

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_   
підпис, дата

## Кваліфікаційна робота магістра

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

Тема роботи: Установка каталітичного крекінгу. Розробити та модернізувати кожухотрубний випарник стабілізаційної колони

Виконав:  
студент групи ХМ.м-21/2  
Івашина Андрій Павлович

\_\_\_\_\_   
підпис

Залікова книжка

№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота магістра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

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

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

докт. техн. наук, професор

Склабінський В.І.

\_\_\_\_\_   
підпис, дата

## ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	3
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	5
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	12
2.1 Опис технологічної схеми виробництва	12
2.2 Опис об'єкту розробки	14
2.3 Технологічні розрахунки	17
2.4 Конструктивні розрахунки апарату	22
2.5 Визначення гідравлічного опору апарату	25
2.6 Розрахунок і вибір допоміжного обладнання	27
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	32
3.1 Вибір конструкційних матеріалів	32
3.2 Розрахунки на міцність, стійкість та герметичність	33
4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА	41
4.1 Обґрунтування компонування основного та допоміжного обладнання	41
4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання	45
5 ІНФОРМАЦІЙНЕ ТА АПАРАТУРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ	52
5.1 Вибір та обґрунтування параметрів контролю, регулювання та вимірювання	52
5.2 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації	54
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ	57
6.1 Аналіз потенційних небезпек та шкідливостей під час роботи установки	57
6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактору	60
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	67
ДОДАТКИ	

## ВСТУП

Найважливішими завданнями, які висуваються перед нафтопереробною промисловістю, є збільшення обсягів виробництва нафтопродуктів, розширення їхнього асортименту та підвищення загальної якості. У світлі постійного зростання обсягів переробки сірчистих та високосірчистих, а також високопарафінових нафтових сировин, стає важливим стратегічно змінити технологічний підхід до переробки нафти. Особливо велике значення набувають вторинні та каталітичні процеси, серед яких виділяється процес каталітичного крекінгу. Цей процес є ключовим у вдосконаленні переробки нафтових матеріалів, приводячи до покращення якості та збільшення кількості виготовлених продуктів. Застосування новітніх технологій, таких як каталітичний крекінг, стає стратегічно важливим етапом для досягнення високих стандартів в нафтопереробній галузі [1].

Каталітичний крекінг виступає як ключовий процес, що забезпечує глибоку та ефективну переробку нафти. Введення каталітичного крекінгу в промисловість стало можливим завдяки розробці високоефективного каталізатора на основі алюмосилікатів, який відрізняється значним терміном служби. Основною перевагою цього процесу є його велика експлуатаційна гнучкість [1]:

- можливість переробки різноманітних фракцій нафти з метою отримання високооктанового бензину та газу, які містять значні обсяги пропілену, ізобутану та бутенів;
- здатність легко поєднуватися з іншими технологічними процесами, такими як алкілювання, гідрокрекінг, гідроочищення, адсорбційна очистка, деасфальтизація та інші.

Кожухотрубний випарник представляє собою теплообмінний пристрій, в якому відбувається фазовий перехід рідкого теплоносія у газоподібний стан за допомогою передачі тепла від більш гарячого теплоносія. У конкретному контексті даного випарника в якості такого гарячого теплоносія використовується водяна пара. Цей процес визначається термодинамічними характеристиками теплоносіїв та забезпечує ефективний теплообмін у системі [2].

Даний кваліфікаційний проект [3] передбачає проектування кожухотрубного теплообмінника з паровим простором для випаровування частини кубового залишку стабілізаційної колони. У рамках даного проекту розглядається використання насиченої водяної пари під певним тиском у якості гарячого теплоносія. Цей гарячий теплоносій подається у трубний простір теплообмінника для подальшого використання його енергії.

## 1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ [4–8]

Каталітичний крекінг – це складний хімічний процес, що відбувається в присутності каталізатора із силікатів та алюмосилікатів при високих температурах і високому тиску. Основні теоретичні основи цього процесу включають в себе кілька ключових аспектів.

**Розкладання вуглеводнів.** У каталітичному крекінгу великі та важкі молекули вуглеводнів розкладаються на менші та більш цінні фракції, такі як бензин та легкі гази. Цей процес дозволяє підвищити вигідність використання нафтових продуктів.

**Утворення каталізатору.** Каталізатор, зазвичай на основі алюмосилікатів, впливає на швидкість та вибірковість реакцій, спрямовуючи їх у бік утворення більш цінних продуктів.

**Термодинамічні аспекти.** Процес крекінгу відбувається при високих температурах та тисках, що забезпечує термодинамічно вигідні умови для розкладання великих вуглеводнів та утворення бажаних продуктів.

**Структура каталізатору.** Важливою частиною теоретичних основ є структура каталізатору, яка може бути ретельно налаштована для досягнення певної вибірковості та активності у відношенні до конкретних хімічних реакцій.

**Динаміка реакцій.** Динаміка хімічних реакцій крекінгу досліджується для оптимізації процесу та підвищення виходу бажаних продуктів.

Ці теоретичні аспекти взаємодіють між собою, створюючи засади для розуміння та контролю каталітичного крекінгу в нафтопереробній промисловості. Процеси передачі тепла через теплоносії, які зазнають зміни в агрегатному стані, мають важливе застосування у різних галузях промисловості, включаючи енергетику, хімію, нафтохімію, харчову промисловість та інші. Особливістю цих процесів є великі теплові потоки, які передаються в невеликих об'ємах теплообмінників.

Пароутворення – це процес переходу речовини з рідкого стану в газоподібний. Цей процес вимагає підведення тепла до рідини і зазвичай відбувається при

підвищених температурах, вищих від температури насичення речовини при даному тиску. Пара, утворена таким чином, вимагає підведення тепла і виступає як холодний теплоносій. Кількість тепла, необхідна для випаровування 1 кілограма теплоносія, називається питомою (прихованою) теплотою пароутворення.

Кипіння – це інтенсивний процес пароутворення в рідині, яка має температуру насичення або трохи перегріта відносно цієї температури. У процесі кипіння утворюються парові бульбашки.

Розрізняють два види кипіння: об'ємне кипіння і поверхнєве кипіння. Об'ємне кипіння відбувається у рідині при її значному перегріванні відносно температури насичення або при різкому зниженні тиску над рідиною. Поверхнєве кипіння відбувається лише на поверхні нагрівання в окремих точках.

Важливим видом кипіння в хімічній технології є кипіння на твердих поверхнях, і цей вид кипіння вимагає особливого уваги в технологічних процесах.

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

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

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

$r_{nap}$  – 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:

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

У теплообмінниках, де один теплоносій має постійну температуру (наприклад, гарячий теплоносій), інший теплоносій, який проходить через теплообмін-

ник, 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 тискам 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 переходить 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 вихо-

дити 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, коефіцієнт 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:

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

де  $\phi$  – 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.

Необхідно зазначити, що висота кришки плаваючої головки в кожухотрубчастому теплообміннику повинна бути ретельно розрахована. Важливо враховувати, що ця висота повинна бути встановлена на рівні, де площа центрального перерізу кришки перевищує площину прохідного перерізу труби одного ходу, і це повинно бути не менше, ніж в 1,3 рази.

Це вимога вкрай важлива з точки зору забезпечення оптимальної працездатності плаваючої головки та ефективного теплообміну в самому теплообміннику. При визначенні величини в 1,3 рази може бути здійснено адаптацію враховуючи конкретні обставини та вимоги до конструкції теплообмінника. Важливо підкреслити, що цей підхід є необхідним для досягнення належної ефективності роботи теплообмінника.

При цьому враховуються різноманітні параметри, такі як конкретні характеристики самого теплообмінника та властивості теплоносіїв. Такий розрахунок допомагає забезпечити надійність і ефективність роботи теплообмінного обладнання.

## 2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

### 2.1 Опис технологічної схеми виробництва

Процес каталітичного крекінгу важких дистильованих фракцій на дрібнодисперсних каталізаторах є визначним серед вторинних процесів у сфері нафтопереробки. Головною метою цього процесу є отримання високооктанового бензину. Гази, насичені бутан-бутиленовими та пропан-пропіленовими фракціями, знаходять широке застосування в ролі сировини для виробництва високооктанового компонента бензину, такого як алкілат. Крім того, ці гази знаходять застосування у виробництві синтетичного каучуку та в нафтохімічних процесах [1].

Легкий газойль, отриманий в результаті каталітичного крекінгу, також використовується як складова дизельного палива. Важкий газойль з високим вмістом поліциклічних ароматичних сполук знаходить широке застосування як сировина для виробництва дисперсного технічного вуглецю, а також як компонент мазутів. [1].

