

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

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_   
підпис, дата

**Кваліфікаційна робота бакалавра**  
**зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"**  
**освітня програма "Комп'ютерний інжиніринг**  
**обладнання хімічних виробництв"**

Тема роботи: Ректифікаційна установка у виробництві бензолу. Розробити тарілчасту ректифікаційну колону

Виконав:

студент групи ХМдн-72п

Шевченко Сергій Володимирович

\_\_\_\_\_   
підпис

Залікова книжка

№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота бакалавра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Яхненко Сергій Михайлович

\_\_\_\_\_   
підпис, дата

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
**Кафедра хімічної інженерії**

Спеціальність 133 "Галузеве машинобудування"  
Освітня програма "Комп'ютерний інжиніринг обладнання хімічних виробництв"

Курс 4 Група ХМдн-72п Семестр 8

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Студенту Шевченку Сергію Володимировичу

1 Тема роботи: Ректифікаційна установка у виробництві бензолу.  
Розробити тарілчасту ректифікаційну колону

2 Вихідні дані: Розробити ректифікаційну колону з ситчатими тарілками у виробництві бензолу. Продуктивність проєктованого апарату становить 6000 кг/год. Вміст легколеткого компоненту в початковій суміші 30 % мол.; у дистилляті 90 % мол.; у кубовому залишку 5 % мол. Тиск у колоні 0,1 МПа.

3 Перелік обов'язкового графічного матеріалу (аркуші А1):

- |  |            |
|--|------------|
| 1. <u>Технологічна схема ректифікаційної установки</u> | – 1,0 арк. |
| 2. <u>Складальне креслення ректифікаційної колони</u>  | – 1,0 арк. |
| 3. <u>Складальне креслення ситчатої тарілки</u>        | – 1,0 арк. |

4 Рекомендована література: 1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : СумДУ, 2019. – 32 с.; 2. Врагов А. П. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв: Навчальний посібник / А. П. Врагов, Я. Е. Михайловський, С. І. Якушко. – Суми : СумДУ, 2008. – 170 с.

5 Етапи виконання кваліфікаційної роботи:

Етапи та розділи проектування	ТИЖНІ				
	1	2,3	4,5	6,7	8
1 Вступна частина	x				
2 Технологічна частина		xx			
3 Проектно-конструкторська частина			xx		
4 Розробка креслень				xx	
5 Оформлення записки					x
6 Захист роботи					x

6 Дата видачі завдання

жовтень 2020 р.

Керівник

\_\_\_\_\_

підпис

доц. Яхненко С.М.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 53 с., 2 рис., 3 додатки, 17 джерел.

Графічні матеріали: технологічна схема ректифікаційної установки, складальне креслення ректифікаційної колони, складальне креслення ситчатої тарілки – усього 3 аркуші формату А1.

Тема кваліфікаційної роботи «Ректифікаційна установка у виробництві бензолу. Розробити тарілчасту ректифікаційну колону».

У роботі наведено теоретичні основи та особливості процесу розділення двокомпонентних сумішей ректифікацією, виконано технологічний розрахунок процесу, визначено основні геометричні розміри апарату та його гідравлічний опір. Також обґрунтовано вибір матеріалу для виготовлення основних деталей та вузлів проектованої колони, розраховано і підібрано допоміжне обладнання. Розрахунками на міцність та герметичність доведена надійність роботи ректифікаційної колони. Окремим підрозділом представлено монтаж та ремонт проектованого апарату. У розділі «Охорона праці» розглянуті основні способи надання першої допомоги людині при ураженні її електричним струмом.

Ключові слова: УСТАНОВКА, ДВОКОМПОНЕНТНА СУМІШ, БЕНЗОЛ, РЕКТИФІКАЦІЙНА КОЛОНА, СИТЧАТА ТАРИЛКА, ЕЛЕКТРИЧНИЙ СТРУМ, ДОПОМОГА.

