Піроліз газоподібних та рідких вуглеводнів – це процеси розкладання вуглеводнів за високої температури без доступу повітря. Газоподібні та рідкі вуглеводні піддаються піролізу для отримання ароматичних вуглеводнів [2].

Отримані ароматичні вуглеводні, такі як бензол, толуол та інші, використовуються в різноманітних галузях хімічної та нафтопереробної промисловості. Ці речовини можуть служити сировиною для виробництва пластмас, синтетичних волокон, фарб, лаків, ліків та інших хімічних продуктів.

Установки каталітичного риформінгу для виробництва високооктанових компонентів автобензину складаються з трьох основних блоків:

*1. Блок попереднього гідроочищення сировини.* Сировина, яка використовується для виробництва автобензину, має бути попередньо очищена від забруднень і сірки. Головною метою цього блоку є зниження кількості забруднень та сірки, оскільки ці речовини можуть затримувати або пошкоджувати каталізatori в інших блоках.

*2. Блок каталітичного риформінгу.* Цей блок є ключовим для отримання високооктанових компонентів автобензину. У процесі каталітичного риформінгу парафінів і нафтенів перетворюються в ароматичні вуглеводні, такі як бензол, толуол та ксилол. Використані каталізatori активуються та регенеруються для забезпечення стабільності процесу.

*3. Блок стабілізації та фракціонування каталізатору.* Отриманий каталізатор піддається процесам стабілізації та фракціонування. Стабілізація спрямована на збереження активності каталізатора шляхом видалення накопичених забруднень і коксу. Фракціонування дозволяє відокремити різні складові каталізатора для подальшого використання.

Ці три блоки працюють в комплексі, забезпечуючи ефективний та стабільний процес виробництва високооктанових компонентів автобензину, які важливі для забезпечення високої якості пального та оптимальної роботи сучасних автомобільних двигунів.

У даній магістерській роботі об'єктом дослідження та розробки є кожухотрубний випарник толуолу. При проектуванні слід враховувати деякі ключові аспекти, такі як технічні вимоги, теплові параметри та безпекові стандарти. Загалом, кваліфікаційну роботу виконано у відповідності до методичних вказівок [3].

## 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

### 1.1 Способи отримання ароматичних вуглеводнів [1, 2]

Гідроочищення сировини перед риформінгом є важливим етапом у виробництві ароматичних вуглеводнів, особливо в контексті застосування платинових каталізаторів. Головна мета гідроочищення полягає в видаленні речовин, які можуть негативно впливати на платинові каталізатори, такі як сірководень ( $\text{H}_2\text{S}$ ), аміак ( $\text{NH}_3$ ), металеві органічні сполуки і ненасичені вуглеводні.

Для гідроочищення використовуються каталізатори на основі алюмінію, кобальту, нікелю та молібдену. Ці каталізатори допомагають виводити нежелюбні забруднення з сировини. Сірководень та аміак, які утворюються під час гідроочищення, видаляються з реакційної суміші. Це забезпечує покращену чистоту сировини перед введенням її в риформінг.

Утворені металеві осади на каталізаторі (наприклад, відкладення від азоту та сірки) можуть призводити до зниження активності каталізатора. Тому важливо виконувати регулярне обслуговування і регенерацію каталізатора. Утворена вода під час гідроочищення видаляється у відпарній колоні, оскільки вона може бути не бажаною в риформінговому процесі.

Гідроочищення відіграє ключову роль у забезпеченні ефективності і довговічності платинових каталізаторів у процесі риформінгу та допомагає забезпечити високу якість ароматичних вуглеводнів, отриманих після риформінгового процесу.

Гідроочищення відбувається при відносно низьких температурах і не супроводжується значним підвищенням температури в реакторі. Основна інформація про температури на вході та на виході з реактора, а також про кратність циркуляції водню, може бути корисною при проектуванні та оптимізації процесу гідроочищення.

Низькі температури на вході та невелике підвищення температури на виході можуть вказувати на те, що реакції гідрування відбуваються ефективно при відно-

сно помірних умовах температури і тиску. Такі умови можуть бути важливими для забезпечення високого рівня безпеки та зниження витрат енергії.

Кратність циркуляції водню (ВСТ) у межах 80–300  $\text{нм}^3/\text{м}^3$  сировини вказує на те, що водень може використовуватися як каталізатор чи засіб для зниження тиску в реакторі. Це може бути важливим для підтримання сприятливих умов реакції та ефективного видалення продуктів гідрування.

Тепловий ефект у межах 20–87 кДж/кг сировини свідчить про те, що реакції гідрування екзотермічні, але сумарний ефект залишається в межах обмежених значень. Це може бути важливим для регулювання температури та управління енергетичними витратами в процесі.

Загальна картина свідчить про те, що процес гідроочищення відбувається при умовах, які дозволяють досягнути ефективного очищення сировини, зберігаючи при цьому економічні та енергетичні вигоди.

Каталітичний риформінг, часто відомий як платформінг, є ключовим процесом в нафтопереробній промисловості для отримання високооктанового компонента для бензину та інших важливих продуктів. Основні реакції включають ароматизацію парафінів та циклізацію нафтенів, що призводить до отримання ароматичних вуглеводнів, таких як бензол, толуол і ксилоли.

Головною метою каталітичного риформінгу є підвищення октанового числа бензину та отримання високооктанових ароматичних вуглеводнів. Сировина для каталітичного риформінгу зазвичай включає бензинові фракції з нафтового сирця.

Зазвичай використовують платинові каталізатори, наприклад, платину на кремнієвому або алюмінієвому носії. Каталізатор сприяє ароматизації та циклізації вуглеводнів.

Нафтеніві сполуки перетворюються у кільцеві ароматичні вуглеводні. Парафіни перетворюються у більш ароматичні сполуки, зокрема бензол. Ізомеризація сприяє конвертації лінійних вуглеводнів у їхні ізомери, що також можуть мати високий октановий рейтинг.

Процес відбувається при високих температурах (близько 500-600°C) і середніх тиск (зазвичай в діапазоні 20-50 атмосфер). Головними продуктами є бензол, толуол, ксилоли та інші ароматичні вуглеводні. Отримані ароматичні продукти можуть служити як цінні сировини для виробництва пластмас, фарб, лаків та інших хімічних продуктів.

Процес є енергетично інтенсивним, і вимагає подачі теплової енергії для забезпечення температурних умов реакцій. Після деякого часу роботи каталізатор може втрачати активність і потребує регенерації для відновлення каталітичної активності.

Каталітичний риформінг є важливим процесом в виробництві високоякісних паливних компонентів та хімічних сировин. Окрім підвищення октанового числа бензину, цей процес дозволяє отримати цінні ароматичні вуглеводні для використання в різних галузях промисловості.

Процес селективного гідрування ненасичених вуглеводнів відбувається в спеціальному реакторі, де в якості каталізатора використовується алюмоплатиновий матеріал з низьким вмістом платини (0,1–0,15 % мас.). Цей блок призначений для ефективного гідрування ненасичених вуглеводнів, які містяться в ароматизованому каталізаторі в концентрації до 1,5 % маси. Важливо відзначити, що процес відбувається в оптимальних умовах, з температурою гідрування в межах 180–220°C та тиском в діапазоні 1,4–2,0 МПа.

При використанні цих оптимальних умов гідруються виключно олефінові вуглеводні, і при цьому концентрація ароматичних вуглеводнів залишається стабільною. Важливим критерієм є також різниця температур на вході та виході реактора, яка не повинна перевищувати 6–10°C. Підвищення цієї різниці температур свідчить про можливе зниження селективності каталізатора у реакції гідрування, особливо це спостерігається наприкінці робочого циклу каталізатора.

Враховуючи вищезазначене, ефективність та стабільність процесу селективного гідрування забезпечуються за допомогою оптимальних параметрів, та вчас-



ною регенерацією каталізатора для збереження його селективних властивостей протягом всього циклу роботи.

Процес екстракції ароматичних вуглеводнів включає ряд ключових етапів, які спрямовані на відділення та очищення цих сполук. Весь процес поділяється на кілька блоків для ефективного використання ресурсів та досягнення високої якості отриманих ароматичних продуктів.

На початковому етапі здійснюється контакт ароматичних вуглеводнів із розчинником, який вибирає ці сполуки із суміші. Суміш розчинник-ароматичні вуглеводні називається екстрактом. Після цього етапу проводиться відпарювання розчинника, щоб отримати концентрований ароматичний продукт.

Екстракт, отриманий на попередньому етапі, проходить через процес ректифікації. Цей етап включає фракційну дистиляцію або інші методи розділення для подальшого очищення та вдосконалення складу ароматичних вуглеводнів.

Мета полягає в отриманні продукту з високим ступенем чистоти та відповідними технічними характеристиками. Розчинник, який був використаний для екстракції ароматичних вуглеводнів, потребує регенерації для подальшого використання. На цьому етапі здійснюється відокремлення ароматичних сполук від розчинника, що дозволяє оновити розчинник і використовувати його в наступних циклах екстракції.

Усі ці етапи спільно допомагають забезпечити високий рівень чистоти та відділення ароматичних вуглеводнів від інших компонентів суміші. Контрольована екстракція, ректифікація та регенерація розчинника є ключовими аспектами для ефективного та економічно обґрунтованого виробництва ароматичних вуглеводнів.

## **1.2 Методика теплових розрахунків [4–7]**

Тепловий баланс для процесу теплообміну, в якому відбувається зміна агрегатного стану холодного теплоносія, може бути виражений у вигляді наступного рівняння:

$$Q = G_x \cdot (H_{xk} - h_{xn}) = G_x \cdot (H_{xk} - h_{xk} + h_{xk} - h_{xn}) = G_x \cdot (r_{\text{пар}} + c_x \cdot (t_{xk} - t_{xn})), \quad (1.1)$$

де  $h_{xn}$ ,  $h_{xk}$ ,  $H_{xk}$  – ентальпії рідини та пари холодного теплоносія за початкової та кінцевої температур, Дж/кг;

$r_{\text{пар}}$  – питома теплота пароутворення холодного теплоносія, Дж/кг.

У випадку, коли холодний теплоносій подається на випарювання підігрітим до температури кипіння, тепловий баланс може бути виражений більш спрощено:

$$Q = G_x \cdot r_{\text{пар}}. \quad (1.2)$$

У теплообмінниках, де один теплоносій має постійну температуру (наприклад, гарячий теплоносій), інший теплоносій, який проходить через теплообмінник, може мати змінну температуру. Напрямок руху теплоносіїв може бути важливим з точки зору ефективності теплообміну та конструкції теплообмінника.

Залежно від конкретного завдання, вплив напрямку руху робочих середовищ може мати значення. Наприклад, у контексті деяких процесів можуть вимагати оптимізації, яка полягає в направленні потоку холодного теплоносія в теплообміннику так, щоб він максимально ефективно охолоджував гарячий теплоносій. Однак існує безліч варіантів дизайну теплообмінників, і вони можуть бути призначені для різних умов і завдань. Загальний принцип полягає в тому, щоб досягти необхідного теплообміну при заданих температурах і тисках теплоносіїв, незалежно від напрямку їх руху в теплообміннику.

Визначення теплофізичних властивостей робочих середовищ на основі їх середніх температур є поширеним підходом в інженерних розрахунках і теплообмінній техніці. Це дає можливість ефективно оцінювати і передбачати теплообмінні процеси в різних умовах, зокрема в теплообмінниках.

Для холодного теплоносія, де температура змінюється під час проходження через теплообмінник, визначальною температурою може бути температура його кипіння за певного тиску, оскільки ця температура визначає, коли речовина пере-

ходить з рідкого стану в пароподібний стан.

Вибір кожухотрубчастого випарника з паровим простором відбувається на підставі ряду технічних розрахунків та врахування певних технічних параметрів.

Спочатку слід визначити кількість тепла, яку необхідно передати від гарячого теплоносія (наприклад, пари) до рідини, яка випаровується. Цей розрахунок базується на технологічному завданні і вимагає знання теплоти пароутворення та інших фізичних властивостей речовини.

Орієнтовна поверхня теплообміну обчислюється, і на її основі вибирається конструкція випарника. Для цього використовують таблиці і графіки, які містять дані про різні конструкції кожухотрубчастих теплообмінників.

Після вибору конструкції випарника необхідно визначити матеріали, з яких він буде виготовлений, і визначити розміри та параметри конструкції (наприклад, довжину труб, діаметр кожуха тощо).

Далі слід перевірити, чи відповідає обрана конструкція всім технічним і технологічним вимогам, а також розглянути декілька варіантів конструкції теплообмінника та провести порівняльний аналіз, щоб знайти оптимальний варіант.

Робочий проект і дизайн: Після вибору конструкції і варіанту теплообмінника, розробіть докладний проект і дизайн для виробництва.