Крекінгова установка використовує вакуумні газойлі широкого фракційного спектру як основну сировину, особливо ті, що мають температури википання від 300 до 500°C. Останнім часом також використовують важкі вакуумні газойлі з вищими температурами кінця кипіння, навіть до 550 або навіть 590°C. Для розширення ресурсів сировини важливо використовувати альтернативні джерела, такі як газойлі, отримані під час коксування. Сировина для каталітичного крекінгу повинна мати низьку вміст коксоутворюючих речовин (не більше 0,5% мас.), тобто обмежений вміст поліциклічних ароматичних вуглеводнів і смолистих речовин, які сприяють швидкому утворенню коксу на каталізаторі. Крім того, важливо забезпечити низький вміст металів (не більше 20–25 г/т), які можуть дезактивувати (отруїти) каталізатор. Наразі вивчаються методи попередньої деметалізації сировини. Загальна зольність сировини для крекінгу зазвичай знаходиться в межах від 0,006 до 0,007% маси.

На рис. 2.1 наведено технологічну схему установки каталітичного крекінгу.

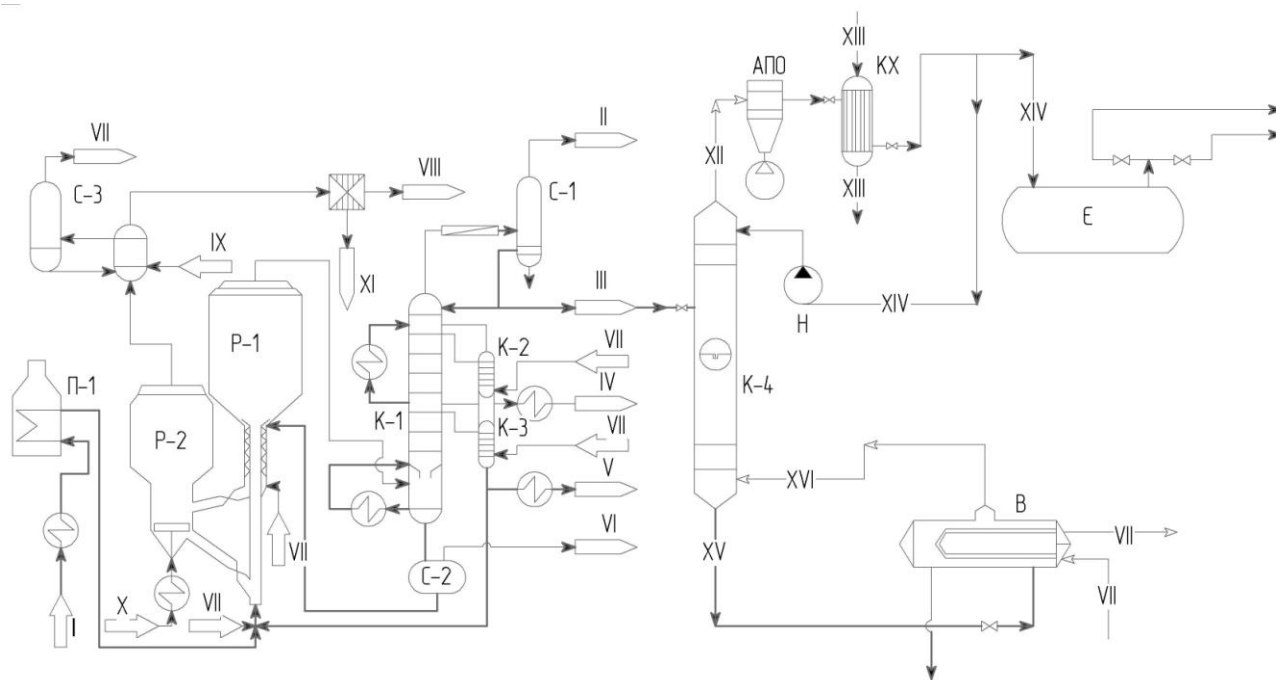


Рисунок 2.1 – Технологічна схема установки каталітичного крекінгу

Готовий до гідроочищення матеріал після нагріву в теплообмінниках та печі П-1 взаємодіє з рециркулятом та водяною парою перед введенням у вузол змішування прямоточного ліфт-реактора Р-1. У цьому реакторі, контактуючи з регенованим гарячим цеолітовим ката-лізатором, сировина випаровується та піддається каталізу. Подальше переміщення відбувається у зону киплячого шару Р-1.

Реакційні продукти відокремлюють від каталізаторного пилю за допомогою двоступінчастих циклонів і подають у нижню частину рек-тифікаційної колони К-1 для подальшого розділення. Закоксований каталізатор, що вийшов із відпарної зони Р-1, направляється в зону киплячого шару регенератора Р-2, де здійснюється випал коксу шляхом повного окислення оксиду вуглецю до діоксиду. Після цього регенований каталізатор через нижній похилий каталізаторопровід повертається до вузла змішування ліфт-реактора.

Для регенерації каталізатора використовують повітря, яке подається за допомогою повітродувки. При потребі його можна піддавати попередньому підігріву в топці під тиском.

Димові гази направляються через внутрішні двоступінчасті циклони для подальшої утилізації тепла, яка включає в себе електрофільтри та утилізатор. У колоні К–1 передбачено верхнє гостре і проміжні циркуляційні зрошення для регулювання температурного режиму. Легкий і важкий газойлі виділяють у випарних колонах К–2 та К–3.

В нижній частині колони є відстійник каталізаторного шламу, який повертають у відпарну зону Р–1. Частину важкого газойлю подають у вузол змішування ліфт-реактора як рециркулянт. З верху колони відводять суміш парів бензину, води та газів крекінгу, яку після охолодження та конденсації розділяють у газосепараторі С–1 на газ та нестабільний бензин. Ці компоненти подаються в блок газофракціонування та стабілізації бензину відповідно.

Блок стабілізації бензину має на меті виробництво стабільного бензину. Спочатку нестабільний бензин, який перед цим підігрівається, піддається під тиском та подається на тарілку живлення стабілізаційної колони К–4. Зверху колони К–4 суміш вуглеводневих газів надходить в апарат повітряного охолодження АПО, а потім в холодильник Х, де вона охолоджується, конденсується, і потім доохолоджується за допомогою повітря (у першому випадку) та води (у другому випадку).

Далі ця суміш, вже в рідкому стані, розділяється на два потоки – одна частина направляється на зрошення колони К–4, а інша – в ємність для тимчасового зберігання. З нижньої частини колони К–4 бутан-пентанова фракція надходить у випарник И, де частково випаровується, що забезпечує парове живлення колони.

## 2.2 Опис об'єкту розробки

У розробленому апараті водяна пара пересувається по трубному простору, тоді як вуглеводнева сировина рухається по міжтрубному простору. Кубовий залишок ректифікаційної колони представляє собою суміш, в основному складаючись з рідкого пентану, а також містить деяку кількість бутану.

Загальний вид проектованого кожухотрубного випарника з паровим простором типу ВП представлений на рис. 2.2.

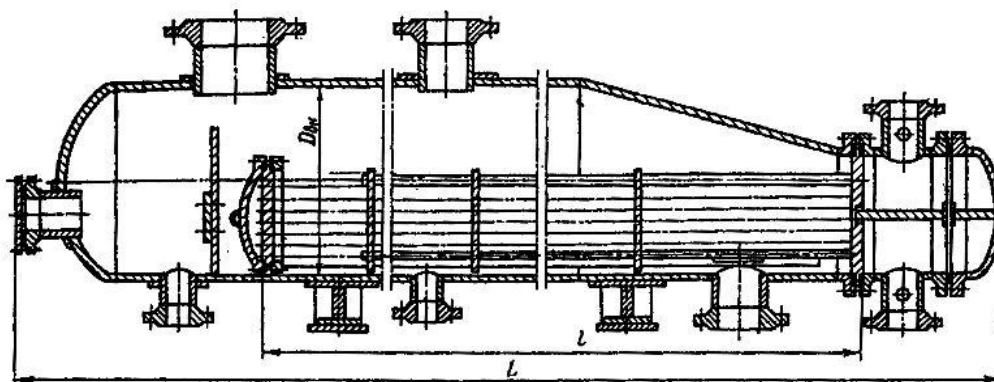


Рисунок 1.2 – Схема кожухотрубного випарника з паровим простором

У міжтрубний простір випарника вводиться холодний теплоносій у вигляді суміші бутану та пентану. В той час, у розподільну камеру апарату постачається гарячий теплоносій – насичена водяна пара під тиском. Завдяки теплопередачі через стінку теплообмінних труб активно відбувається випаровування вуглеводневої суміші. Вуглеводні представляють собою найпростіші органічні сполуки, що складаються лише з двох елементів: вуглецю та водню. Алкани, або граничні вуглеводні (міжнародна назва), є однією з класичних груп вуглеводнів та характеризуються загальною формулою  $C_nH_{2n+2}$ , де  $n$  визначає кількість атомів вуглецю. У молекулах граничних вуглеводнів атоми вуглецю пов'язані між собою простими (одинарними) зв'язками, і всі валентності насичені атомами водню.