## Зміст

	С.
Вступ	5
1 Технологічна частина	7
1.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки	7
1.2 Теоретичні основи процесу ректифікації	9
1.3 Опис конструкції апарату та вибір основних конструкційних матеріалів	12
2 Технологічні розрахунки процесу та апарату	16
2.1 Технологічні розрахунки	16
2.2 Конструктивні розрахунки	23
2.3 Гідравлічні розрахунки	28
2.4 Розрахунок та вибір допоміжного обладнання	32
3 Розрахунки апарату на міцність та герметичність	38
3.1 Розрахунок товщини стінки корпусу апарату	38
3.2 Розрахунок товщини стінки кришки (днища) апарату	40
3.3 Розрахунок опори апарату	41
4 Монтаж та ремонт апарату	44
4.1 Монтаж апарату	44
4.2 Ремонт апарату	46
5 Охорона праці	49
Список використаних джерел	56
Додаток А – Рівноважна і робоча лінії на діаграмі $y - x$	
Додаток Б – Крива рівноваги бінарної суміші	
Додаток В – Специфікації до графічної частини проекту	

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>			
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата				
Розроб.		Шевченко			<b>Ректифікаційна колона</b> <i>Пояснювальна записка</i>	Лім.	Лист	Листів
Перевір.		Яхненко					4	53
Реценз.						<b>СумДУ, ХМдн-72п</b>		
Н. Контр.								
Затверд.		Склабінський						

## Вступ

Широкий асортимент одержуваних хімічних продуктів обумовлює складність і різноманітність технологічних процесів, а також типів, конструкції машин і апаратів для їх проведення. Складний технологічний процес складається із окремих стадій – простих процесів, які класифікуються на: гідромеханічні, теплові, масообмінні, хімічні, механічні [1].

Хімічний і фізичний поділ двокомпонентних сумішей можна здійснити за допомогою масообмінних процесів. Одним із перших масообмінних процесів якому піддаються розділювачі суміші – це ректифікація. За допомогою ректифікації бінарну суміш розділяють на окремі компоненти, які в подальшому використовуються в хімічній, органічній і багатьох інших промисловостях [1].

Перегонка та ректифікація являють собою енергоємні процеси, що вимагають великих витрат гріючої пари і охолоджуючої води, тому для досягнення високих експлуатаційних показників дуже важливе значення має вибір оптимальних режимів роботи установок, що базується на знанні теоретичних основ процесу.

Бензол – це один із найбільш поширених хімічних продуктів і найпоширеніше ароматичне з'єднання. У фізичній вазі пластмас близько 30 %, в каучуках і резинах – 66 %, в синтетичних волокнах – до 80 % припадає на ароматичні вуглеводні, родоначальником яких є бензол [2].

Основні області застосування бензолу – виробництво етилбензолу, кумолу і циклогексану. На частку цих продуктів припадає близько 70 % світового споживання бензолу. Етилбензол є важливим нафтохімічним продуктом, основний обсяг якого використовується для виробництва стиролу. Циклогексан використовується в якості сировини для отримання капролактаму, розчинника. Капролактаму, у свою чергу, застосовується для виробництва термопластичних смол (поліамід 6), капронових волокон і ниток. Нітробензол є напівпродуктом для отримання аніліну [2].

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
						5
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Специфіка різних виробництв, прагнення створити високоефективні і за можливістю прості апарати зумовили різноманіття конструктивних рішень ректифікаційних колон. У даному проекті представлений розрахунок ректифікаційної колони, яка входить до складу установки безперервної дії для отримання бензолу. Кваліфікаційна робота являє собою комплексний навчально-дослідний та практичний проект, який виконано у відповідності до методичних вказівок [3] із представленням усіх регламентованих розділів.

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		6

## 1 Технологічна частина

### 1.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки

Виробництво бензолу засновано на переробці цілого ряду сировинних компонентів: толуолу, важкої фракції піролізу, смоли коксування вугілля, тому випуск бензолу ведеться як на підприємствах нафтохімії, так і на металургійних заводах. Залежно від технології отримання і призначення бензол поділяють на бензол нафтовий і кам'яновугільний «вищої очистки», «для синтезу», «вищого сорту», «першого сорту», «для нитрації», «технічний», «сирий» [2].