Використання критеріальних рівнянь для розрахунку коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_{кин}$  під час бульбашкового кипіння чистих рідин і розчинів є досить поширеною практикою в хімічній та теплотехнічній інженерії. Такі рівняння дозволяють знаходити  $\alpha_{кин}$  на основі різних фізичних та термодинамічних параметрів процесу. Один із таких критеріальних підходів включає в себе величини, які визначають інтенсивність кипіння і взаємодію між фазами [12]:

$$Nu_{кин} = 0,125 \cdot Re'^{0,65} \cdot Pr^{0,33} \text{ при } Re' \geq 0,01, \quad (1.3)$$

$$Nu_{кин} = 0,0625 \cdot Re'^{0,5} \cdot Pr^{0,33} \text{ при } Re' < 0,01, \quad (1.4)$$

де  $Nu_{кин}$  – узагальнений критерій Нусельта:

$$Nu_{кин} = \frac{\alpha_{кин} \cdot l'}{\lambda_p}. \quad (1.5)$$

Модифікований критерій Рейнольдса  $Re'$  використовується для оцінки режимів теплообміну в кожухотрубчастих теплообмінниках. Цей критерій враховує фізичні властивості робочих середовищ, розміри теплообмінника та режим течії рідини в трубках. Модифікований критерій Рейнольдса обчислюється наступним чином:

$$Re' = \frac{w_n \cdot l' \cdot \rho_p}{\mu_p}. \quad (1.6)$$

Критерій Прандтля, також відомий як  $Pr$ , використовується для характеристики тепло- та масообмінних процесів в рідинах і газах. Він визначає, наскільки швидко рідина або газ переносить тепло в порівнянні з масовим переносом. Для киплячої рідини, такої як водні пари або інші рідини, які киплять під певним тиском, критерій Прандтля може бути особливо важливим:

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu_p}{\lambda_p}; \quad (1.7)$$

Модифікований лінійний розмір (або просто модифікований розмір) – це поняття, яке використовується для характеристики і оцінки розмірів і форми тіл, які можуть бути неоднорідними, складними або мають незвичну геометричну структуру. Модифікований лінійний розмір допомагає уникнути або зменшити складності визначення інших параметрів, таких як об'єм або площа поверхні, при описі геометричних характеристик об'єкта.

Модифікований лінійний розмір може бути визначений різними способами в залежності від конкретних вимог та специфікацій. Одним із способів визначення модифікованого лінійного розміру є використання середнього арифметичного значення або середнього геометричного значення лінійних розмірів об'єкта:

$$l' = \frac{c_p \cdot \rho_p \cdot \sigma_p \cdot T_{кип}}{(\rho_n \cdot r_{нар})^2}; \quad (1.8)$$

Середня швидкість руху парової фази, відома також як швидкість кипіння, визначається швидкістю, з якою парова фаза виходить з рідини під час кипіння. Ця швидкість, зазвичай, вимірюється в метрах на секунду (м/с) або інших одиницях швидкості.

Для рідини, що кипить, середня швидкість руху парової фази залежить від таких факторів, як температура, тиск і фізичні властивості рідини. Під час кипіння молекули рідини отримують достатньо енергії, щоб перейти в парову фазу і виходити з рідини. Швидкість цього процесу може бути різною для різних рідин і у різних умовах.

Середню швидкість руху парової фази можна визначити, спостерігаючи швидкість виходу пари з поверхні рідини під час кипіння:

$$w_n = \frac{q}{\rho_n \cdot r_{нар}}. \quad (1.9)$$

Для безпосереднього визначення коефіцієнта тепловіддачі ( $\alpha_{кип}$ ) через питоме теплове навантаження ( $q$ ) в межах бульбашкового режиму кипіння рідини використовують рівняння:

$$\begin{aligned} \alpha_{кип} &= \left( 0,075 + 0,75 \cdot \left( \frac{\rho_n}{\rho_p - \rho_n} \right)^{2/3} \right) \cdot \left( \frac{\lambda_p^2 \cdot \rho_p}{\mu_p \cdot \sigma_p \cdot T_{кип}} \right)^{1/3} \cdot q^{2/3} = \\ &= \left( 0,075 + 0,75 \cdot \left( \frac{\rho_n}{\rho_p - \rho_n} \right)^{2/3} \right)^3 \cdot \frac{\lambda_p^2 \cdot \rho_p \cdot \Delta T^2}{\mu_p \cdot \sigma_p \cdot T_{кип}}. \end{aligned} \quad (1.10)$$

Для деяких рідин, особливо в межах бульбашкового режиму кипіння, коефіці-

ент тепловіддачі може бути досить точно описаним емпіричними залежностями, які враховують питоме теплове навантаження (або температурний напір) і тиск. Зазвичай, для практичних розрахунків використовують різні кореляції та емпіричні формули:

$$\alpha_{кип} = 2,72 \cdot \varphi \cdot p^{0,4} \cdot q^{0,7}, \quad (1.11)$$

де  $\varphi$  – множник, що враховує теплофізичні властивості рідини.

Подальший тепловий розрахунок кожухотрубчастого випарника з паровим простором може виконуватися за аналогією до теплового розрахунку звичайного кожухотрубчастого теплообмінника з нерухомими трубними решітками. Основний принцип теплового розрахунку полягає в знаходженні оптимальних параметрів для досягнення бажаної теплообмінної ефективності.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки

#### виділення бензолу і толуолу

Бензол – це ароматичний вуглеводень з хімічною формулою  $C_6H_6$ . Він є однією з основних ароматичних сполук та має ряд характеристик та властивостей, які роблять його важливим компонентом в хімічній промисловості. Це безбарвна рідина з легким ароматним запахом. Кипіння бензолу відбувається при  $80,1^\circ C$ . Бензол застигає при температурі приблизно  $-11^\circ C$  [8].

Бензол має високу леткість, тобто легко випаровується в атмосфері. Він розчиняється у багатьох органічних розчинниках, таких як етанол та етер. Бензол хімічно стійкий, але може реагувати з окисниками за утворенням перекисів. Утворює азеотропні суміші з багатьма іншими розчинниками та хімічними сполуками. Він широко використовується в промисловості для синтезу різноманітних хімічних продуктів, таких як стирол, фенол, кумол та інші [8].

Бензол є токсичною речовиною і його довготривале впливання може викликати серйозні проблеми здоров'я, такі як порушення кровотворення та інші захворювання. Під впливом сонячного випромінювання бензол може утворювати фотохімічний смог, що становить екологічну проблему [9].

Толуол (метилбензен) – це хімічна речовина з формулою  $C_6H_5CH_3$ , яка має кілька характеристик та властивостей. Толуол – безбарвна рідина з різким, характерним запахом. Вона має рухливість та випаровується легко при кімнатній температурі. Температура кипіння толуолу становить  $110,6^\circ C$ . Пари толуолу утворюють вибухонебезпечні суміші, які можуть загорітися навіть від іскри статичної електрики. Толуол практично не розчиняється у воді, але добре розчиняється в органічних розчинниках. Має наркотичну дію та може бути токсичним при вдиханні великих концентрацій [10].

Толуол може бути отриманий з нафтових фракцій або кам'яновугільної смоли. Кам'яновугільний толуол, утворений в процесі коксування, вилучається з

кокового газу, піддається очищенню та виділяється ректифікацією. Тoluол є важливим розчинником та промисловим хімічним прекурсором. Його використовують у виробництві фарб, лаків, клеїв, синтетичних смол та інших хімічних продуктів.

Завдяки його властивостям, toлуол вимагає обережного використання через високий ризик пожежі та його токсичні властивості при неправильному використанні. Тoluол є важливим компонентом у хімічній промисловості та має широкий спектр застосувань, однак важливо дотримуватися відповідних заходів безпеки при роботі з цією речовиною.

Технологічну схему ректифікаційної установки виділення бензолу і toлуолу представлено на рис. 2.1.

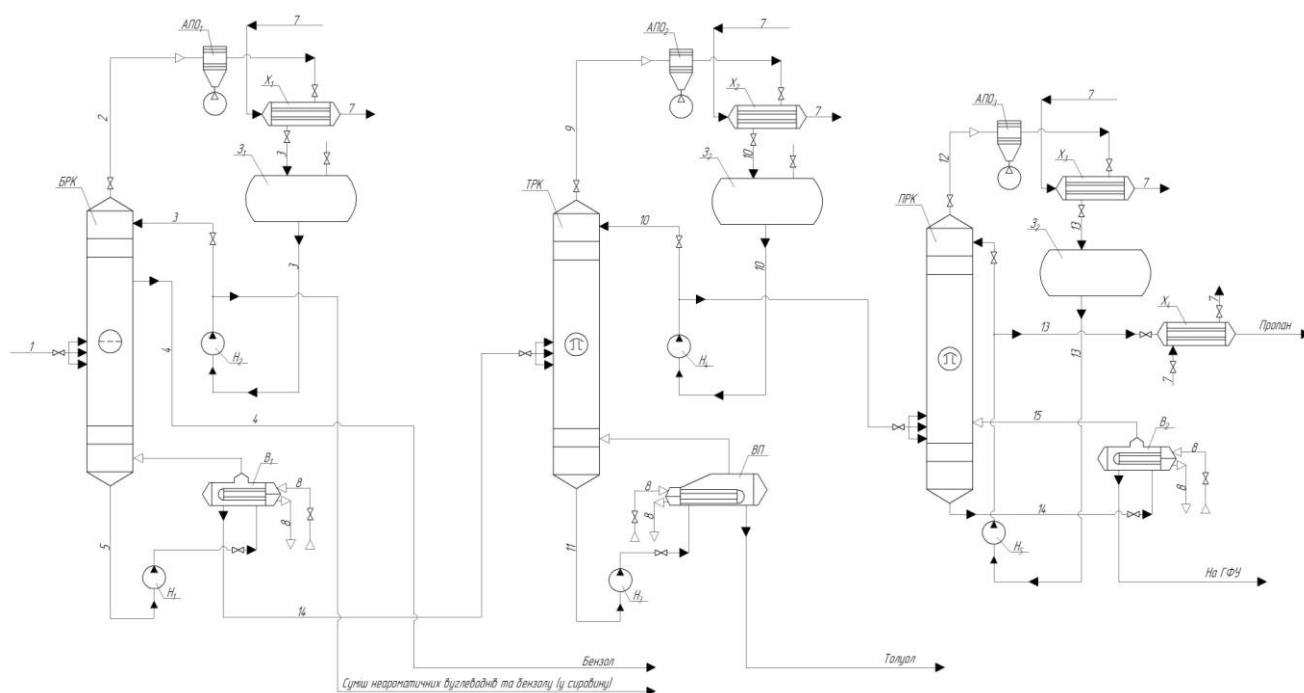


Рисунок 2.1 – Технологічна схема ректифікаційної установки виділення бензолу і toлуолу

Принцип роботи установки полягає у наступному. Екстракт, отриманий з блоку екстракції ароматичних вуглеводнів, подається у бензольну ректифікаційну колону (БРК) для подальшого перероблення. У верхній частині колони БРК відокремлюється азеотропна суміш, яка включає неароматичні вуглеводні та частину



бензолу. Потім пари цього азеотропу спрямовуються у апарат повітряного охолодження (АПО1), де вони конденсуються. Отриманий конденсат піддається додатковому охолодженню в кожухотрубному холодильнику (Х1) та направляється у збірник (З1).

Зі збірника З1 частина рідини, за допомогою насоса Н2, повертається назад у колону у формі флегми, тим самим забезпечуючи зворотний цикл процесу. Надлишок рідини з нагнітальної лінії насоса Н2 направляється в лінію сировини для подальшого використання. Отриманий бензол високої чистоти виділяється як побічний продукт у вигляді бічного потоку.

Крім того, колона БРК підтримується оптимальною температурою завдяки виносному випарнику (В1). Рідина з кубової частини колони БРК подається насосом Н1 у секцію живлення толуольної ректифікаційної колони (ТРК), взаємодія з якою сприяє подальшому перетворенню та виділенню цінних компонентів.

У толуольній ректифікаційній колоні (ТРК) суміш вуглеводнів з температурою кипіння нижче, ніж температура кипіння толуолу, відокремлюється як верхній продукт. Пари цієї суміші конденсуються в апараті повітряного охолодження (АПО2), а отриманий конденсат проходить додаткове охолодження в кожухотрубному холодильнику (Х2) перед тим, як бути направленим до збірника (З2).

Рідина, яка знаходиться у збірнику З2, частково повертається в толуольну колону ТРК, використовуючи насос Н4 для створення зворотного потоку у вигляді флегми. Такий процес допомагає забезпечити ефективну роботу колони та оптимізує умови для подальшого перероблення рідини. Надлишкова частина зріджених вуглеводневих газів направляється на тарілку живлення депропанізатора (П), де подальші перетворення та розділення відбуваються відповідно до технологічних вимог.

Толуол, який залишається у кубічній частині толуольної ректифікаційної колони (ТРК), становить кубовий залишок і є цінним продуктом. Щоб використати його повністю, цей толуол подається на випаровування у виносний кожухотрубний випарник із паровим простором (ВП) за допомогою насосу Н3.

Під час цього процесу виносний випарник генерує тепловий потік, який взаємодіє з рідиною, приводячи її до випаровування. Це дозволяє виділити толуол у вигляді парів і вивести їх для подальшого використання. Одночасно з цим, переливна планка у випарнику встановлена на рівні, який гарантує оптимальний обсяг рідини в апараті. Випарована рідина пройде через виносний кожухотрубний випарник, де відбувається процес перетворення її у пари. Температурний режим у випарнику підтримується на відповідному рівні, забезпечуючи ефективне випаровування толуолу. Частина рідини, яка перевищила рівень, установлений переливною планкою, виводиться за межі випарника. Ця частина, що містить товарний толуол відповідної якості, направляється на склад готової продукції. Такий підхід дозволяє ефективно використовувати та відокремлювати толуол для подальшого використання у виробництві.