Пентан ( $C_5H_{12}$ ) – це насичений ациклічний вуглеводень класу алканів. Має три структурні ізомери: н-пентан, ізо-пентан, нео-пентан. Слід зазначити, що пентан має четвертий клас небезпеки. Молекулярна маса пентану становить 72,15 г/моль.

Бутан ( $C_4H_{10}$ ) – безбарвний горючий газ, зі специфічним запахом. Має два структурні ізомери: н-бутан, ізо-бутан. При нормальному тиску легко зріджується від мінус  $0,5^\circ C$ , замерзає при мінус  $138^\circ C$ . При підвищеному тиску та звичайній температурі – це легколетка рідина. Критична температура  $+152^\circ C$ , критичний тиск 3,797 МПа.

Водяна пара представляє собою газовий стан води. Він не має колірного відтінку, смаку або запаху. Утворюється за рахунок випаровування молекул води. Високотемпературну водяну пару широко використовують як гарячий теплоносії у різноманітних технологічних процесах. Для зручності монтажу та ремонтних робіт в апараті передбачені спеціальний люк і монтажний патрубков. Вони дозволяють легко отримувати доступ до внутрішніх частин апарата без необхідності демонтажу всього обладнання.

Для підтримки трубного пучка в корпусі випарника встановлені металеві балки. На цих балках розміщені прогони із кутиків, які допомагають утримувати трубний пучок на місці та забезпечують його стабільність. Щоб уникнути зміщення трубного пучка під час транспортування апарата, використовується хомут, виготовлений із штабової сталі. Він надійно фіксує трубний пучок у випарнику.

Для полегшення монтажу або демонтажу трубного пучка у кожухотрубчастих теплообмінниках з плаваючою головкою або з U-подібними трубами застосовують спеціальні пристрої і елементи. Рим-болти – це спеціальні болти з різьбленою частиною, які використовуються для фіксації трубного пучка у теплообміннику; їх можна легко відкрутити для витягування труб у разі необхідності. Витяжні вушка – це спеціальні кільця або петлі, закріплені на трубах або трубних решітках. Вони служать для підвішування та витягування трубного пучка з теплообмінника. Завдяки витяжним вушкам можливо швидко та легко здійснити ремонтні роботи або заміну окремих труб.

Зазначені пристрої та елементи дозволяють забезпечити зручність і швидкість обслуговування та ремонту кожухотрубчастих теплообмінників з плаваючою головкою або U-подібними трубами, зменшуючи час і зусилля, необхідні для витягування трубного пучка з корпусу апарата.



### 2.3 Технологічні розрахунки [7–9]

Середня молекулярна маса потоку:

$$M = M_{n-C_4H_{10}} \cdot x_{n-C_4H_{10}} + M_{C_5H_{12+}} \cdot x_{C_5H_{12+}}, \text{ кг/кмоль} \quad (2.1)$$

де  $M_{n-C_4H_{10}}$ ,  $M_{C_5H_{12+}}$  – відповідно мольні маси н-бутану та пентану;

$$M = 58 \cdot 0,02 + 72 \cdot 0,98 = 71,72 \text{ кг/кмоль.}$$

Ентальпія потоку:

$$q = q_{385}^{ж} \cdot M, \text{ кДж/кмоль} \quad (2.2)$$

де  $q_{385}^{ж}$  – ентальпія нафтових рідин, кДж/кг.

$$q = 450 \cdot 71,72 = 32274 \text{ кДж/кмоль}$$

Годинна витрата тепла у випарнику:

$$Q_p = \frac{q \cdot G}{M}, \text{ кВт} \quad (2.3)$$

$$Q_p = \frac{32274 \cdot 8000}{71,72} = 3,6 \cdot 10^6 \frac{\text{кДж}}{\text{год}} = 996 \text{ кВт.}$$

Параметри гріючої водяної пари при її тиску  $p = 0,2$  МПа: температура  $t_{2H} = 120^\circ\text{C}$ , питома теплота конденсації  $r = 2208$  кДж/кг.

На підставі даних промислової експлуатації та з метою забезпечення достатнього температурного напору при передачі від водяної пари до кубової рідини: кінцева температура водяної пари  $t_{2K} = 109^{\circ}\text{C}$ ; кінцева температура парів бутан-пентану  $t_{1K} = 111^{\circ}\text{C}$ .

Витрата пари:

$$Z = \frac{Q_p}{r \cdot \eta_T}, \text{ кг/год.} \quad (2.4)$$

де  $\eta_T$  – коефіцієнт утримання тепла, у середньому  $\eta_T = 0,95$ .

$$Z = \frac{996 \cdot 10^3 \cdot 3600}{2208 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 1709 \text{ кг/год.}$$

Середня різниця температур:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln\left(\frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}\right)}, \text{ }^{\circ}\text{C} \quad (2.5)$$

$$\Delta t_{CP} = \frac{19 - 9}{\ln\left(\frac{19}{9}\right)} = 13,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Коефіцієнт тепловіддачі з боку вуглеводнів:

$$\alpha_2 = 7,77 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{\rho_{II} \cdot r}{\rho_{Ж} - \rho_{II}}\right)^{0,033} \cdot \left(\frac{\rho_{Ж}}{\sigma}\right)^{0,33} \cdot \frac{\lambda_{Ж}^{0,75}}{\mu_{Ж}^{0,45} \cdot c_{PЖ}^{0,12} \cdot T_S^{0,37}} \cdot q^{0,7}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \quad (2.6)$$

де  $\rho_{II}$ ,  $\rho_{Ж}$  – відповідно густини парової та рідкої фаз,  $\text{кг/м}^3$ ;

$r$  – теплота пароутворення, Дж/кг;

$\sigma$  – поверхневий натяг на межі розділу між рідиною та паром, Н/м;

$\lambda_{\text{ж}}$  – теплопровідність рідини, Вт/(м·К);

$\mu_{\text{ж}}$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па·с;

$c_{\text{рж}}$  – теплоємність рідини,  $c_{\text{рж}} = 1600$  Дж/(кг·К) [15];

$T_s$  – температура кипіння вуглеводнів, К;

$q$  – теплонапруження поверхні нагрівання, Вт/м<sup>2</sup>.

Усі фізичні параметри визначаються за кінцевою температурою вуглеводневої сировини  $T_s = 384$  К.

Густина парової фази визначають за рівнянням Менделєєва-Клапейрона:

$$\rho_{\text{п}} = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T_s} \cdot \frac{p}{p_0}, \text{ кг/м}^3 \quad (2.7)$$

де  $\rho_0$  – густина пари за нормальних умов, кг/м<sup>3</sup>.

$$\rho_0 = \frac{M}{22,4} = \frac{71,72}{22,4} = 3,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$\rho_{\text{п}} = 3,2 \cdot \frac{273}{384} \cdot \frac{0,45 \cdot 10^6}{98,1 \cdot 10^3} = 10,4 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Поверхневий натяг на межі пара – рідина:

$$\sigma = \frac{21,2 \cdot 10^{-6}}{\left(\frac{M}{\rho_{\text{ж}}}\right)^{\frac{2}{3}}} \cdot (T_{\text{кр}} - T_s - \delta), \frac{\text{Н}}{\text{м}} \quad (2.8)$$

де  $M$  – мольна маса кубового залишку,  $M = 72$  кг/кмоль;

$\rho_{\text{ж}}$  – густина залишку за кінцевої температури  $T = T_s = 384$  К,  $\rho_{\text{ж}} = 530$  кг/м<sup>3</sup>.