Найбільш старий метод промислового отримання бензолу – виділення його з попередньо охолоджених пірогазових продуктів коксування кам'яного вугілля абсорбцією органічними поглиначами, наприклад маслами кам'яновугільного чи нафтового походження; для відділення поглинача використовують перегонку з водяною парою. Від домішок (наприклад, тιοфену) сирий бензол відокремлюють гідроочищенням [2].

Основну кількість бензолу отримують каталітичним риформингом (470–550°C) нафтової фракції, що википає при 62–85°C. Бензол високої чистоти отримують за допомогою екстрактивної перегонки з диметилформамидом [2].

Технологічна схема ректифікаційної установки для розділення бінарної суміші, з отриманням бензолу у якості окремого компонента, представлена на рис. 1.1. Принцип роботи даної установки полягає у наступному. Бінарна суміш після сировинної ємності надходить на перший розподільник, де розділяється на два паралельні потоки. Далі за допомогою відцентрових насосів суміш подається в підігрівач, де нагрівається до температури початку кипіння.

Уже підігріта суміш спрямовується у секцію живлення атмосферної ректифікаційної колони з ситчатими тарілками. Тарілка живлення розділяє колону на дві умовні частини: верхню – зміцнюючу і нижню – вичерпну. На тарілці живлення склад рідини відповідає складу вихідної бінарної суміші.

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
						7
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