У процесі роботи депропанізатора (П) відбувається важливий етап відокремлення пропанової фракції від ізобутан-бутан-пентанової. Пропанові пари, які утворюються під час цього процесу, проходять через апарат повітряного охолодження (АПОЗ), де вони конденсуються, а потім піддаються додатковому охолодженню у холодильнику (ХЗ), що призводить до утворення рідиною стану.

Отриманий конденсат, який складається з пропанових пар, надходить до збірника (ЗЗ), де забезпечується відокремлення від ізобутан-бутан-пентанової фракції. Частина пропанової фракції, після проходження через холодильник (Х4), направляється до товарного парку, тоді як основна кількість використовується для зрошення депропанізатора (П).

Забезпечення тепла у нижній частині пропанової колони (П) здійснюється за допомогою випарника (В2), до трубного простору якого подається водяна пара. Цей механізм дозволяє ефективно управляти температурним режимом та забезпечує необхідні умови для ефективного відокремлення компонентів.

Більша частина ізобутан-бутан-пентанової фракції направляється на газофракціонуючу установку (ГФУ) для проведення подальших технологічних операцій та отримання цінних продуктів. Такий підхід забезпечує оптимальну обробку сировини та раціональне використання різних компонентів у виробництві.

## 2.2 Опис конструкції проектного апарата

Кожухотрубний випарник із паровим простором (рис. 2.2) складається з двох основних компонентів: кожуха та U-подібного трубного пучка. Однак, щоб забезпечити ефективну роботу випарника, використовується спеціальна система контролю рівня рідини. Ця система включає в себе зливну перегородку, обладнану зубчастою кромкою, яка відповідає за рівномірне розподілення рідини у випарнику.

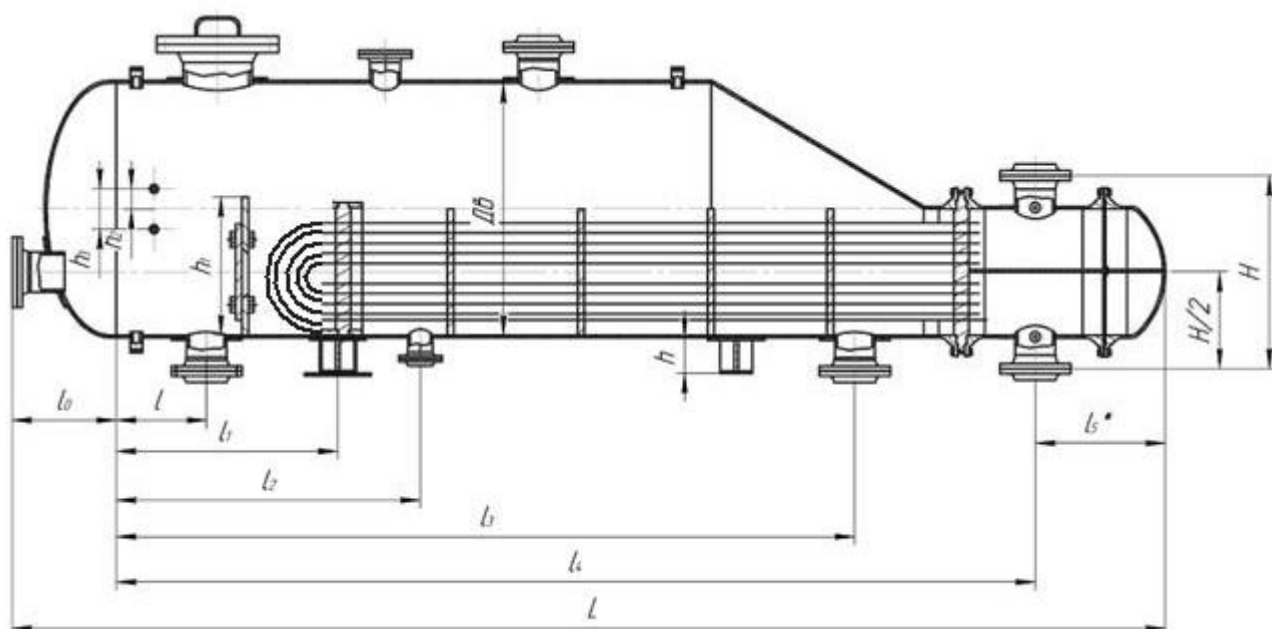


Рисунок 2.2 – Схема кожухотрубного випарника з паровим простором (тип У)

Основна мета цього випарника – створення оптимальних умов для випаровування рідини та утворення парів. Кожухотрубний дизайн, який використовується в цьому випарнику, дозволяє забезпечити ефективний теплообмін між паротворювачем та рідиною, що випаровується. Завдяки зубчастій кромці зливної перегородки рідина у випарнику підтримує необхідний рівень. Цей механізм гарантує рівномірне розподілення рідини та надійне утримання її у випарнику. Такий підхід до контролю рівня рідини сприяє ефективності процесу випаровування та допомагає уникнути можливих нерівномірностей в температурному режимі.

Щоб забезпечити оптимальні умови для випаровування та зберігання парів, використовується підхід, за якого відстань від верху зливної перегородки до верхньої частини кожуха складає не менше  $1/3$  від діаметра кожуха. Цей принцип спрямований на створення достатньої поверхні дзеркала випаровування та великого об'єму парового простору.

Важливою складовою конструкції є перегородка в розподільній камері, яка відповідає за ефективний розподіл гарячого теплоносія в трубному пучку. Ця перегородка забезпечує два ходи гарячого теплоносія, що взаємодіють з трубами, сприяючи ефективному випаровуванню рідини.

У зв'язку з потребою проведення монтажних і ремонтних робіт передбачено наявність люка та спеціального монтажного патрубку в апараті. Ці елементи дозволяють забезпечити зручний доступ та можливість проведення необхідних операцій для збереження та підтримки ефективності роботи випарника.

Середній радіус згину U-подібних труб (рис. 2.3) визначається як величина, що не менше ніж в 1,5 рази перевищує номінальний зовнішній діаметр труби. Цей принцип забезпечує відповідність вимогам ергономіки та надійності конструкції, сприяючи ефективному функціонуванню та тривалому терміну служби U-подібних труб.



Рисунок 2.3 – Загальний вигляд U-подібних трубних пучків

Встановлення такого співвідношення між середнім радіусом згину та зовнішнім діаметром труби враховується для забезпечення оптимального розташу-

вання труб у конструкції, зменшення напруг на матеріалі та забезпечення високої стійкості до механічних навантажень. Це важливий аспект у конструюванні, який допомагає зберегти інтегритет та надійність системи трубопроводів чи інших технічних конструкцій, де використовуються U-подібні труби.

Відбувається цільовий процес теплообміну наступним чином. Шляхом введення теплоносія в міжтрубний простір випарника забезпечується активний процес випаровування теплоносія – толуолу. У цьому процесі гарячий теплоносій, яким є насичена водяна пара, надходить в розподільну камеру випарника під надлишковим тиском. Через теплопередачу, що відбувається через стінку теплообмінних труб, толуол піддається ефективному нагріванню до температури кипіння, супроводжуючись його активним випаровуванням. У результаті цього процесу утворюються пари толуолу, які виходять з апарату через верхній штуцер. Такий механізм дозволяє контролювано та ефективно використовувати теплоносій для досягнення необхідного теплового режиму у випарнику.

### **2.3 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата**

Технологічний розрахунок розпочинається з докладного визначення основних теплофізичних властивостей теплоносіїв. Цей етап є ключовим у процесі проектування та ефективної роботи технічних систем, де тепло є важливим елементом. Для надійних розрахунків та оптимального використання теплоносіїв важливо враховувати такі параметри:

- теплопровідність – вказує на здатність теплоносія передавати тепло; Вимірюється водночас із врахуванням температурного градієнту;
- тепловмісткість – кількісний показник енергії, яку теплоносій може зберігати; визначається зміною температури та тепловмісткістю речовини;
- густина – кількість маси теплоносія, яка міститься в одиниці об'єму; впливає на тепловий обсяг системи;

- в'язкість визначає здатність теплоносія протікати через труби та інші канали;
- температурний коефіцієнт лінійного розширення враховує зміну об'єму теплоносія при зміні температури.

Врахування цих параметрів дозволяє вирішувати теплотехнічні завдання та забезпечує точність при проектуванні систем теплопередачі.

Визначимо секундну масову витрату толуолу:

$$G_1 = \frac{2700}{3600} = 0,75 \text{ кг/с.}$$

Температура кипіння толуолу при  $P_{\text{вип}} = 1,15$  ат становить  $t_{\text{кип}} = 110^\circ\text{C}$ . Теплота випаровування толуолу при цій температурі  $r_1 = 363$  кДж/кг.

Кількість теплоти, що витрачається на випаровування толуолу:

$$Q_{\text{вип}} = G_1 \cdot r_1; \quad (2.1)$$

$$Q_{\text{вип}} = 0,75 \cdot 363 = 272 \text{ кВт.}$$

Кількість теплоти, яка потрібна для нагрівання толуолу до стану кипіння:

$$Q_{\text{нагр}} = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_{\text{кип}} - t_{\text{п}}), \quad (2.2)$$

де  $c_1 = 2,07$  кДж/(кг·К) – теплоємність рідкого толуолу при усередненій температурі.

$$Q_{\text{нагр}} = 0,75 \cdot 2,07 \cdot (110 - 90) = 31 \text{ кВт.}$$

Загальне теплове навантаження випарника, із урахуванням 5 % втрат тепла у навколишнє середовище:

$$Q = 1,05 \cdot (Q_{\text{вип}} + Q_{\text{нагр}}); \quad (2.3)$$

$$Q = 1,05 \cdot (272 + 31) = 318 \text{ кВт.}$$

Температура насиченої водяної пари при тиску 1,15 ат  $t_{2п} = 138^\circ\text{C}$ . Температура конденсату водяної пари становить  $115^\circ\text{C}$ .

Витрата пари складе:

$$G_2 = \frac{Q}{r_2 + c_2 \cdot (t_{2п} - t_{2к})}; \quad (2.4)$$

$$G_2 = \frac{318}{2207 + 4,19 \cdot (138 - 115)} = 0,14 \text{ кг/с.}$$

Рекомендоване значення швидкості руху насиченої водяної пари при тиску понад 105 Па становить величину  $\omega = 15\text{--}25 \text{ м/с}$ . Приймаємо  $\omega_2 = 15 \text{ м/с}$ .

Оскільки водяна пара подається в трубний простір, то кількість труб в одному ході дорівнює:

$$n_{\text{т}} = \frac{G_2}{\rho'_2 \cdot \omega'_2 \cdot 0,785 \cdot d_{\text{в}}^2}, \quad (2.5)$$

де  $\rho'_2 = 1,85 \text{ кг/м}^3$  – густина водяної пари при  $p = 1,15 \text{ ат}$ ;

$d_{\text{в}} = 21 \text{ мм}$  – внутрішній діаметр труби.

$$n_m = \frac{0,14}{1,85 \cdot 15 \cdot 0,785 \cdot 0,021^2} = 15.$$

Визначимо температуру  $t'$ , що визначає границю зон процесу теплообміну:

$$t' = t_{2\kappa} + \frac{Q_{нагр}}{G_1 \cdot c_1}; \quad (2.6)$$

$$t' = 105 + \frac{31}{0,75 \cdot 2,1} = 125^\circ\text{C},$$

Середня різниця температур:

- для зони випаровування

$$\Delta t_{cp}^{вип} = \frac{(t_{2H} - t_{1\kappa}) - (t' - t_{1\kappa})}{\ln \frac{t_{2H} - t_{1\kappa}}{t' - t_{1\kappa}}}; \quad (2.7)$$

$$\Delta t_{cp}^{вип} = \frac{(138 - 110) - (115 - 110)}{\ln \frac{138 - 110}{115 - 110}} = 13,4^\circ\text{C};$$

- для зони нагрівання

$$\Delta t_{cp}^{нагр} = \frac{(t_{2\kappa} - t_{1H}) - (t' - t_{1\kappa})}{\ln \frac{t_{2\kappa} - t_{1H}}{t' - t_{1\kappa}}}; \quad (2.8)$$

$$\Delta t_{cp}^{нагр} = \frac{(105 - 90) - (115 - 110)}{\ln \frac{105 - 90}{115 - 110}} = 9,1^\circ\text{C}.$$

Температуру стінки приймаємо на  $15^\circ\text{C}$  вище за середню температуру толуолу, а саме:

$$t_{ст} = t_{1cp} + 10 = 100 + 15 = 115^\circ\text{C}.$$



Для випадку конденсації на пучку горизонтальних труб середнє значення коефіцієнта тепловіддачі визначаємо за рівнянням:

$$\alpha_2 = 3,78 \cdot \varepsilon_t \cdot \lambda_2 \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_2^2 \cdot d \cdot n}{\mu_2 \cdot G_2}}, \quad (2.9)$$

де  $\varepsilon_t = 1$  – для водяної пари;

$\lambda_2, \rho_2, \mu_2$  – фізичні характеристики плівки конденсату.