$T_{KP}$  – псевдокритична температура кубового залишку, К;

$\delta$  – постійна,  $\delta = 7$  К.

$$T_{KP} = T_{KP \text{ н-С}_4\text{H}_{10}} \cdot x_{\text{н-С}_4\text{H}_{10}} + T_{KP \text{ С}_5\text{H}_{12+}} \cdot x_{\text{С}_5\text{H}_{12+}}, \text{ К} \quad (2.9)$$

де  $T_{KP \text{ н-С}_4\text{H}_{10}} = 426 \text{ К}$ ;  $T_{KP \text{ С}_5\text{H}_{12+}} = 470,2 \text{ К}$  – критичні температури компонентів.

$$T_{KP} = 426 \cdot 0,02 + 470,2 \cdot 0,98 = 469 \text{ К};$$

$$\sigma = \frac{21,2 \cdot 10^{-6}}{\left(\frac{71,72}{530}\right)^{\frac{2}{3}}} \cdot (469 - 384 - 7) = 6,27 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Коефіцієнт динамічної в'язкості рідини для суміші неасоційованих рідин:

$$\lg \mu_S = \lg \mu_{\text{н-С}_4\text{H}_{10}} \cdot x_{\text{н-С}_4\text{H}_{10}} + \lg \mu_{\text{С}_5\text{H}_{12+}} \cdot x_{\text{С}_5\text{H}_{12+}} \quad (2.10)$$

де  $\mu_{\text{С}_4\text{H}_{10}} = 0,22 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;  $\mu_{\text{С}_5\text{H}_{12}} = 0,13 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$  — коефіцієнти динамічної в'язкості компонентів рідини.

$$\lg \mu_S = \lg 0,22 \cdot 10^{-3} \cdot 0,02 + \lg 0,13 \cdot 10^{-3} \cdot 0,98,$$

$$\mu_S = 0,09 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$$\alpha_2 = 7,77 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{10,4 \cdot 483 \cdot 10^3}{530 - 10,4}\right)^{0,033} \cdot \left(\frac{530}{6,27 \cdot 10^{-3}}\right)^{0,33} \cdot \frac{(0,95 \cdot 10^{-2})^{0,75}}{(0,09 \cdot 10^{-3})^{0,45} \cdot 1600^{0,12} \cdot 384^{0,37}} \cdot q^{0,7};$$

$$\alpha_2 = 0,325 \cdot q^{0.7} .$$

Коефіцієнт тепловіддачі з боку водяної пари, що конденсується:

$$\alpha_1 = 1,36 \cdot A \cdot q^{0.5} \cdot l^{0.35} \cdot d_B^{-0.25}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad (2.11)$$

де  $A$  – коефіцієнт, що залежить від температури конденсату,  $A = 8$ ;

$l$  – довжина труби,  $l = 6$  м;

$d_B$  – внутрішній діаметр труби,  $d_B = 0,025 - 2 \cdot 2 = 0,021$  м.

$$\alpha_1 = 1,36 \cdot 8 \cdot q^{0.5} \cdot 6^{0.35} \cdot 0,021^{-0.25} ;$$

$$\alpha_1 = 53,509 \cdot q^{0.5} .$$

Коефіцієнт теплопередачі з урахуванням теплових опорів стінки та забруднень її обох поверхонь:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{СТ}}{\lambda_{СТ}} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_2}}, \frac{Вт}{м^2 \cdot К} \quad (2.12)$$

де  $\delta_{СТ}$  – товщина стінки труби,  $\delta_{СТ} = 0,002$  м;

$\lambda_{СТ}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки труби,

$\lambda_{СТ} = 33,53$  Вт/(м·К);

$\delta_1 / \lambda_1$  – тепловий опір забруднення внутрішньої поверхні труби,

$\delta_1 / \lambda_1 = 0,000215 (м^2 \cdot К) / Вт$ ;

$\delta_2 / \lambda_2$  – тепловий опір забруднення зовнішньої поверхні труби,  
 $\delta_2 / \lambda_2 = 0,0006 (m^2 \cdot K) / Bm$ .

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{0,002}{33,53} + 0,000215 + 0,0006 + \frac{1}{\alpha_2}};$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + 0,000875 + \frac{1}{\alpha_2}}.$$

Теплонапруження  $q = 31100 \text{ Вт/м}^2$ .

$$\alpha_1 = 53,509 \cdot 31100^{0,5} = 9436 \frac{Bm}{m^2 \cdot K};$$

$$\alpha_2 = 0,325 \cdot 31100^{0,7} = 454 \frac{Bm}{m^2 \cdot K};$$

$$k = \frac{1}{\frac{1}{9436} + 0,000875 + \frac{1}{454}} = 314 \frac{Bm}{m^2 \cdot K}.$$

#### 2.4 Конструктивні розрахунки апарату

Розрахункова поверхня теплообміну становить:

$$F_p = \frac{Q_p}{q}, \text{ м}^2 \quad (2.13)$$

$$F_p = \frac{996000}{31100} = 32 \text{ м}^2$$

Вибираємо стандартизований кожухотрубний випарник із паровим простором типу ВП:

– внутрішній діаметр кожуха $D$ , мм	800
– сортамент труб	$25 \times 2$
– довжина труб, м	6
– кількість ходів по трубах	1
– загальна кількість труб	82
– кількість труб в одному ході	82
– поверхня теплообміну, $m^2$	38

Коефіцієнт запасу теплообмінної поверхні апарата:

$$\beta = \frac{F - F_{MAX}}{F} \cdot 100\% , \quad (2.14)$$

$$\beta = \frac{38 - 32}{38} \cdot 100\% = 16\% .$$

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 та масова витрати рідини/пари відповідно,  $m^3/c$  і  $kg/c$ ;

$\rho$  – густина потоку середовища,  $kg/m^3$ ;

$w$  – швидкість витікання середовища,  $m/c$ .

Рекомендовані швидкості руху теплоносіїв:

– для рідини 0,1–0,5  $m/c$  при самопливі і 0,5–2,5  $m/c$  в напірних трубопроводах;

– для пари та газу 5–30  $m/c$ .

Діаметр патрубкa для входу вуглеводневої сировини в апарат:

$$d_{XBX} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8000 / 3600}{3,14 \cdot 530 \cdot 0,25}} = 0,145 \text{ м}$$

Діаметр патрубкa для виходу парів бутан-пентану:

$$d_{XБЫX} = \sqrt{\frac{4 \cdot 8000 / 3600}{3,14 \cdot 10,4 \cdot 5}} = 0,232 \text{ м}$$

Діаметр патрубкa для входу водяної пари:

$$d_{ГBX} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1709 / 3600}{3,14 \cdot 1,107 \cdot 30}} = 0,135 \text{ м}$$

Діаметр патрубкa для виходу водяної пари:

$$d_{ГБЫX} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1709 / 3600}{3,14 \cdot 1,107 \cdot 30}} = 0,135 \text{ м}$$

За отриманими значеннями приймаємо стандартні патрубкi:

- для входу вуглеводневої сировини  $D_y=150$  мм;
- для виходу парів пропан-бутану  $D_y=250$  мм;
- для входу водяної пари  $D_y=150$  мм;
- для виходу водяної пари  $D_y=150$  мм.



## 2.5 Визначення гідравлічного опору апарату

Розрахунок гідравлічного опору випарника є важливим для оцінки втрат енергії на рух теплоносія через випарник. Гідравлічний опір випарника визначається на основі різниці тиску, швидкості теплоносія та геометричних параметрів випарника. Гідравлічний опір міжтрубного простору, якщо швидкість теплоносія дійсно дуже мала (наприклад, при випаровуванні рідини), може бути ігнорованим в порівнянні із загальним гідравлічним опором випарника.

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:

$$\Delta P_{TP} = \lambda_{TP} \cdot \frac{L}{d_E} \cdot \frac{w_2^2 \cdot \rho_2}{2}, \quad (2.17)$$

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.

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho}{\mu}, \quad (2.19)$$

$$\text{Re} = \frac{0,5 \cdot 0,021 \cdot 1,107}{0,09 \cdot 10^{-3}} = 129;$$

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{0,1}{0,021} + \frac{68}{129} \right)^{0,25} = 0,17;$$

$$\Delta P_{TP} = 0,17 \cdot \frac{6}{0,021} \cdot \frac{0,5^2 \cdot 530}{2} = 3218 \text{ Па}.$$

Гідравлічні втрати тиску в місцевих опорах визначаємо за формулою:

$$\Delta P_M = \xi \cdot \frac{w_e^2 \cdot \rho_e}{2}, \quad (2.20)$$

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  $\xi_4 = 1,4$ ).

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

$$\Delta P_{TP} = 5,9 \cdot \frac{0,5^2 \cdot 530}{2} = 391 \text{ Па}.$$

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 ( $\Delta P_T = 0$ ), оскільки випарник не сполучається із навколишнім середовищем.