Тоді:

$$\alpha_2 = 3,78 \cdot 1 \cdot 0,684 \cdot \sqrt[3]{\frac{943 \cdot 0,021 \cdot 15}{0,232 \cdot 10^{-3} \cdot 0,14}} = 540 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Коефіцієнт тепловіддачі при кипінні рідини:

$$\alpha_1 = b^3 \cdot \frac{\lambda_1^2 \cdot \rho \cdot (\Delta t)^2}{\mu_1 \cdot \sigma_1 \cdot (t_{\text{sat}} + 273)}, \quad (2.10)$$

де  $\sigma_1 = 18,4 \cdot 10^{-3}$  Н/м – коефіцієнт поверхневого натягу для толуолу;

$\mu_1 = 0,251 \cdot 10^{-3}$  Па·с – в'язкість толуолу;

$\rho_1 = 777$  кг/м<sup>3</sup> – густина толуолу;

$\lambda_1 = 0,116$  Вт/м·К – теплопровідність толуолу;

$\Delta t = t_{\text{ст}} - t_{\text{кин}} = 115 - 110 = 5$  °С;

$b$  – безрозмірна функція, що визначається за формулою:

$$b = 0,075 + 0,75 \cdot \left( \frac{\rho_n}{\rho_p - \rho_n} \right)^{2/3} = 0,075 + 0,75 \cdot \left( \frac{2,93}{777 - 2,93} \right)^{2/3} = 0,193, \quad (2.11)$$

де густина парів толуолу:

$$\rho_{\text{п}} = \frac{M_{\text{T}} \cdot T_0}{22,4 \cdot T_{\text{сп}}}; \quad (2.12)$$

$$\rho_{\text{п}} = \frac{92 \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + 110)} = 2,93 \text{ кг/м}^3.$$

Тоді:

$$\alpha_1^{\text{вип}} = 0,193^3 \cdot \frac{0,116^2 \cdot 777 \cdot 5^2}{0,251 \cdot 10^{-3} \cdot 18,4 \cdot 10^{-3} \cdot 110 + 273} = 1062 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коефіцієнт теплопередачі для зони випаровування:

$$K_{\text{вип}} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1^{\text{вип}}} + \frac{1}{\alpha_2} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + r}, \quad (2.13)$$

де  $r = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$  – сумарний термічний опір забруднення;

$$\frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} = \frac{0,002}{46} = 0,43 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт} \text{ – термічний опір стінки;}$$

$\lambda_{\text{ст}}$  – теплопровідність вуглецевої сталі.

$$K_{\text{вип}} = \frac{1}{\frac{1}{1062} + \frac{1}{540} + 0,43 \cdot 10^{-4} + 2 \cdot 10^{-4}} = 329 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{с)}.$$

Розрахункова поверхня випарника складе:

$$F_P = \frac{31000}{329 \cdot 9,1} + \frac{272000}{329 \cdot 13,4} = 72 \text{ м}^2.$$

Вибираємо випарник типу У із характеристиками: поверхня теплообміну  $F = 82 \text{ м}^2$ ; внутрішній діаметр кожуха  $D = 800 \text{ мм}$ ; довжина труб  $L = 6000 \text{ мм}$ ; сортамент труб  $\text{Ø}25 \times 2 \text{ мм}$ ; кількість трубних пучків 1; кількість труб у трубному пучку 82; площа прохідного перетину одного ходу по трубах  $s_{mp} = 23 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ .

У такому випадку запас поверхні складе:

$$\Delta = \frac{F - F_p}{F} \cdot 100 \% ; \quad (2.14)$$

$$\Delta = \frac{82 - 72}{82} \cdot 100 \% = 12,2 \% .$$

Тобто, запас поверхні знаходиться у регламентованому діапазоні (10–20 %).

Діаметри штуцерів випарника для підведення-відведення теплоносіїв визначаємо за формулою:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot w}} , \quad (2.15)$$

де  $V$  і  $G$  – об'ємна і масова витрати рідини/пари відповідно,  $\text{м}^3/\text{с}$  і  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$\rho$  – густина потоку середовища,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$w$  – швидкість витікання середовища,  $\text{м}/\text{с}$ .

Рекомендовані швидкості руху теплоносіїв: для рідини 0,1–0,5  $\text{м}/\text{с}$  при самотпливі і 0,5–2,5  $\text{м}/\text{с}$  в напірних трубопроводах; для пари або газу 5–25  $\text{м}/\text{с}$ .

Діаметр патрубку для входу рідкого толуолу в апарат:

$$d_{x.ex} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2700 / 3600}{3,14 \cdot 777 \cdot 0,5}} = 0,05 \text{ м.}$$

Діаметр патрубку для виходу парів толуолу:

$$d_{x.vux} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2700 / 3600}{3,14 \cdot 2,93 \cdot 15}} = 0,147 \text{ м.}$$

Діаметр патрубкa для входу і виходу водяної пари:

$$d_z = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,14}{3,14 \cdot 1,7 \cdot 5}} = 0,145 \text{ м.}$$

За отриманими значеннями приймаємо стандартні патрубкi: для входу рідкого толуолу  $D_y = 50$  мм; для виходу парів толуолу  $D_y = 150$  мм; для входу насиченої водяної пари  $D_y = 150$  мм; для виходу насиченої водяної пари  $D_y = 150$  мм.

## 2.4 Гідравлічні розрахунки

Повний напір, необхідний для руху рідини або газу через теплообмінник, визначаємо за такою формулою:

$$\Delta P = \Sigma \Delta P_{TP} + \Sigma \Delta P_M + \Sigma \Delta P_y + \Sigma \Delta P_\Gamma, \quad (2.16)$$

де  $\Sigma \Delta P_{TP}$  – сума гідравлічних втрат на тертя, Па;

$\Sigma \Delta P_M$  – сума втрат напору в місцевих опорах, Па;

$\Sigma \Delta P_y$  – сума втрат напору, обумовлених прискоренням потоку, Па;

$\Sigma \Delta P_\Gamma$  – перепад тиску для подолання стовпа рідини, Па.

Гідравлічні втрати на тертя в каналах при поздовжньому омиванні пучка труб теплообмінного апарату визначаємо за формулою:

$$\Delta P_{TP} = \lambda_{TP} \cdot \frac{L}{d_E} \cdot \frac{w_z^2 \cdot \rho_z}{2}, \quad (2.17)$$

де  $\lambda_{TP}$  – коефіцієнт опору тертя.

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d_E} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (2.18)$$

де  $\Delta$  – абсолютна шорсткість поверхні труб, мм.

Для сталевих нових труб  $\Delta = 0,06-0,1$  мм, для сталевих труб, що були в експлуатації, з незначною корозією  $\Delta = 0,1-0,2$  мм.

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{0,1}{0,021} + \frac{68}{44827} \right)^{0,25} = 0,163;$$

$$\Delta P_{TP} = 0,163 \cdot \frac{6}{0,021} \cdot \frac{15^2 \cdot 1,85}{2} = 9693 \text{ Па.}$$

Гідравлічні втрати тиску в місцевих опорах визначаємо за формулою:

$$\Delta P_M = \xi \cdot \frac{w_2^2 \cdot \rho_2}{2}, \quad (2.19)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт місцевого опору. Його знаходять як суму опорів кожного елемента випарника:  $\xi = 2 \cdot \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$  (вхідна і вихідна камери  $\xi_1 = 1,5$ , вхід у труби  $\xi_2 = 0,5$  і вихід із них  $\xi_3 = 1$ , поворот на  $180^\circ$  між ходами  $\xi_4 = 1,4$ ).

$$\xi = 2 \cdot 1,5 + 0,5 + 1 + 1,4 = 5,9;$$

$$\Delta P_M = 5,9 \cdot \frac{15^2 \cdot 1,85}{2} = 1228 \text{ Па.}$$

Оскільки для крапельних рідин втрати тиску  $\Delta P_y$  мізерно малі, то вони в розрахунок не приймаються ( $\Delta P_y = 0$ ).

Перепад тиску для подолання гідростатичного стовпа рідини дорівнює нулю ( $\Delta P_r = 0$ ), оскільки випарник не сполучається із навколишнім середовищем.

Повний напір, необхідний для руху середовищ через апарат складе:

$$\Delta P = 9693 + 1228 = 10921 \text{ Па.}$$

## 2.5 Вибір допоміжного обладнання

Для всмоктуючого і нагнітального трубопроводів приймемо однакову швидкість плинину рідини, що дорівнює  $w = 2$  м/с.

Діаметр трубопроводу визначаємо за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (2.20)$$

де  $V$  – об'ємна витрата вихідної суміші, м<sup>3</sup>/с.

$$d = \sqrt{\frac{9,65 \cdot 10^{-4}}{0,785 \cdot 2}} = 0,025 \text{ м.}$$

Визначаємо критерій Рейнольдса для рідини в трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_p}{\mu}; \quad (2.21)$$

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 0,025 \cdot 777}{0,251 \cdot 10^{-3}} = 154780,$$

тобто режим турбулентний. Абсолютну шорсткість трубопроводу приймаємо  $\Delta = 2 \cdot 10^{-4}$  м. Тоді

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,025} = 0,008.$$

Далі отримаємо:

$$\frac{1}{e} = 125; \quad 560 \cdot \frac{1}{e} = 70000; \quad 10 \cdot \frac{1}{e} = 1250;$$

Для зони, що є автотельною по відношенню до Re:

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}; \quad (2.22)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot 0,008^{0,25} = 0,033.$$

Далі визначаємо суму коефіцієнтів місцевих опорів окремо для всмоктуючої і нагнітальної ліній.

Для всмоктуючої лінії:

- 1) вхід у трубу (приймаємо з гострими краями)  $\xi_1 = 0,5$ ;
- 2) 2 коліна з кутом  $90^\circ$   $\xi_2 = 2 \cdot 1,1 = 2,2$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2;$$

$$\Sigma \xi = 0,5 + 2,2 = 2,7.$$

Для нагнітальної лінії:

- 1) вентилі прямоточні, 2 шт.  $\xi_1 = 2 \cdot 0,65 = 1,3$ ;
- 2) 3 коліна з кутом  $90^\circ$   $\xi_2 = 3 \cdot 1,1 = 3,3$ ;
- 3) вихід із труби  $\xi_3 = 1$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3;$$

$$\Sigma \xi = 1,3 + 3,3 + 1 = 5,6.$$

Втрачений напір у всмоктуючій лінії знаходимо за формулою:

$$h_{П.ВС.} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (2.23)$$

де  $l, d_E$  – відповідно довжина і еквівалентний діаметр трубопроводу.

$$h_{П.ВС.} = \left( 0,033 \cdot \frac{5}{0,025} + 2,7 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,90 \text{ м.}$$

Втрачений напір в нагнітальній лінії знаходимо за формулою (2.23):

$$h_{П.НАГ.} = \left( 0,033 \cdot \frac{3}{0,025} + 5,6 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,95 \text{ м.}$$

Загальні втрати напору:

$$h_{П} = h_{П.ВС.} + h_{П.НАГ.}; \quad (2.24)$$

$$h_{П} = 1,90 + 1,95 = 3,85 \text{ м.}$$

Знаходимо напір насоса за рівнянням:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_p \cdot g} + H_G + h_{П}, \quad (2.25)$$

де  $(P_2 - P_1)$  – різниця тисків в апараті і в ємності, із якої подається рідина;

$H_G$  – геометрична висота підйому рідини.

$$H = \frac{0,3 \cdot 10^6}{777 \cdot 9,81} + 2 + 3,85 = 45,2 \text{ м.}$$

Корисну потужність насоса визначаємо за рівнянням:

$$N_{П} = \rho_p \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (2.26)$$



де  $Q$  – подача (витрата);

$H$  – напір насоса.

$$N_{\Pi} = 777 \cdot 9,81 \cdot 9,65 \cdot 10^{-4} \cdot 45,2 = 332,5 \text{ Вт.}$$

Потужність, яку повинен розвивати електродвигун насоса на вихідному валу при сталому режимі роботи:

$$N = \frac{N_{\Pi}}{\eta_{\text{пер}} \cdot \eta_n}, \quad (2.27)$$

де  $\eta_n, \eta_{\text{пер}}$  – коефіцієнти корисної дії відповідно насоса і передачі від електродвигуна до насоса. Приймаємо  $\eta_n = 0,6$  і  $\eta_{\text{пер}} = 1$ .

Отримуємо:

$$N = \frac{332,5}{1 \cdot 0,6} = 554 \text{ Вт.}$$

Вибираємо відцентровий насос марки ЦНС 8-65 з параметрами: об'ємна подача насоса  $8 \text{ м}^3/\text{год.}$ ; напір насоса  $65 \text{ м}$ ; потужність, споживана насосом  $17,5 \text{ кВт}$ ; частота обертання  $2800 \text{ об/хв}$ .