Повний напір, необхідний для руху середовищ через апарат складе:

$$\Delta P = 3218 + 391 = 3609 \text{ Па.}$$

## 2.6 Розрахунок і вибір допоміжного обладнання

### Розрахунок і вибір збірника для вихідної суміші.

Розрахунковий об'єм ємності:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}, \quad (2.21)$$

де  $G$  – загальна витрата суміші, кг/год.;

$\tau$  – резерв робочого часу,  $\tau = 7$  год.;

$\rho$  – густина вихідної суміші,  $\rho = 800$  кг/м<sup>3</sup>.

$$V_{EP} = \frac{10000 \cdot 7}{0,82 \cdot 800} = 106,7 \text{ м}^3.$$

Задаємося стандартизованим діаметром ємності  $D = 3,6$  м, тоді її висота складе:

$$H = \frac{V_{EP}}{0,785 \cdot D^2}, \quad (2.22)$$

$$H = \frac{106,7}{0,785 \cdot 3,6^2} = 10,5 \text{ м.}$$

**Розрахунок і вибір насоса для подачі вихідної суміші в ректифікаційну колону.**

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

Діаметр трубопроводу визначаємо за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (2.23)$$

де  $V$  – об’ємна витрата вихідної суміші,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

$$d = \sqrt{\frac{3,47 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 2}} = 0,047 \approx 0,050 \text{ м}.$$

Визначаємо критерій Рейнольдса для рідини в трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_p}{\mu}, \quad (2.24)$$

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 0,050 \cdot 800}{0,25 \cdot 10^{-3}} = 320000,$$

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

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,050} = 0,004.$$

Далі отримаємо:

$$\frac{1}{e} = 250; 560 \cdot \frac{1}{e} = 140000; 10 \cdot \frac{1}{e} = 2500;$$

$$\text{Re} > 560 \cdot \frac{1}{e}.$$

Для зони, автомодельної по відношенню до  $\text{Re}$ :

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}, \quad (2.25)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot 0,004^{0,25} = 0,028.$$

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) вентиля 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:

$$h_{П.ВС.} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (2.26)$$

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

$$h_{П.ВС.} = \left( 0,028 \cdot \frac{8}{0,050} + 2,7 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,46 \text{ м.}$$

Втрачений напір в нагнітальній лінії:

$$h_{П.НАГ.} = \left( 0,028 \cdot \frac{12}{0,050} + 5,6 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 2,51 \text{ м.}$$

Загальні втрати напору:

$$h_{П} = h_{П.ВС.} + h_{П.НАГ.}, \quad (2.27)$$

$$h_{П} = 1,46 + 2,51 = 3,97 \text{ м.}$$

Знаходимо напір насоса за рівнянням:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_p \cdot g} + H_{Г} + h_{П}, \quad (2.28)$$

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

$H_{Г}$  – геометрична висота підйому рідини.

$$H = \frac{0,1}{800 \cdot 9,81} + 6 + 3,97 = 10,0 \text{ м.}$$

Корисну потужність насоса визначаємо за рівнянням:

$$N_{\Pi} = \rho_p \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (2.29)$$

де  $Q$  – подача (витрата),  $Q = 3,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;

$H$  – напір насоса.

$$N_{\Pi} = 800 \cdot 9,81 \cdot 3,47 \cdot 10^{-3} \cdot 10,0 = 272 \text{ Вт.}$$

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

$$N = \frac{N_{\Pi}}{\eta_{\text{пер}} \cdot \eta_n}, \quad (2.30)$$

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:

$$N = \frac{272}{1 \cdot 0,6} = 454 \text{ Вт.}$$

Вибираємо відцентровий насос марки ЦНС 13-18 з такими параметрами [17]: об'ємна подача насоса 13 м<sup>3</sup>/год.; напір насоса 18 м; потужність, споживана насосом 2,5 кВт; частота обертання 2200 об/хв.

## 3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

### 3.1 Вибір конструкційних матеріалів [10, 11]

Вибір матеріалів для виготовлення кожухотрубного випарника з паровим простором здійснюється враховуючи ряд факторів, що включають специфіку експлуатації, можливі зміни фізико-хімічних властивостей матеріалів під впливом робочого середовища, температури і хіміко-технологічного процесу. Основні критерії вибору включають:

**Механічні властивості.** Межа міцності, відносне подовження, твердість тощо. Матеріал повинен володіти необхідною міцністю та деформаційною стійкістю.

**Технологічність виготовлення.** Особливо важлива зварюваність матеріалу, яка визначає зручність і якість з'єднання деталей.

**Хімічна стійкість.** Матеріал повинен бути стійким до роз'їдання, оскільки експлуатація включає контакт із зазначеними середовищами.

**Теплопровідність.** Залежно від технологічних вимог, може вимагатися висока або низька теплопровідність матеріалу.

Підходячим варіантом для виготовлення корпусу, фланців, розподільних камер і деталей, що працюють під тиском, може бути сталь 16ГС. Цей вибір обумовлений його механічними властивостями, технологічністю обробки та хімічною стійкістю.

Застосування жаростійкої емалі ПФ8 для захисту зовнішніх поверхонь апарата від впливу навколишнього середовища є розумним рішенням, особливо, якщо апарат піддається тривалому впливу температури до 150°C. Емаль ПФ8 відома своєю високою жаростійкістю та атмосферостійкістю і може забезпечувати ефективний захист від корозії та механічних пошкоджень.

У процесі створення неметалевих прокладок для ефективного ущільнення роз'ємів фланцевих з'єднань апаратів використовується спеціальний матеріал – пароніт ПОН-1. Цей матеріал відзначається своєю унікальною будовою і



властивостями, які роблять його ідеальним вибором для створення надійних прокладок. Це структурований листовий матеріал, який отримується шляхом пресування суміші, яка складається із кількох ключових компонентів. Важливі складові цього матеріалу включають азбест, каучук та порошкові інгредієнти.

Пароніт ПОН-1 відомий своєю здатністю надійно ущільнювати фланцеві з'єднання, запобігаючи витоку рідини або газу через роз'єми. Цей матеріал може легко адаптуватися до форми і контуру фланців, що гарантує ефективне ущільнення і запобігає витоку. Він стійкий до стиснення та зберігає свою структуру під впливом тиску та змін температури.

Але слід враховувати, що пароніт містить азбест, який може бути потенційно шкідливим для здоров'я при вдиханні або контакті. Тому під час обробки та роботи з паронітом необхідно дотримуватися всіх заходів безпеки та рекомендацій для захисту здоров'я.

### 3.2 Розрахунки на міцність, стійкість та герметичність [10, 11]

Знаходимо величину нормативного напруження для сталі 16ГС при розрахунковій температурі:  $\sigma^* = 159$  МПа.

Допустиме напруження:

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

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

$$[\sigma] = 159 \cdot 1 = 159 \text{ МПа}.$$

Допустиме напруження при гідравлічних випробуваннях:

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

де  $\sigma_r^{20} = 280 \text{ МПа}$  – межа плинності сталі 16ГС при температурі  $20^\circ\text{C}$ .

$$[\sigma]_{II} = \frac{280}{1,1} = 254,5 \text{ МПа} .$$

Далі визначаємо розрахунковий тиск:

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

де  $P$  – робочий тиск;

$P_r$  – гідростатичний тиск середовища.

Якщо,  $\frac{P_r}{P} \cdot 100 < 5\%$  , то  $P_p = P$ .

Гідростатичний тиск середовища:

$$P_r = g \cdot \rho_{ж} \cdot H_p , \quad (3.4)$$

де  $\rho_{ж}$  – густина рідини в апараті,  $\text{кг/м}^3$ ;

$g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м/с}^2$ ;

$H_p$  – висота стовпа рідини в апараті, м;

$H_p = 0,6$  м.

$$p_r = 9,81 \cdot 800 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6} = 0,0047 \text{ МПа};$$

$$\frac{P_r}{P} \cdot 100 = \frac{0,047}{0,45} \cdot 100\% = 1,05\% < 5\% ;$$

$$P_p = 0,45 \text{ МПа} .$$

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

$$P_H = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{1,5 \cdot P_p \cdot [\sigma]_{20}}{[\sigma]} \\ 0,2 \end{array} \right\}, \quad (3.5)$$

де  $[\sigma]_{20} = \sigma^* = 170 \text{ МПа}$  – допустиме напруження сталі 16ГС при температурі  $20^\circ\text{C}$  ( $\eta = 1$ ).

$$P_H = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{1,5 \cdot 0,45 \cdot 170}{159} = 0,72 \\ 0,2 \end{array} \right\} = 0,72 \text{ МПа}$$

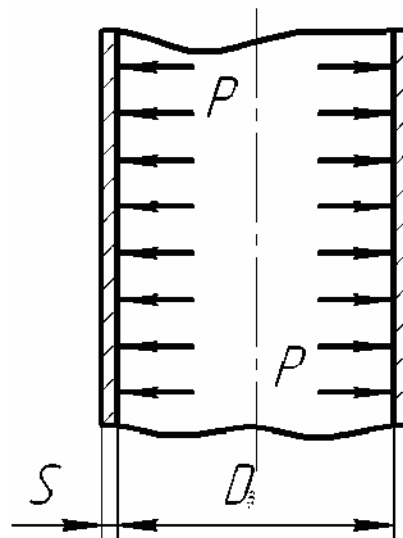


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема циліндричної обичайки

Розрахункова товщина циліндричної обичайки:

$$S_H^H = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_p} \\ \frac{P_H \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_H - P_H} \end{array} \right\}, \quad (3.6)$$

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

$$s_p^H = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,45 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 159 - 0,45} = 1,13 \\ \frac{0,72 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 254,5 - 0,72} = 1,1 \end{array} \right\} = 1,13 \text{ мм}$$

Виконавча товщина циліндричної обичайки:

$$S_{II} \geq S_p^H + c, \quad (3.7)$$

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

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

$c_1$  – добавка для компенсації корозії та ерозії;

$c_2$  – добавка для компенсації мінусового допуску;

$c_3$  – технологічна добавка.