Ємність для тимчасового зберігання толуолу розраховуємо, виходячи із 3–5 годинного резерву робочого часу і з урахуванням коефіцієнта заповнення  $\psi = 0,8 \dots 0,85$ . Приймаємо  $\psi = 0,82$ .

Розрахунковий об'єм ємності:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}, \quad (2.28)$$

де  $G$  – загальна витрата суміші,  $\text{кг/год.}$ ;

$\tau$  – резерв робочого часу,  $\tau = 3$  год.;

$\rho$  – густина вихідної суміші,  $\rho = 777$  кг/м<sup>3</sup>.

$$V_{EP} = \frac{2700 \cdot 3}{0,82 \cdot 777} = 12,7 \text{ м}^3.$$

Задаємося стандартизованим діаметром ємності  $D = 2,0$  м, тоді її висота складе:

$$H = \frac{V_{EP}}{0,785 \cdot D^2}; \quad (2.29)$$

$$H = \frac{12,7}{0,785 \cdot 2,0^2} = 4,0 \text{ м}.$$

## 3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 3.1 Вибір конструкційних матеріалів [13, 14]

Вибір конструкційного матеріалу для проєктованого елемента, вузла або апарата є важливим етапом в процесі проєктування, і його слід виконувати з урахуванням ряду ключових факторів, що визначають умови експлуатації. Цей вибір взаємодіє з такими параметрами, як температура, тиск, величина навантаження та характер агресивного впливу середовища. Нижче наведено деякі основні аспекти, які слід враховувати при виборі конструкційного матеріалу:

**1. Механічні властивості.** Матеріал повинен мати необхідні механічні характеристики для витримання навантажень та деформацій, які відбуваються в умовах експлуатації.

**2. Термічна стійкість.** Врахування температурного режиму є критичним для уникнення деформацій та руйнувань матеріалу при високих чи низьких температурах.

**3. Стійкість до корозії.** У випадку взаємодії з агресивним середовищем важливо обрати матеріал, який має високу стійкість до корозії та окислення.

**4. Токсичність та екологічна придатність.** У випадку, якщо конструкційний елемент контактує з продуктами чи середовищем, важливо враховувати токсичність та екологічну придатність матеріалу.

**5. Вартість та доступність.** Вибраний матеріал повинен бути вартісним та доступним для забезпечення ефективної технології виготовлення виробу.

**6. Можливість обробки та формування.** Матеріал повинен піддаватись ефективній обробці та формуванню, що сприяє технологічності виготовлення виробу.

Оскільки апарат використовується для проведення технологічного процесу з використанням речовини, яка характеризується невеликою агресивністю, то вирішено використовувати сталь Ст3 як конструкційний матеріал. Цей вибір

зумовлений кількома ключовими перевагами, які сталь Ст3 може надати у контексті технологічного процесу. Сталь Ст3 є оптимальним вибором завдяки своїм механічним та хімічним властивостям, оскільки вона може ефективно опиратися на вплив речовини з обмеженою агресивністю. Даний матеріал вирізняється високою міцністю та доброю деформованістю як при гарячій, так і при холодній обробці.

Сталь Ст3 відмінно піддається обробці та зварюванню, що спрощує виготовлення корпусних деталей шляхом гнуття та гарантує високу якість зварювальних швів. Можливість легкої деформації в гарячому і холодному стані робить сталь Ст3 ідеальним матеріалом для виготовлення різноманітних деталей та елементів конструкції.

Для елементів випарника, які не знаходяться у прямому контакті з робочим середовищем, визначено використання різних матеріалів для забезпечення оптимальних характеристик та надійності конструкції.

Болти, гайки та шайби виготовляємо зі сталі 35. Сталь 35 обрана для цих елементів завдяки своїй високій міцності та стійкості до механічних навантажень. Це забезпечує надійне кріплення та довговічність болтів, гайок і шайб.

Використання сталі 3сп для опори апарату обумовлено її доброю міцністю та відмінною стійкістю до деформацій. Це забезпечить стійкість та надійну опору для всього апарату.

Пароніт ПОН-1 є оптимальним вибором для обтюрації через його високу стійкість до впливу агресивних середовищ та ефективні властивості утримання герметичності. Виготовлений із азбокаучукової маси, він забезпечує надійне ущільнення та довговічність.

### **3.2 Розрахунки на міцність та стійкість [13, 14]**

Приймаємо робочий тиск у міжтрубному просторі 0,2 МПа. Знаходимо величину нормативного допустимого напруження для сталі Ст3 при розрахунковій температурі:  $\sigma^* = 202$  МПа.

Допустиме напруження:

$$[\sigma] = \sigma^* \cdot \eta, \quad (3.1)$$

де  $\eta = 1$  – поправковий коефіцієнт для листового прокату.

$$[\sigma] = 202 \cdot 1 = 202 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження при гідравлічних випробуваннях:

$$[\sigma]_{II} = \frac{\sigma_T^{20}}{1,1}, \quad (3.2)$$

де  $\sigma_T^{20} = 280 \text{ МПа}$  – межа плинності сталі Ст3 при температурі  $20^\circ\text{C}$ .

$$[\sigma]_{II} = \frac{280}{1,1} = 255 \text{ МПа.}$$

Далі визначаємо розрахунковий тиск:

$$P_p = P + P_r, \quad (3.3)$$

де  $P = 0,2 \text{ МПа}$  – робочий тиск;

$P_r$  – гідростатичний тиск середовища.

Гідростатичний тиск середовища:

$$P_r = g \cdot \rho_p \cdot H_p; \quad (3.4)$$

$$P_r = 9,81 \cdot 777 \cdot 0,518 = 0,004 \text{ МПа;}$$

$$P_p = 0,2 + 0,004 = 0,204 \text{ МПа.}$$

Оскільки розрахунковий тиск менше 0,5 МПа, то пробний тиск при гідравлічних випробуваннях визначаємо за рівнянням:

$$P_H = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot P_p \cdot [\sigma]_{20}}{[\sigma]}, 0,3 \right\}, \quad (3.5)$$

де  $[\sigma]_{20} = \sigma_{20}^* = 196 \text{ МПа}$  – допустиме напруження сталі Ст3 при 20°C.

$$P_H = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot 0,204 \cdot 196}{202} = 0,3, 0,2 \right\} = 0,3 \text{ МПа.}$$

Розрахункова товщина циліндричної обичайки:

$$S_P^H = \max \left\{ \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_p}, \frac{P_H \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_H - P_H} \right\}; \quad (3.6)$$

де  $\varphi = 1$  – коефіцієнт міцності зварних швів із двостороннім суцільним проваром, виконаних автоматичним або напівавтоматичним зварюванням.

$$S_P^H = \max \left\{ \frac{0,204 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 202 - 0,204} = 0,4, \frac{0,3 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 255 - 0,3} = 0,47 \right\} = 0,47 \text{ мм.}$$

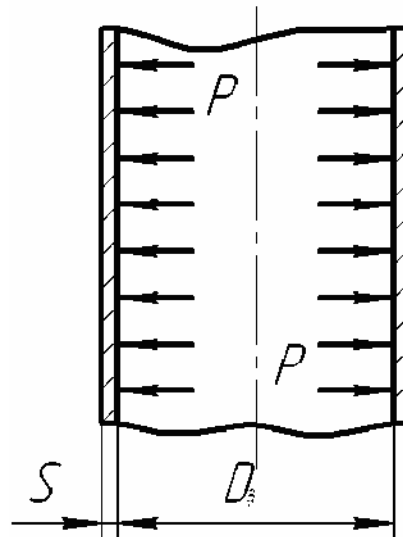


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема циліндричної обичайки

Виконавча товщина циліндричної обичайки:

$$S_{ц} \geq S_{P}^{II} + c, \quad (3.7)$$

де  $c$  – прибавка до розрахункових товщин конструктивних елементів:

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \quad (3.8)$$

$c_1$  – прибавка для компенсації корозії та ерозії;

$c_2$  – прибавка для компенсації мінусового допуску;

$c_3$  – технологічна прибавка.

Приймаємо, що  $c_2 = c_3 = 0$ . Прибавку для компенсації корозії та ерозії визначаємо за рівнянням:

$$c_1 = \Pi \cdot \tau, \quad (3.9)$$

де  $\Pi = 0,15$  мм/рік – проникність матеріалу;

$\tau = 15$  років – термін роботи апарата.

$$c = c_1 = 0,15 \cdot 15 = 2,25 \text{ мм};$$

$$S_{II} = 0,47 + 2,25 = 2,72 \text{ мм.}$$

Приймаємо із запасом міцності  $S_{II} = 4 \text{ мм}$ .

Розрахункова товщина еліптичного днища (рис. 3.2):

$$S_P^E = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_P \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot P_P} \\ \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma]_{II} - 0,5 \cdot P_{II}} \end{array} \right\}; \quad (3.10)$$

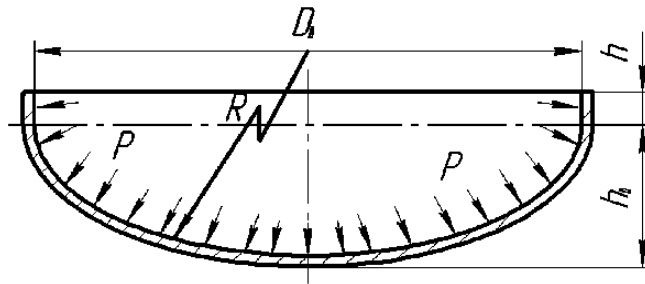


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема еліптичного днища

$$S_P^E = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,204 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 202 - 0,5 \cdot 0,204} = 0,4 \\ \frac{0,3 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 255 - 0,5 \cdot 0,3} = 0,47 \end{array} \right\} = 0,47 \text{ мм.}$$

Виконавча товщина еліптичного днища:

$$S_E \geq S_P^E + c; \quad (3.11)$$

$$S_E = 0,47 + 2,25 = 2,72 \text{ мм.}$$

Приймаємо  $S_E = 4 \text{ мм}$ .



Знаходимо масу обичайки кожуха:

$$m_k = \left[ \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot S_H)^2}{4} - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot H \cdot \rho, \quad (3.12)$$

де  $\rho = 7800 \text{ кг/м}^3$  – щільність сталі.

$$m_k = \left[ \frac{3,14 \cdot (0,8 + 2 \cdot 0,004)^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4} \right] \cdot 6 \cdot 7800 = 473 \text{ кг.}$$

Маса еліптичного днища і кришки відповідно:

$$m_E = 1,24 \cdot D^2 \cdot S_E \cdot \rho; \quad (3.13)$$

$$m_{E_{\text{дн}}} = 1,24 \cdot 0,8^2 \cdot 0,004 \cdot 7800 = 25 \text{ кг};$$

$$m_{E_{\text{кр}}} = 1,24 \cdot 0,5^2 \cdot 0,004 \cdot 7800 = 10 \text{ кг.}$$

Маса труб:

$$m_{mp} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_n^2 - d_{\text{вн}}^2) \cdot H \cdot n \cdot \rho; \quad (3.14)$$

$$m_{mp} = \frac{3,14}{4} \cdot (0,025^2 - 0,021^2) \cdot 6 \cdot 134 \cdot 7800 = 905 \text{ кг.}$$

Маса фланця з решіткою:

$$m_\phi = \frac{\pi \cdot D_\phi^2}{4} \cdot h_\phi \cdot \rho, \quad (3.15)$$

де  $D_\phi$  – зовнішній діаметр фланця, м;

$h_\phi$  – висота фланця, м.

$$m_\phi = \frac{3,14 \cdot 0,51^2}{4} \cdot 0,06 \cdot 7800 = 96 \text{ кг.}$$

Об'єм міжтрубного простору:

$$V_{\text{мтр}} = f_{\text{мтр}} \cdot H; \quad (3.16)$$

$$V_{\text{мтр}} = 0,2 \cdot 6 = 1,2 \text{ м}^3.$$

При коефіцієнті заповнення  $\varphi = 0,65$  маса толуолу в апараті складе:

$$m_x = V_{\text{мтр}} \cdot \rho_x \cdot \varphi; \quad (3.17)$$

$$m_x = 1,2 \cdot 777 \cdot 0,65 = 606 \text{ кг.}$$

Сила тяжіння апарату в робочому стані:

$$G = g \cdot (m_\kappa + m_{\text{Едн}} + m_{\text{Екр}} + m_{\text{мр}} + m_\phi + m_x); \quad (3.18)$$

$$G = 9,81 \cdot (473 + 25 + 10 + 905 + 96 + 606) = 20748 \text{ Н.}$$

Приймаємо кількість сідлових опор  $n = 2$  шт.

Навантаження на одну опору складе:

$$Q = \frac{G}{n}; \quad (3.19)$$

$$Q = \frac{20748}{2} = 10374 \text{ Н.}$$

Остаточно приймаємо стандартну сідлову опору 400-514-2-П.

## 4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА

### 4.1 Обґрунтування компоновки основного та допоміжного обладнання [15]

При плануванні розташування обладнання необхідно враховувати комплексний підхід, що охоплює виробничі, технічні та безпекові аспекти.

Зниження витрат та підвищення продуктивності завдяки правильному розміщенню обладнання може позитивно вплинути на прибутковість виробництва і підвищити конкурентоспроможність підприємства.