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

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

де  $\Pi = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{рік}}$  – проникність матеріалу;

$\tau = 15$  років – термін служби апарату.

$$c = c_1 = 0,12 \cdot 15 = 1,8 \text{ мм}$$

$$s_{II} = 1,13 + 1,8 = 2,93 \text{ мм}$$

Приймаємо  $s_{II} = 4 \text{ мм}$ .

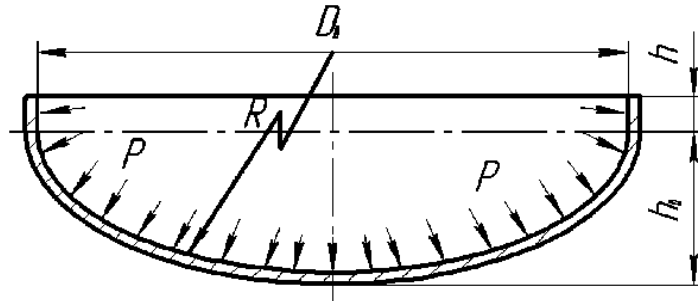


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема еліптичного днища

Розрахункова товщина еліптичного днища:

$$S_p^{\exists} = \max \left\{ \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot P_p}, \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{II} - 0,5 \cdot P_{II}} \right\}, \quad (3.10)$$

$$s_p^{\exists} = \max \left\{ \frac{0,45 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 159 - 0,5 \cdot 0,45} = 1,13, \frac{0,72 \cdot 800}{2 \cdot 1 \cdot 254,5 - 0,5 \cdot 0,72} = 1,13 \right\} = 1,13 \text{ мм}$$

Виконавча товщина еліптичного днища:

$$S_{\exists} \geq S_p^{\exists} + c, \quad (3.11)$$

$$s_{\exists} = 1,13 + 1,8 = 2,93 \text{ мм}$$

Приймаємо  $S_{\exists} = 4 \text{ мм}$ .

Знаходимо масу обичайки кожуха:

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

де  $\rho$  – щільність сталі,  $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$ .

$$m_k = \left[ \frac{3,14 \cdot (0,8 + 2 \cdot 0,004)^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 0,8^2}{4} \right] \cdot 6 \cdot 7850 = 476 \text{ кг}.$$

Маса еліптичного днища та кришки відповідно (згідно):

$$m_{\text{э}} = 1,24 \cdot D^2 \cdot S_{\text{э}} \cdot \rho, \quad (3.13)$$

$$m_{\text{эдн}} = 1,24 \cdot 0,8^2 \cdot 0,004 \cdot 7850 = 25 \text{ кг};$$

$$m_{\text{экр}} = 1,24 \cdot 0,4^2 \cdot 0,004 \cdot 7850 = 6,2 \text{ кг}.$$

Маса труб:

$$m_{\text{мп}} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{\text{н}}^2 - d_{\text{вн}}^2) \cdot H \cdot n \cdot \rho, \quad (3.14)$$

$$m_{\text{мп}} = \frac{3,14}{4} (0,025^2 - 0,021^2) \cdot 6 \cdot 82 \cdot 7850 = 558 \text{ кг}.$$

Маса фланця з решіткою:

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

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

$h_\phi$  – висота фланця, м.

$$m_\phi = \frac{3,14 \cdot 0,51^2}{4} \cdot 0,05 \cdot 7850 = 157 \text{ кг}.$$

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  $\varphi = 0,5$  маса вуглеводневої сировини в апараті складе:

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

$$m_x = 1,2 \cdot 530 \cdot 0,5 = 318 \text{ кг}.$$

Сила тяжіння апарата у робочому стані:

$$G = g \cdot (m_\kappa + m_{\text{Эдн}} + m_{\text{Экр}} + m_{\text{мр}} + m_\phi + m_x), \quad (3.18)$$

$$G = 9,81 \cdot (476 + 25 + 6,2 + 558 + 157 + 318) = 15110 \text{ Н}.$$

Приймаємо кількість опор  $n = 2$  шт.

Навантаження на одну опору становитиме:

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

$$Q = \frac{15110}{2} = 7555 \text{ Н.}$$

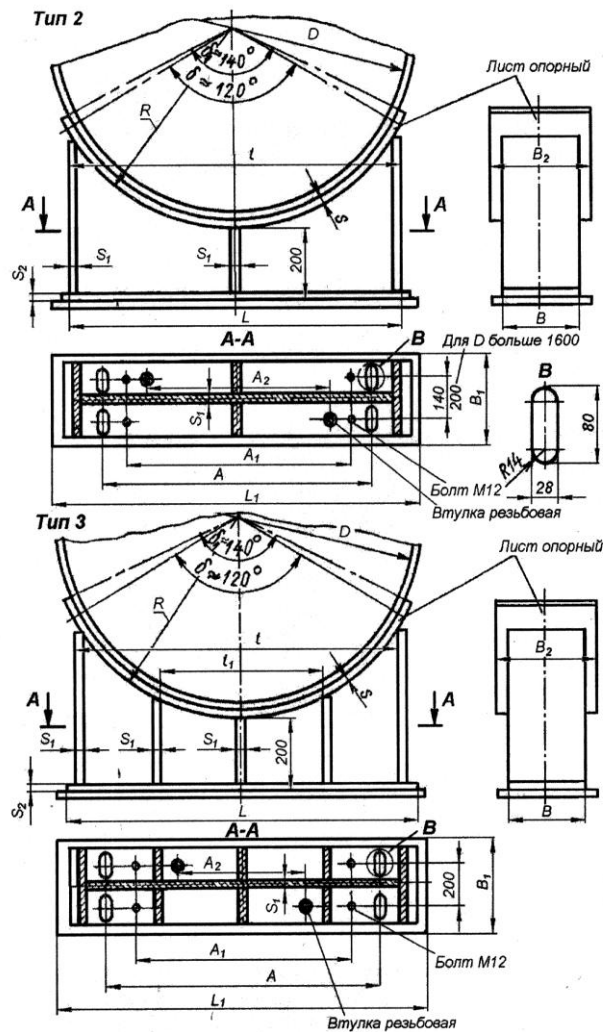


Рисунок 3.3 – Конструктивна схема стандартних сідлових опор

Остаточно приймаємо стандартну сідлову опору 800-414-2-ІІ, конструктивні розміри якої (умовні позначення див. рис. 6):  $D = 800$  мм;  $R = 414$  мм;  $S_1 = 4$  мм;  $S_2 = 14$  мм;  $L = 1000$ ;  $A = 650$  мм;  $A_1 = 550$  мм;  $A_2 = 400$  мм;  $l = 980$  мм;  $B = 250$  мм;  $L_1 = 1020$  мм; втулка для опори М48;  $S = 6$  мм;  $B_2 = 360$  мм.



## **4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА**

### **4.1 Обґрунтування компоновання основного та допоміжного обладнання [12]**

Розміщення обладнання є ключовим аспектом ефективності та безпеки виробничих процесів. Оптимальне планування розташування має значний вплив на швидкість та якість виробництва. Врахування ряду аспектів дозволяє забезпечити оптимальну роботу обладнання і підвищити загальну продуктивність підприємства.

Оптимізація виробничих процесів:

Потік матеріалів. Оптимальне розташування дозволяє зменшити час переміщення матеріалів між різними етапами виробництва, що покращує ефективність і зменшує втрати часу.

Безпека. Врахування правил безпеки при розташуванні обладнання допомагає уникнути потенційних небезпек для працівників. Це включає належну вентиляцію, системи пожежогасіння та ізоляцію.