Мінімізація зайвих операцій та оптимізація розміщення обладнання сприяють підвищенню продуктивності та зниженню витрат. Планування розміщення обладнання з урахуванням логістики постачання сировини та транспортування готової продукції забезпечує безперебійну роботу виробництва.

Враховуючи низку ключових аспектів при обранні відкритого майданчика для розташування обладнання у нафтопереробній галузі, слід прагнути створити ідеальні умови для оптимального функціонування виробництва. Використання відкритого майданчика дозволяє розмістити обладнання та інфраструктуру таким чином, що це може призвести до значних економічних вигід при будівництві та подальшій експлуатації підприємства.

Обираючи відкритий варіант компоновки, ми здійснили ряд стратегічних виборів, орієнтованих на оптимізацію ефективності та безпеки виробництва. Один із ключових факторів, які слід враховувати, – це раціональне розміщення обладнання, і відкритий майданчик надає можливість здійснити це в найкращому вигляді. Ми можемо точно розпланувати розміщення обладнання та інфраструктури так, щоб кожен елемент буде розташований оптимально для максимальної продуктивності та ефективності виробництва. Це також дає можливість значно заощадити на будівельних витратах, оскільки не потрібно будувати обмежувальні стіни або дахи, які б лімітували розміщення обладнання.

Крім того, вибір відкритого майданчика надає переваги у зв'язку з доступністю для монтажу нового обладнання та проведення ремонтних робіт. Ми можемо легко підходити до будь-якого обладнання для його обслуговування, і це сприяє підвищенню загальної продуктивності завдяки можливості вчасного проведення технічного обслуговування та ремонтних робіт. Ця доступність також допомагає знижувати витрати, оскільки ми можемо оперативно реагувати на будь-які проблеми та уникати довгострокових перерв у виробництві.

Позиціонування виробничого обладнання на відкритому майданчику прирівнюється до стратегічного вибору, що надає чимало переваг для хімічних та харчових підприємств. Це рішення дозволяє керувати (контролювати) викидами газів і тепловиділенням, зменшуючи їх вплив на природу та забезпечуючи відповідність найсуворішим екологічним нормам. Відкритий майданчик виявляється важливим інструментом для ефективного контролю можливих вибухів та пожеж, які можуть виникнути на нафтогазових підприємствах, що забезпечує високий ступінь безпеки для персоналу та майна.

За допомогою цього підходу ми також залишаємо простір для майбутнього розширення наших виробничих потужностей та об'єктів, що створює сприятливі умови для динамічного розвитку нашого підприємства. Вільний простір дозволяє нам планувати та впроваджувати нові технології та обладнання, що сприяє підвищенню продуктивності та конкурентоспроможності на ринку.

При обранні розташування обладнання на відкритому майданчику, важливо дотримуватися рекомендацій та керуватися технічними нормами і стандартами безпеки. Бажано розташовувати важке і габаритне обладнання на позначці землі, оскільки це забезпечить стійкість та надійність під час експлуатації. Важливо враховувати необхідність високопрочних опорних конструкцій. Для опорних пристроїв рекомендується використовувати типові конструкції залізобетону. Вони відомі своєю міцністю та стійкістю до навантажень і погодних умов.

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

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:

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.

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. 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.

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 3 групи: перша група включає трубопроводи для небезпечних речовин; друга – для менш небезпечних; третя – 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.

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

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

## 4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання [16, 17]

Метод монтажу кожухотрубчастих теплообмінників на відкритому майданчику (на нульовій позначці) є важливою складовою їхнього встановлення, визначаючи ефективність та надійність їх функціонування. Цей підхід широко використовується для розташування великих промислових теплообмінників, які експлуатуються під відкритим небом. Такі теплообмінники можуть бути встановлені на підставках або спеціальних фундаментах. Деякі з них розміщуються на спеціальних підставках або в спорудах, спроектованих для захисту від погодних умов та забезпечення легкого доступу для обслуговування та ремонту.

Орієнтація теплообмінника може впливати на ефективність його роботи та потік робочого середовища. Вибір орієнтації повинен враховувати конкретні потреби процесу.

Транспортування теплообмінників в зібраному вигляді є зручним і економічним підходом, особливо для великих теплообмінників. Вибір засобу транспорту може включати в себе залізничні платформи, трейлери, автомашини, або навіть спеціалізовані робочі платформи для складних монтажних робіт. Транспортування в зібраному вигляді сприяє уникненню пошкоджень та спрощує процес монтажу на місці призначення.

Теплообмінники встановлюються відповідно до проекту та можуть бути розміщені як горизонтально, так і вертикально на різних відмітках. Для забезпечення стійкості та надійності теплообмінників застосовують опорні конструкції. Ці опорні конструкції можуть бути реалізовані у вигляді фундаментів, що складаються з двох бетонних або залізобетонних стовпів з анкерними болтами (при низькому горизонтальному розташуванні), або висотних металоконструкцій, включаючи балки (при вертикальному розташуванні та горизонтальному розташуванні на великих висотах).

Для забезпечення стабільності та надійності теплообмінників при їх монтажі до корпусу апарату прикріплюють дві опори. Відстань між цими опорами від-



повідас вимогам проекту та стандартам. У випадках, коли необхідно встановити теплообмінник на існуючому фундаменті, може бути дозволено змінювати відстань між опорами в межах невеликих варіацій.

Між корпусом теплообмінника та опорами апарата використовуються підкладки з листової сталі. Ці підкладки допомагають запобігти ушкодженням корпусу теплообмінника та забезпечують рівномірний розподіл навантаження. Для вертикально розташованих теплообмінників, замість опор, прикріплюють лапи з ребрами жорсткості, що також сприяє стабільності та надійності їхньої установки.

У більшості випадків для встановлення теплообмінників використовують самохідні крани, які дозволяють позиціонувати їх у потрібне проектне положення. Проте, іноді виникають ситуації, коли підняти великі теплообмінники за допомогою одного крану неможливо через обмежену вантажопідйомність цього крану. У таких випадках використовують два крани, які працюють спільно та координовано для підняття теплообмінників.

Коли мова йде про встановлення теплообмінників у два або більше яруси, рекомендується використовувати стратегію підняття їх великими блоками, які складаються з кількох окремих апаратів після з'єднання їх взаємною трубопровідною системою. Під час підняття таких блоків теплообмінників, їх розміщують у жорсткі решітчасті контейнери, до яких пристібають підйомні стропи. Цей підхід дозволяє ефективно та безпечно переміщати та встановлювати великі теплообмінники.

Отже, процес встановлення теплообмінників може бути досить складним, особливо в разі великих і багаторівневих конструкцій. Використання відповідних підйомних засобів та стратегій допомагає забезпечити безпеку та ефективність цього процесу.

Перевірка та налаштування трубопровідної обв'язки теплообмінника важлива стадія процесу монтажу. Перш ніж розпочати підключення трубопроводів, необхідно впевнитися, що корпус теплообмінника розташований правильно і закріплені болти, які з'єднують опори або лапи з постаментом. Це визначальний момент для забезпечення коректної роботи системи теплообміну.

Для впевненості в точному розташуванні теплообмінника використовують рівень або схил. Якщо необхідно, під опорні площини додають сталеві планки для досягнення відповідної висоти та рівномірного розподілу навантаження.

При вивірці теплообмінних апаратів відхилення від проектних осей та позначок, а також по горизонталі та вертикалі складають: головних осей апарату  $\pm 10$  мм; осі вертикального апарату від вертикальності – 3 мм на 1 м (але не більше 35 мм); горизонтального апарату від горизонтальності чи заданого положення (ухилу) – 0,3 мм на 1 м.

Під час горизонтального розташування теплообмінників виникають температурні деформації корпусу, які можуть досягати значних розмірів, а саме кількох міліметрів. Щоб компенсувати ці деформації і забезпечити правильне положення теплообмінника між опорами, одна з опор повинна бути рухомою. Зазвичай ця нерухома опора закріплюється на боці трубної решітки і фіксується тільки контргайками, а гайки болтів рухомої опори, які мають овальні вирізи, не затягуються на 1–1,5 мм. Важливо враховувати, що зазор між болтами та овальними вирізами повинен бути розташованим у напрямку можливого подовження теплообмінника. Крім того, поверхні ковзання слід ретельно зачищати, щоб уникнути защемлення і забезпечити безперешкодний рух опор.

Теплообмінники, які виробляються заводом-виробником, піддаються опресуванню на пробний тиск, який демонструє їхню надійність і герметичність. Тому, під час монтажу на монтажному майданчику, не потрібно повторно проводити опресування кожного теплообмінника окремо. Зазвичай, обмежуються перевіркою загальної системи теплообміну разом із трубопроводною обв'язкою після завершення монтажних робіт. Це спрощує процес монтажу і забезпечує безпеку та надійність роботи теплообмінної системи.

Теплообмінну апаратуру слід призупиняти для ремонту у випадках, коли виникають наступні основні несправності:

**1. Забруднення поверхні теплообміну.** Засмічення або накип на поверхні теплообмінника може суттєво зменшити ефективність теплового обміну. При наявності забруднень або нальоту, апаратура повинна бути зупинена для очищення теплообмінного обладнання та відновлення його ефективності.

**2. Виявлення пропуску рідини.** Виявлення витоку рідини з теплообмінника може бути небезпечним і може призвести до втрати робочого середовища або навіть потенційно небезпечних ситуацій. В такому випадку теплообмінний апарат також слід зупинити для виправлення проблеми та забезпечення безпеки та надійності процесу.

Ремонт теплообмінних апаратів є важливою процедурою для забезпечення їх надійної та ефективної роботи протягом тривалого періоду експлуатації. Накип, бруд і інші забруднення можуть накопичуватися на поверхні теплообмінника з часом і значно зменшувати ефективність теплового обміну. Під час ремонту, такі забруднення видаляються шляхом механічного або хімічного очищення, відновлюючи таким чином оптимальну теплопередачу.

Після очищення поверхні нагріву може бути необхідно провести ремонт або підкріплення цих поверхонь. Це включає в себе роботи з виправлення тріщин, подряпин, а також заміну зіпсованих частин або елементів теплообмінника. Запірна апаратура, така як клапани та вентиля, які контролюють потік робочого середовища, також може вимагати обслуговування та ремонту. Це може включати в себе заміну ущільнень, регулювання робочого тиску та інші дії для забезпечення правильного функціонування.

Ефективна ізоляція допомагає зберігати тепло та запобігає втраті енергії. Під час ремонту може бути необхідно відновлювати або замінювати ізоляційний матеріал, щоб забезпечити його надійність та ефективність.

Очищення осаду, який відкладається на стінках теплообмінного апарата, є важливою операцією для збереження ефективності теплового обміну. Існують різні методи очищення теплообмінних поверхонь, і вибір методу залежить від виду та ступеня забруднення:

**1. Хімічне очищення.** Цей метод використовує хімічні речовини для пом'якшення та розчинення осаду на поверхні нагріву. Зазвичай, для цього використовується каустична сода для пом'якшення осаду, а потім слабкий розчин соляної кислоти для розчинення осаду. Хімічне очищення часто використовується для очищення міжтрубного простору.

**2. Термічне очищення.** Цей метод базується на використанні різних коефіцієнтів теплового розширення між осадам і металом. Поверхню нагрівають спочатку підігрівачем перегрітою парою, а потім охолоджують холодною водою, що очищена хімічним методом. В результаті, частки осаду відокремлюються від поверхні нагріту і потім видаляються вручну або за допомогою промивання. Цей метод ефективний для очищення твердого та крихкого осаду.

**3. Гідравлічне очищення.** Цей метод використовує струмінь води високої швидкості (понад 50 м/с) для видалення осаду. Він застосовується для видалення крихкого осаду.

**4. Механічне очищення.** Цей метод включає в себе використання металевих щіток або щіток для очищення поверхонь. Чищення труб проводиться за допомогою спеціальних пристроїв, які використовуються для видалення осаду. Під час чищення в трубки подається вода для вимивання відділеного осаду.

Ремонт трубчастої поверхні теплообмінника – це складний процес, що включає в себе декілька важливих етапів для відновлення ефективності теплообміну та забезпечення надійності системи. Першим кроком є детальний огляд трубчастої поверхні теплообмінника. Це включає в себе визначення ступеня зносу, корозії, наявності тріщин чи інших пошкоджень. Якщо в процесі огляду були виявлені труби, які вже не здатні до нормальної роботи, їх потрібно видалити. Це може включати в себе витягування або вирізання таких труб.

Для заміни видалених труб потрібно підготувати нові труби, які відповідають вимогам і параметрам системи. Крім того, може знадобитися підготовка трубної решітки, на яку будуть встановлюватися нові труби. Нові труби встановлюються на місце видалених та здійснюється їх розвальцювання. Цей процес важливий для створення надійного з'єднання між трубами та трубною решіткою, що забезпечує ефективний тепловий обмін.

Після завершення ремонту трубчастої поверхні важливо піддати теплообмінний апарат випробуванням для перевірки його герметичності та ефективності. Це може включати в себе гідравлічне або пневматичне випробування для переконання відсутності витоків і забезпечення правильної роботи.