Технічне обслуговування та інспекції. Забезпечення легкого доступу до обладнання для технічного обслуговування та інспекцій допомагає забезпечити надійність та продуктивність обладнання. Регулярні обстеження можуть попереджати можливі проблеми та аварії.

Оптимізація простору. Розміщення обладнання з урахуванням його функціональних властивостей може знизити витрати на будівництво та експлуатацію, зменшити площу підприємства та підвищити ефективність використання приміщень.

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.

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.

У підсумку, вибір відкритого майданчика для розташування обладнання виявляється найкращим рішенням, яке сприяє оптимізації процесів та забезпеченню безперебійної роботи спиртового підприємства.

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.

У цілому, обрана стратегія розташування на відкритому майданчику максимізує нашу здатність до ефективного керування виробництвом, забезпечує дотримання норм екологічної безпеки, гарантує безпеку персоналу та майна, і водночас створює сприятливі умови для неперервного росту та розвитку нашого підприємства.

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 апаратурного 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 [13, 14]**

Технологія монтажу кожухотрубчастих теплообмінників є важливою частиною їхнього встановлення і впливає на ефективність та надійність їхньої роботи.

Метод встановлення на відкритому майданчику (на нульовій позначці) використовується для великих промислових теплообмінників, які встановлюються під відкритим небом. Вони можуть бути розміщені на підставках або спеціальних фундаментах. Деякі теплообмінники можуть бути встановлені на спеціальних підставках або в побудовах 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 відповідає 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.

су 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 трубопроводною 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 трубопроводної 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 трубопровідною 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 витoku 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 осадом і металом. Поверхню нагріву спочатку

підігривають перегрітою парою, а потім охолоджують холодною водою, що очищена хімічним методом. В результаті, частки осаду відокремлюються від поверхні нагріву 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 ІНФОРМАЦІЙНЕ ТА АПАРАТУРНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ**

### **5.1 Вибір та обґрунтування параметрів контролю, регулювання та вимірювання [15]**

Автоматизація виробничих процесів дозволяє виробляти більше продукції в коротший термін і з меншою кількістю працівників. Роботи, які раніше вимагали багато людських ресурсів, тепер можуть бути виконані автоматизованими системами. Автоматизація допомагає уникнути помилок, що можуть виникнути внаслідок людського фактору. Виробництво стає більш точним і надійним, що покращує якість продукції, а також зменшуються витрати на працю, виробничі матеріали та енергію. Це, зазвичай, призводить до зниження собівартості продукції.

Установка каталітичного крекінгу 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.

При проведенні процесу ректифікації важливо контролювати такі основні параметри: витрату; рівень; температуру; тиск.

Контроль рівня супроводжується контролем тиску і температури, оскільки їх зміна може призвести до аварійних ситуацій або порушень технологічного режиму. Загальна ідея автоматизації полягає в тому, що контроль і регулювання параметрів є критичними для забезпечення безпеки та ефективності процесу ректифікації при отриманні технічного пропану і бутану.

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.

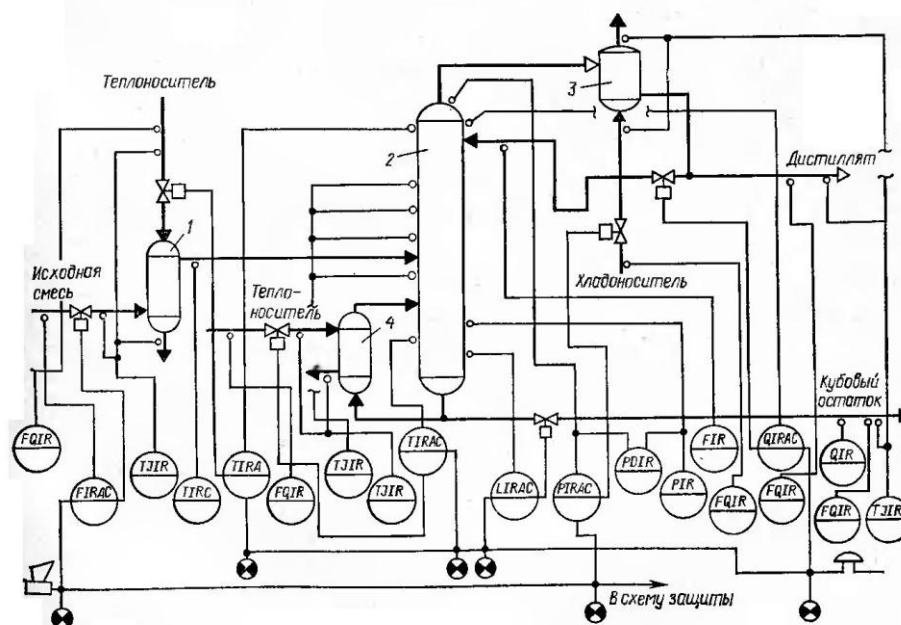


Рисунок 5.1 – Типова схема автоматизації процесу ректифікації:

- 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 Вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації [16]**

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.

Вибір приладів, вироблених на Україні, може бути доцільним для сприяння внутрішнім виробникам і отримання підтримки на місці. Слід вибирати прилади, які покривають потрібний діапазон вимірювань для вашого процесу. Переконайтеся, що вони здатні точно вимірювати необхідні параметри.

Вибір пневматичних приладів може бути обґрунтований пожежонебезпекою. Пневматичні прилади можуть бути менш вразливими до пожежі, оскільки не мають електричних деталей.

Переконайтеся, що ви маєте доступ до підтримки та можливостей обслуговування для обраного обладнання.

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 потенційних небезпек та шкідливостей під час роботи установки [17]**

Охорона праці на нафтопереробному заводі (НПЗ) є вельми важливою для забезпечення безпеки працівників та стабільної роботи виробництва. Враховуючи природу та потенційні ризики, пов'язані з нафтопереробними заводами, низка заходів та підходів повинні бути впроваджені для забезпечення охорони праці.

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 русі 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. Вибудувати 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 фактору

Для нашого випадку використовуємо у якості заземлювача трубу довжиною 200 см, діаметром 5 см та з шириною сполучної смуги 5 см.

Відповідно до вимог ПУЕ визначаємо допустиме опір розтікання струму в заземленні  $R_3$ . Для мереж з напругою до 1000 В можна взяти  $R_3 = 40\text{ Ом}$ .

Визначаємо питомий опір ґрунту, яке рекомендується для розрахунків  $\rho_{\text{ТАБЛ}} = 20000\text{ Ом} \cdot \text{см}$ .

Визначаємо підвищувальні коефіцієнти для труб вертикальних заземлювачів  $K_{\text{П.Т.}}$  і для сполучної смуги  $K_{\text{П.С.}}$ , які враховують зміну опору ґрунту в різні пори року залежно від наявності опадів.  $K_{\text{П.Т.}} = 1,4 \dots 1,6$ ,  $K_{\text{П.С.}} = 2,5 \dots 4$ . Приймаємо  $K_{\text{П.Т.}} = 1,5$ ,  $K_{\text{П.С.}} = 3$ .

Визначення питомого розрахункового опору ґрунту для вертикальних електродів (труб або стрижнів) враховує несприятливі умови за допомогою підвищува-

льного коефіцієнта. Цей процес включає в себе оцінку того, як ряд факторів може вплинути на ефективність заземлення.

Питомий розрахунковий опір ґрунту визначається з урахуванням таких чинників, як вологість ґрунту, його склад, температура і глибина занурення електродів. Підвищувальний коефіцієнт враховує ті умови, які можуть призвести до збільшення опору ґрунту в порівнянні з ідеальними умовами.

Цей підвищувальний коефіцієнт важливий для коректного розрахунку ефективності системи заземлення і дозволяє враховувати змінні умови довкілля, що можуть впливати на опір ґрунту і, відповідно, на надійність заземлення.

$$\rho_{\text{РОЗР.Т.}} = \rho_{\text{ТАБЛ.}} \cdot K_{\text{П.Т.}}, \quad (6.1)$$

$$\rho_{\text{РОЗР.Т.}} = 2000 \cdot 1,5 = 3000 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Для визначення питомого розрахункового опору ґрунту для горизонтального заземлювача (сполучної смуги) використовують різні методи, але основні враховують взаємодію структури з навколишнім ґрунтом. Зазвичай використовують метод кінцевих елементів або аналогічні числові методи для моделювання взаємодії ґрунту із сполучною смугою. Для горизонтального заземлювача важливими є ширина та глибина сполучної смуги, а також її розташування від поверхні ґрунту.

Розрахунки включають в себе властивості ґрунту, такі як його електропровідність, вологість, та інші параметри, які можуть впливати на опір. Застосовують рівняння електричного опору для розрахунку питомого опору ґрунту для горизонтального заземлювача. Це може включати в себе інтегрування величини опору вздовж довжини сполучної смуги.

Також може бути важливим врахувати підвищувальний коефіцієнт, щоб врахувати невизначеності та несприятливі умови.

$$\rho_{\text{РОЗР.П.}} = \rho_{\text{ТАБЛ.}} \cdot K_{\text{П.С.}}, \quad (6.2)$$

$$\rho_{\text{розр.п.}} = 2000 \cdot 3 = 6000 \text{ Ом} \cdot \text{см}.$$

Визначення відстані від поверхні землі до середини вертикального заземлювача є важливим етапом для правильного розрахунку ефективності заземлення. Цей параметр, відомий як глибина заземлення, може впливати на опір ґрунту і, отже, на ефективність заземлення.

Різні типи ґрунту мають різні характеристики, що впливають на ефективність заземлення. З'ясуйте, який тип ґрунту переважає на місці розташування заземлювача. Фактори, такі як вологість ґрунту та рівень солей, також можуть впливати на ефективність заземлення.

Для вертикального заземлювача оптимальна глибина визначається з урахуванням глибини замерзання ґрунту, рівня водостоку та інших чинників. Зазвичай, чим глибше заземлення, тим менший опір ґрунту. Деякі країни чи організації можуть мати встановлені стандарти для глибини заземлення, які слід враховувати при розрахунках.

Визначте, чи є конкретні вимоги стосовно глибини заземлення відповідно до електробезпеки.

Враховуючи ці фактори, можна визначити оптимальну глибину заземлення для вертикального заземлювача в конкретних умовах.

$$t = h_3 + \frac{l_T}{2}, \quad (6.3)$$

де  $h_3 = 80 \text{ см}$  – глибина занурення труб;

$l_T = 200 \text{ см}$  – довжина вертикального заземлювача.

$$t = 80 + \frac{200}{2} = 180 \text{ см}.$$

Опір розтікання струму для вертикального заземлювача може бути розрахований з урахуванням кількох факторів, таких як геометричні параметри заземлювача та властивості ґрунту. Для одиночного вертикального заземлювача, розташованого нижче поверхні землі, можна використовувати спрощені формули. Один з підходів до розрахунку опору розтікання струму для вертикального заземлювача полягає у використанні рівнянь, що базуються на геометричних та електрофізичних властивостях системи.

$$R_T = 0,366 \cdot \frac{\rho_{\text{розр.т.}}}{l_T} \cdot \left( \lg \frac{2 \cdot l_T}{d} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot t + l_T}{4 \cdot t - l_T} \right), \quad (6.4)$$

$$R_T = 0,366 \cdot \frac{3000}{200} \cdot \left( \lg \frac{2 \cdot 200}{5} + \frac{1}{2} \cdot \lg \frac{4 \cdot 180 + 200}{4 \cdot 180 - 200} \right) = 11,13 \text{ Ом}.$$

Визначаємо відстань між вертикальними заземлювачами зі співвідношення  $c = L_T / l_T$ . Для стаціонарних заглиблених заземлювачів це співвідношення береться таким:  $c = 1$ .

$$L_T = l_T \cdot c, \quad (6.5)$$

$$L_T = 200 \cdot 1 = 200 \text{ см}.$$

Кількість вертикальних заземлювачів визначається з урахуванням різних факторів, таких як геологічні властивості ґрунту, потужність струму, який повинен бути розведений, і параметри самого заземлювача. Один із підходів до визначення кількості заземлювачів полягає у розрахунку досягнутого опору ґрунту з урахуванням розмірів і глибини занурення кожного заземлювача.

$$n_T = \frac{R_T}{R_3} \text{ (ціле число)}, \quad (6.6)$$

$$n_T = \frac{11,13}{4} = 2,78 \approx 3.$$

Визначаємо коефіцієнт екранування труб при кількості труб  $n_T$ :  $\eta_{E.T.} = 0,78$ .

Визначення необхідної кількості вертикальних заземлювачів з урахуванням коефіцієнта екранування включає додаткові розрахунки для врахування впливу екрануючих заземлювачів на загальний опір ґрунту.

Коефіцієнт екранування (коефіцієнт взаємодії) показує, як кожен заземлювач впливає на інші. Він залежить від геометричних параметрів заземлювачів та їх розташування.

$$n_{T.E.} = \frac{R_T}{R_3 \cdot \eta_{E.T.}}, \quad (6.7)$$

$$n_{T.E.} = \frac{11,13}{4 \cdot 0,78} = 3,57 \approx 4.$$

Для визначення розрахункового опору розтікання струму при заданій кількості вертикальних заземлювачів, вам слід використовувати наступну формулу:

$$R_{\text{РОЗР.П.Т.Е.}} = \frac{R_T}{n_{T.E.} \cdot \eta_{E.T.}}, \quad (6.8)$$

$$R_{\text{РОЗР.П.Т.Е.}} = \frac{11,13}{4 \cdot 0,78} = 3,57 \text{ Ом}.$$

Для визначення довжини сполучної смуги можна скористатися наступною формулою:

$$L_{3.C.} = 1,05 \cdot L_T \cdot (n_{T.E.} - 1), \quad (6.9)$$



$$L_{3.C.} = 1,05 \cdot 200 \cdot (4 - 1) = 630 \text{ см}.$$

Опір розтікання струму в сполучній смузі можна визначити за допомогою наступної формули:

$$R_{3.C.} = 0,366 \cdot \frac{\rho_{\text{розр.п.}}}{L_{3.C.}} \cdot \lg \frac{2 \cdot L_{3.C.}^2}{h_3 \cdot b_C}, \quad (6.10)$$

де  $h_3 = 80 \text{ см}$  – глибина закладення вертикальних заземлювачів;

$b_C = 5 \text{ см}$  – ширина сполучної смуги.

$$R_{3.C.} = 0,366 \cdot \frac{6000}{630} \cdot \lg \frac{2 \cdot 630^2}{80 \cdot 5} = 11,49 \text{ Ом}.$$

Визначаємо коефіцієнт екранування для сполучної смуги:  $\eta_{E.3.C.} = 0,77$ .

Коефіцієнт екранування враховує вплив навколишнього середовища, архітектурних елементів та інших факторів, що можуть впливати на розподіл електричного струму в сполучній смузі. Для визначення розрахункового опору для розтікання електричного струму в сполучній смузі з урахуванням коефіцієнта екранування, використовують наступну формулу:

$$R_{\text{розр.п.}} = \frac{R_{3.C.}}{n_{E.C.} \cdot \eta_{E.3.C.}}, \quad (6.11)$$

де  $n_{E.C.} = 1$ .

$$R_{\text{розр.п.}} = \frac{11,49}{1 \cdot 0,77} = 14,92 \text{ Ом}.$$

Визначаємо загальний розрахунковий теоретичний опір розтікання струму від вертикальних заземлювачів і сполучної смуги:

$$R_{\text{ЗАГ.РОЗР.}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{РОЗР.П.Т.Е.}}} + \frac{1}{R_{\text{РОЗР.С}}}}, \quad (6.12)$$

$$R_{\text{ЗАГ.РОЗР.}} = \frac{1}{\frac{1}{3,57} + \frac{1}{14,92}} = 2,88 \text{ Ом}.$$

Таким чином, обрана система захисного заземлення для валкової дробарки є ефективною, оскільки  $R_{\text{РОЗР.П.Т.Е.}} = 3,57 \text{ Ом} > R_{\text{ЗАГ.РОЗР.}} = 2,88 \text{ Ом}$ .

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Каталітичний крекінг: практика і теорія, розвиток досліджень в Україні / Л.К. Патриляк // Каталіз та нафтохімія. – 2001. – № 9–10. – С. 14-25.
2. Дистанційний курс «Процеси та апарати хімічних виробництв». Тема 19. Сучасні конструкції теплообмінного обладнання [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://dl.sumdu.edu.ua/textbooks/22852/266093/index.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. Онищук О.О., Кормош Ж.О. Процеси та апарати хімічних виробництв: курс лекцій. – Луцьк: Вежа-Друк, 2020. – 155 с.
9. 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.

10. 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.

11. 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.

12. 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.

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

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

15. 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>

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

17. Основи охорони праці: Підручник. 2-ге видання, доповнене та перероблене / К.Н. Ткачук, М.О. Халімовський, В.В. Зацарний, Д.В. Зеркалов, Р.В. Сабарно, О.І. Полукаров, В.С. Коз'яков, Л.О. Мітюк. За ред. К.Н. Ткачука і М.О. Халімовського. – Київ : Основа, 2006. – 448 с.