Своєчасне виявлення недоліків та їх усунення є важливою складовою для забезпечення надійної та безпечної роботи установки в промисловому виробництві. Виконання таких робіт вимагає дотримання правил техніки безпеки і врахування специфіки робочого середовища. Усі роботи повинні проводитися з урахуванням вимог щодо безпеки та запобігання пожежам. Вогневі роботи повинні бути заборонені, якщо необхідно виконувати роботи в районі, де є потенційна небезпека загоряння.

У ході поточного ремонту випарника зазвичай видаляють кришки, камери та трубопроводи. Внутрішні поверхні очищують від бруду та накипу. Для забезпечення надійного з'єднання виготовляють прокладки з отворами для болтів і проціс проживлення болтів. Після встановлення кришок і камер проводиться гідравлічне випробування разом з іншими необхідними роботами.

Під час середнього ремонту зазвичай проводяться ті самі роботи, що і при поточному, але додатково може бути здійснена заміна труб до 10% від загальної кількості. При капітальному ремонті також проводяться ті ж роботи, що і при поточному, але додатково може бути здійснена заміна труб до 25% від загальної кількості.

Під час ремонтних та монтажних робіт працівникам обов'язково потрібно використовувати засоби індивідуального захисту, такі як спецодяг, спецвзуття, рукавиці, монтажні шоломи, запобіжний пояс з рятувальною мотузкою, та інші відповідно до потреб та стандартів безпеки. При використанні лісів та драбин важливо перевіряти їх надійне установлення та строк випробування. Це гарантує безпеку під час робіт на висоті.

Перед початком робіт із підвищеною небезпекою необхідно оформити наряд-допуск, в якому визначаються обсяг робіт, заходи безпеки, засоби захисту, і вказується відповідальна особа за проведення робіт. Працівники також повинні пройти інструктаж перед початком робіт.

## 5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

### 5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу [18]

Ректифікаційна установка виділення бензолу і толуолу являє собою безперервний процес, в якому всі основні апарати технологічної схеми з'єднані послідовно. Безперервність виробництва є однією з ключових передумов для автоматизації виробництва. Безперервний процес і автоматизація виробничих операцій є взаємозалежними факторами, оскільки безперервне виробництво стає найбільш ефективним при його комплексній автоматизації.

Під час проведення процесу ректифікації важливо здійснювати контроль за основними параметрами, що визначають ефективність та якість процесу. Серед цих параметрів вирізняють такі ключові характеристики: витрату, рівень, температуру та тиск.

Важливо вимірювати та контролювати витрату сировини або розчину, яка подається у ректифікаційну колону. Витрата визначає кількість матеріалу, що піддається ректифікації, і впливає на рівень концентрації продукту. Рівень ректифікаційної колони вказує на кількість ректифікації, яку отримує продукт. Забезпечення правильного рівня дозволяє досягти бажаної чистоти та концентрації виготовленого продукту.

Контроль температури важливий для забезпечення оптимальних умов ректифікації. Температурні параметри впливають на розділення компонентів і конденсацію парів, що відіграє ключову роль у формуванні фракцій продукту.

Тиск у ректифікаційній колоні визначає умови кипіння та конденсації. Оптимальний тиск сприяє відповідному розділенню компонентів та формуванню бажаного продукту.

Процес ректифікації є одним з основних процесів хімічної технології. Його ефективність визначається складом кінцевого продукту. Залежно від технологічних особливостей, цей кінцевий продукт може бути дистилятом або

кубовим залишком. Основною метою управління є забезпечення сталого складу кінцевого продукту. Склад іншого продукту може змінюватися в певних межах через зміни в початковому складі суміші. У подальшому розглядатимемо дистиллят як цільовий продукт.

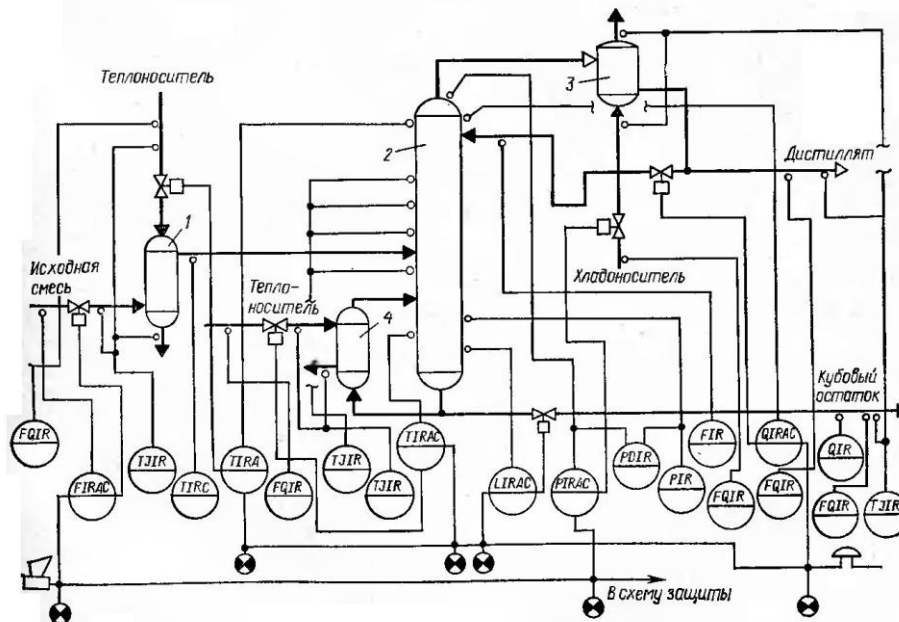


Рисунок 5.1 – Типова схема автоматизації процесу ректифікації:

- 1 – теплообмінник вихідної суміші; 2 – ректифікаційна колона;  
3 – дефлегматор; 4 – кип'ятильник

Ректифікаційна установка є складним об'єктом управління із значним запізненням в часі (наприклад, у деяких випадках вихідні параметри процесу починають змінюватися лише через 1–3 години після зміни параметрів сировини). Вона включає в себе велику кількість параметрів, які характеризують процес, взаємодію між ними, розподіл їх по системі та інші складності.

Ця установка вимагає від операторів інтенсивного контролю і управління через розгалуженість та взаємозалежність процесних параметрів. Успішне управління ректифікаційним процесом вимагає високого рівня фаховості та систематичного моніторингу.

Складність регулювання процесу пояснюється також частотою та амплітудою збурень. В об'єкті відбуваються такі збурення, як зміни початкових

параметрів вихідної суміші, а також теплоносіїв і холодоносіїв, зміни властивостей поверхонь теплообміну, відкладення речовин на стінках тощо. Крім того, на технологічний режим ректифікаційних колон, які встановлені під відкритим небом, впливають коливання температури атмосферного повітря.

Концентрація безпосередньо залежить від початкових параметрів вихідної суміші. Зі зміною цих параметрів в процес можуть надходити найсильніші збурення, особливо через канал складу вихідної суміші, оскільки склад визначається попереднім технологічним процесом.

Отже, якщо дистилят є цільовим продуктом, то для досягнення мети управління слід регулювати наступні параметри: витрату вихідної суміші, температуру вихідної суміші, тиск у верхній частині колони, склад рідини в верхній частині колони, температуру і рівень рідини в кубі.

## **5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання [19]**

Вибір приладів автоматизації є важливим етапом в розробці будь-якої автоматизованої системи. Важливо обирати прилади, які вже випускаються серійно та мають відому надійність. Це допоможе уникнути можливих проблем з обслуговуванням і підтримкою.

У стандартній конфігурації МСКУ-М реалізовано використання різноманітних блоків, кожен з яких відіграє ключову роль у забезпеченні ефективності та точності системи. У виробництві толуолу використовуються пневматичні виконавчі механізми типу "МІМ", що дозволяє ефективно керувати різними процесами. Електропневмоперетворювач ЕПП-63 встановлюється на виході сигналу з уніфікованого вимірювально-керуючого комплексу, забезпечуючи перетворення сигналів між електричним та пневматичним струмами для взаємодії з іншими елементами системи.



SIEMENS пропонує широкий вибір вимірювальних перетворювачів температури, які надійно функціонують навіть у найскладніших умовах. Датчики температури цієї фірми застосовуються у різних промислових галузях, таких як хімічна, фармацевтична, харчова, енергетична та інші. Вони гарантують точне вимірювання температури, навіть в екстремальних умовах.

Серія перетворювачів SITRANS T включає універсальні перетворювачі з вихідним сигналом 4–20 мА + HART, які можна програмувати за допомогою ПК. Ці перетворювачі дозволяють зручно контролювати температуру в вашому процесі та передавати дані в автоматизовану систему керування.

Окрім того, доступні варіанти термометрів з цифровою індикацією показань, що полегшують спостереження за температурою. Якщо вам потрібно використовувати датчики температури в вибухонебезпечних середовищах, SIEMENS також пропонує вибухозахищені варіанти датчиків.

Сімейство витратомірів SITRANS F від SIEMENS є ідеальним рішенням для точного та безперервного вимірювання витрати різних середовищ. Вони використовують сучасні та надійні методи для вимірювання витрати рідини та суспензій. Серія SITRANS F серії M Magflo використовує магнітоіндукційний принцип для вимірювання витрати електропровідних рідин та суспензій. Ці витратоміри є надійними та дозволяють вимірювати витрату різних середовищ, забезпечуючи точність та стабільність результатів. За допомогою витратомірів SITRANS F можливо ефективно контролювати витрату рідин та суспензій і підтримувати оптимальний рівень виробництва.

Сімейство рівнемірів SIEMENS в рамках серії SITRANS L є ідеальним рішенням для контролю рівня рідких і сипких середовищ. Вони надають можливість вирішити широкий спектр завдань, пов'язаних з контролем рівня в різних умовах і середовищах. Сигналізатор граничного рівня Pointek CLS 200 є універсальним і відрізняється високою хімічною стійкістю. Він призначений для надійного визначення рівня рідини чи сипких матеріалів в ємностях та резервуарах. Цей

сигналізатор допомагає попередити переливання або витік рідини, що може призвести до аварійних ситуацій.

Застосування рівнемірів SIEMENS забезпечує надійний та точний контроль рівня рідких і сипких середовищ, що сприяє безпеці та ефективності виробництва. Такі прилади дозволяють уникнути небажаних ситуацій та забезпечують безперебійну роботу системи.

Сімейство вимірювальних перетворювачів SITRANS P, представлене в серії ZD, гарантує надійне та точне вимірювання різних параметрів тиску та рівня рідини в різних умовах та середовищах. Ці перетворювачі призначені для вимірювання наступних параметрів: надлишковий тиск, вакууметричний тиск, абсолютний тиск, диференціальний тиск.

Вони підходять для вимірювання тиску рідких, газоподібних та пароподібних середовищ. Крім того, ці перетворювачі можуть бути використані для вимірювання гідростатичного рівня рідини в ємностях.

Перетворювачі SITRANS P серії ZD мають цифровий індикатор, який дозволяє зручно відслідковувати вимірювані параметри тиску та рівня. Вони володіють високою точністю та надійністю, що робить їх ідеальними для застосування в різних промислових секторах та умовах.

## 6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

### 6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів [20]

Першим кроком є вивчення і дотримання всіх законів та нормативних актів, пов'язаних з охороною праці, які стосуються нафтопереробного виробництва. Це включає в себе відповідні дозволи та ліцензії для ведення діяльності. Усі працівники повинні пройти навчання щодо охорони праці та техніки безпеки. Це включає в себе навчання з праці в небезпечних умовах та навчання з використання обладнання та матеріалів.

Проведення оцінки ризиків та ідентифікація потенційних небезпек для працівників та довкілля. Це допомагає визначити, які кроки потрібно вжити для запобігання нещасних випадків та аварій. Регулярна перевірка та обслуговування обладнання для запобігання аварій. Робочі місця та обладнання повинні відповідати нормативам безпеки.

Використовувати особисті захисні засоби (засоби дихання, рукавиці, захисний одяг тощо). Запровадження процедур та правил безпеки для роботи з небезпечними речовинами. Проведення навчання щодо евакуації у разі аварії, а також наявність пожежного обладнання та системи пожежної безпеки.

Підготовка персоналу до надання першої допомоги та наявність медичних служб для надання кваліфікованої допомоги при нещасних випадках. Збір та збереження інформації про нещасні випадки та аварії, а також про заходи, проведені для їх запобігання. Регулярні аудити та перевірки щодо відповідності стандартам безпеки та виявлення можливих порушень.

Забезпечення охорони праці на нафтопереробному заводі є обов'язковим і допомагає зменшити ризики для працівників та забезпечити стабільну та безпечну роботу виробництва.

Аналіз шкідливих факторів на НПЗ включає в себе оцінку потенційних ризиків і негативних впливів на здоров'я працівників та навколишнє середовище. Для цього проводяться спеціальні оцінки та аудити. Ось деякі шкідливі фактори, які можуть бути враховані в аналізі НПЗ:

1. Токсичні речовини. Оцінка виділення і розповсюдження токсичних хімічних речовин у повітря і воду. Особливу увагу приділяються сполукам, які можуть викликати отруєння або інші негативні впливи на здоров'я.

2. Вибухонебезпечні речовини. Оцінка вибухонебезпечності газів і речовин, а також умов, що можуть сприяти вибухам і пожежам на заводі.

3. Шум і вібрація. Аналіз рівнів шуму та вібрації, які можуть впливати на слух та фізичний стан працівників.

4. Тиск і температура. Оцінка впливу високого або низького тиску та температури на працівників та процеси виробництва.

5. Забруднення навколишнього середовища. Оцінка викидів і скидів речовин у повітря, воду та ґрунт, що можуть негативно впливати на екологію регіону.

6. Пожежна безпека. Оцінка систем пожежної безпеки та ризику виникнення пожеж на заводі.

Обслуговуючий персонал установки повинен дотримуватися наступних важливих вимог і процедур:

- контроль параметрів технологічного процесу: відповідно до технологічної карти, обслуговуючий персонал повинен надавати пріоритетний перевірку і витриманню параметрів технологічного процесу, таких як тиск, рівень та температура в апаратах;

- забезпечення герметичності обладнання: слід постійно стежити за герметичністю технологічного обладнання та трубопроводів для запобігання витокам речовин та надзвичайним ситуаціям;

- дотримання інструкцій з експлуатації: важливо витримувати всі вимоги та інструкції по експлуатації апаратів, особливо тих, що працюють під тиском, для забезпечення безпеки та ефективності;

- проведення ревізії та ремонту: слід вчасно і систематично проводити роботи з ревізії та ремонту обладнання і трубопроводів відповідно до розкладу, визначеного Положенням про планово-попереджувальні ремонти;

- контроль запобіжних пристроїв: обслуговуючий персонал повинен регулярно перевіряти стан та справність запобіжних пристроїв, які встановлені на апаратах, і вживати заходів для їх правильного функціонування.

- дренаж апаратів: дренаж апаратів слід проводити відповідно до затвердженого графіку, записуючи всі відомості в журнал дренажів. Не допускається скидання нафтопродуктів в каналізацію.

- контроль за станом КВП: обслуговуючий персонал повинен регулярно перевіряти справність контрольно-вимірювальних приладів (КВП) та порівнювати показання первинних приладів з вторинними для відстеження правильності вимірювань.

Дотримання цих вимог та процедур допомагає забезпечити безпеку, надійність та ефективність технологічного процесу на нафтопереробному заводі.

Небезпека утворення статичної електрики завжди присутня в процесі роботи з рідинами та газами. У цьому випадку, можливість утворення статичної електрики існує при відносному переміщенні двох тіл, які перебувають у контакті, таких як тіла, шари рідини, або при руху потоку рідини, струменя пари чи газу.

Нагромадження статичної електрики існує під час процесу обробки та переміщення рідин і газів, і небезпеку варто усувати за допомогою відповідних заходів безпеки та антистатичних засобів, щоб запобігти виникненню пожеж та вибухів і захистити життя та здоров'я працівників.

Будівництво та обладнання приміщень ректифікаційних відділень слід вести із суворим дотриманням норм і правил пожежної безпеки для будівель, що належать до категорії А. Важливо застосовувати наступні заходи та стандарти пожежної безпеки:

1. Вибудовувати приміщення ректифікаційних відділень відповідно до вимог категорії А, що включають в себе застосування вогнезахисних та вибухозахисних матеріалів.
2. Забезпечити належну систему вентиляції та витяжки, щоб в разі витoku легкозаймистих речовин можливе негайне видалення їх із приміщення.

3. Використовувати вибухозахищене обладнання та матеріали відповідно до класифікації вибухонебезпечності.
4. Встановити системи автоматичного пожежогасіння та сигналізації в разі виявлення небезпеки.
5. Провести блискавкозахист будівель згідно із стандартами і вимогами для запобігання небезпеці статичної електрики та уникнення пожеж.

Запровадження цих заходів та дотримання вищезгаданих норм та правил пожежної безпеки допомагають зменшити ризик пожежі та вибуху під час виробничого процесу.

## 6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора

Для запобігання враженню струмом обслуговуючого персоналу всі апарати та механізми що використовують в процесі виробництва електричний струм (насоси, компресори, газодувки) повинні підлягати обов'язковому заземленню.

Виконаємо розрахунок захисного заземлення для стаціонарної установки.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані до розрахунку захисного заземлення

Показник	Труба
Довжина заземлювача, см	250
Діаметр заземлювача, см	7
Ширина з'єднувальної смуги	7
Ґрунт	Торф
Кліматична зона	II
Заземлювачі заглиблені і розміщені в один ряд	глибина заглиблення $h = 80$ см

У відповідності до вимог ПУЕ визначається допустимий опір розтіканню струму в заземленні  $R_3$ . Для мереж з напругою до 1000 В можна взяти  $R_3 = 4$  Ом.

Визначається питомий опір ґрунту, який рекомендовано для розрахунків,  $\rho_{\text{табл.}}$  Ом·см). Для торфу –  $\rho_{\text{табл.}} = 2000$  Ом·см.

Визначаються підвищувальні коефіцієнти для труб (вертикальних заземлювачів)  $K_{\text{П.Т}}$  та для з'єднувальної смуги  $K_{\text{П.С}}$ , які враховують зміну опору ґрунту в різні пори року залежно від наявності опадів. Приймаємо:  $K_{\text{П.Т}} = 1,8$ .  $K_{\text{П.С}} = 4,0$ .

Визначається питомий розрахунковий опір ґрунту для вертикальних електродів (труб)  $\rho_{\text{розр.т}}$  із урахуванням несприятливих умов за допомогою підвищувального коефіцієнта:

$$\rho_{\text{розр.т}} = \rho_{\text{табл.}} \cdot K_{\text{П.Т}}, \text{ Ом}\cdot\text{см}; \quad (6.1)$$

$$\rho_{\text{розр.т}} = 2000 \cdot 1,8 = 3600 \text{ Ом}\cdot\text{см}. \quad (6.2)$$

5. Визначається питомий розрахунковий опір ґрунту для горизонтального заземлювача (з'єднувальної смуги):

$$\rho_{\text{розр.н}} = \rho_{\text{табл.}} \cdot K_{\text{П.С}}, \text{ Ом}\cdot\text{см}; \quad (6.3)$$

$$\rho_{\text{розр.с}} = 2000 \cdot 4 = 8000 \text{ Ом}\cdot\text{см}. \quad (6.4)$$

6. Визначається відстань від поверхні землі до середини вертикального заземлювача:

$$t = h_3 + \frac{l_m}{2}, \text{ см}, \quad (6.5)$$

де  $h_3$  – глибина заглиблення труб, см;

$l_m$  – довжина вертикального заземлювача.

$$t=80+250/2=205 \text{ см} \quad (6.6)$$

Визначається опір розтіканню струму для одиночного вертикального заземлювача, який розташований нижче від поверхні землі:

$$R_T = 0,366 \frac{\rho_{\text{розр.Т}}}{l_T} \left( \lg \frac{2l_T}{d} + \frac{1}{2} \lg \frac{4t + l_T}{4t - l_T} \right), \text{ Ом.} \quad (6.7)$$

$$R_T = 0,366 \times \frac{3600}{250} \left( \lg \frac{2 \times 250}{7} + \frac{1}{2} \lg \left( \frac{4 \times 205 + 250}{4 \times 205 - 250} \right) \right) = 10,5 \text{ Ом.} \quad (6.8)$$

Визначається необхідна кількість вертикальних заземлювачів без урахування коефіцієнта екранування:

$$n_T \cdot \eta_{e.T.} = \frac{R_T}{R_3}; \quad (6.9)$$

$$n_T \cdot \eta_{e.T.} = \frac{10,5}{4} = 2,63 \text{ шт.}, \quad (6.10)$$

прийmemo 3 шт.

Визначається відстань між вертикальними заземлювачами  $L_T$  із співвідношення

$$c = \frac{L_T}{l_T}. \quad (6.11)$$

Для стаціонарних заглиблених заземлювачів це співвідношення береться таким:  $C = 1$ .  $L_T = l_T = 250 \text{ см.}$

Визначаємо коефіцієнт екранування труб при числі труб  $n_T$  та відношенні:



$$c = \frac{L_T}{l_T} \cdot \eta_{e_T} = 0,78. \quad (6.12)$$

Визначаємо необхідну кількість вертикальних заземлювачів з урахуванням коефіцієнта екранування:

$$n_{T.E} = \frac{R_T}{R_3 \cdot \eta_{E.T}}; \quad (6.13)$$

$$n_{T.E} = \frac{10,5}{4 \times 0,78} = 3,37 \text{ шт}, \quad (6.14)$$

приймаємо 4 шт.

Визначаємо розрахунковий опір розтіканню струму при прийнятому числі вертикальних заземлювачів  $n_{T.E}$ :

$$R_{\text{розр.тр}} = \frac{R_T}{n_{T.E} \cdot \eta_{E.T}}; \quad (6.15)$$

$$R_{\text{розр.тр}} = \frac{10,5}{4 \times 0,78} = 3,37 \text{ Ом}. \quad (6.16)$$

Визначаємо довжину з'єднувальної смуги:

$$L_{3.C} = 1,05 L_T (n_{T.E} - 1), \text{ см}; \quad (6.17)$$

$$L_{3.C} = 1,05 \cdot 250 \cdot (4 - 1) = 787 \text{ см}. \quad (6.18)$$

Визначаємо опір розтікання струму в з'єднувальній смузі:

$$R_{3.C} = 0,366 \frac{\rho_{розр.с}}{L_{3.C}} \lg \frac{2L_{3.C}^2}{h_3 \cdot b_C} \text{ Ом}; \quad (6.19)$$

$$R_{3.c} = 0,366 \times \frac{8000}{787} \lg \frac{2 \times 787^2}{80 \times 7} = 12,4 \text{ Ом}. \quad (6.20)$$

Визначаємо коефіцієнт екранування для з'єднувальної смуги:  $\eta_{Е.З.С} = 0,77$ .

Визначаємо розрахунковий опір для розтікання електричного струму в з'єднувальній смузі з урахуванням коефіцієнта екранування:

$$R_{розр.с} = \frac{R_{3.c}}{n_c \cdot \eta_{Е.З.П}}, \quad (6.21)$$

де  $n_c$  – кількість з'єднувальних смуг, у нас  $n_c = 1$ .

$$R_{розр.с} = \frac{12,4}{1 \times 0,77} = 16,1 \text{ Ом} \quad (6.22)$$

Визначаємо загальний розрахунковий теоретичний опір розтіканню струму від вертикальних заземлювачів та з'єднувальної смуги:

$$R_{заг.розр} = \frac{1}{\frac{1}{R_{розр.Т}} + \frac{1}{R_{розр.С}}}; \quad (6.23)$$

$$R_{заг.розр} = \frac{1}{\frac{1}{4,49} + \frac{1}{16,1}} = 3,51 \text{ Ом}, \quad (6.24)$$

що менше  $R_3$ .

Опір менше 4 Ом, отже захисне заземлення розраховано правильно.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Принципова технологічна схема виробництва ароматичних вуглеводнів (бензолу та толуолу) платформінгом [Електронний ресурс]. – Режим доступу : [https://bstudy.net/971143/tehnika/printsipialnaya\\_tehnologicheskaya\\_schema\\_proizvodstva\\_aromaticeskikh\\_uglevodorodov\\_benzola\\_toluola\\_platfo](https://bstudy.net/971143/tehnika/printsipialnaya_tehnologicheskaya_schema_proizvodstva_aromaticeskikh_uglevodorodov_benzola_toluola_platfo)
2. Промислові методи виробництва бензолу [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://um.co.ua/6/6-5/6-58368.html>
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. Шаманська О. І. Сучасні тенденції розвитку спиртової промисловості України / О. І. Шаманська, Я. В. Паламаренко // Електронний журнал «Ефективна економіка». – 2014. – № 4 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=2903>
5. 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.
6. Коваленко І.А., Малиновський В.В. Основні процеси, машини та апарати хімічних виробництв. – Київ: Воля, 2006. – 253 с.
7. 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.
8. Вікіпедія. Бензен [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%91%D0%B5%D0%BD%D0%B7%D0%B5%D0%BD>
9. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний, Д.В. Зеркалов, Р.В. Сабарно, О.І. Полукаров, В.С. Коз'яков, Л.О. Мітюк. За ред. К.Н. Ткачука і М.О. Халімовського. – Київ : Основа, 2006. – 448 с.

10. Толуол [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://himija-online.ru/organicheskaya-ximiya/areny/toluol.html>
11. Онищук О.О., Кормош Ж.О. Процеси та апарати хімічних виробництв: курс лекцій. – Луцьк: Вежа-Друк, 2020. – 155 с.
12. 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.
13. 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.
14. 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.
15. 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.
16. 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.
17. Виготовлення обладнання хімічних виробництв : підруч. [для студ. закл. вищ. освіти]. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2022. – 233 с.
18. 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>
19. Промислові прилади та засоби автоматизації: Довідник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безповська, В.А. Бек та ін.. Київ : Вид-во «Віста», 2017. – 847 с.
20. Методичні вказівки до дипломного проекту «Розрахунок захисного заземлення» із розділу «Охорона праці / Л. О. Гурець, І. О. Трунова». – Суми : Видавництво СумДУ, 2012. – 21 с.