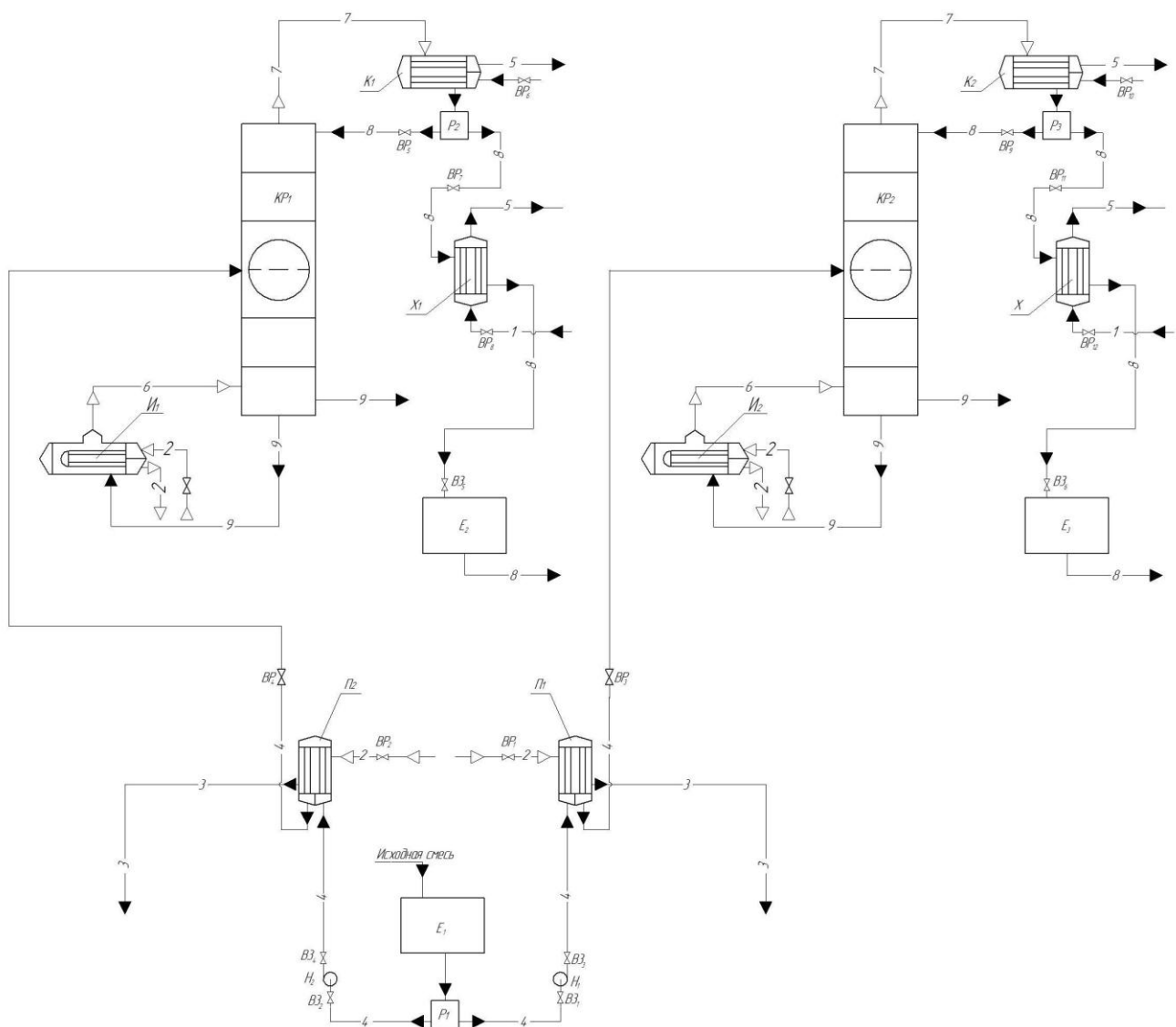


Рисунок 1.1 – Технологічна схема ректифікаційної установки для отримання бензолу

У результаті розділення суміші з нижньої частини колони відводиться кубовий залишок, який спрямовується до споживача. Частина кубового залишку відбирається із нижньої частини колони і виходить у випарник, де за рахунок тепла насиченої водяної пари відбувається кипіння кубової рідини і утворення парів високо киплячого компоненту. Останній повертається під нижню тарілку ректифікаційної колони в якості парового зрошення.

У верхній частині колони відбувається процес зміцнення пари низько киплячим компонентом за рахунок багатоступеневого контактування на



масообмінних тарілках зі стікаючою зверху униз флегмою. Пари бензолу, що відводяться з верхньої частини колони, надходять у конденсатор, де конденсуються у міжтрубному просторі апарату за рахунок відведення тепла холодоагенту, що рухається у трубному просторі. Частина отриманого конденсату відбирається і у вигляді флегми повертається в колону на зрошення її верхньої частини. Дистилят додатково охолоджується в холодильнику і спрямовується до відповідного збірника у якості готового продукту із високою концентрацією низько киплячого компоненту.

## 1.2 Теоретичні основи процесу ректифікації [1, 4, 5]

При ректифікації перенесення речовини  $M$ , що розподіляється, відбувається за умов турбулентного руху фаз. Прийmemo також, що речовина переходить із фази  $\Phi_y$ , де концентрація речовини  $M$  вище рівноважної, в фазу  $\Phi_x$ . Таким чином, здійснюється процес масовіддачі із основної маси фази  $\Phi_y$  до поверхні розділу фаз і процес масовіддачі від поверхні розділу до основної маси фази  $\Phi_x$ . У результаті таких частинних процесів, а також подолання опору перенесення через саму поверхню розділу фаз (якщо він має суттєву величину), і відбувається процес масопередачі – перехід речовини із однієї фази в іншу.

Процес масопередачі найтіснішим чином пов'язаний зі структурою турбулентного потоку в кожній фазі. При турбулентному русі потоку біля твердої стінки утворюється ламінарний прикордонний шар. Аналогічно, у кожній фазі розрізняють ядро (основну масу фази) і прикордонний шар біля кордону фази. В ядрі речовина переноситься переважно турбулентними пульсаціями і концентрація розподілюваної речовини в ядрі практично постійна. У прикордонному шарі відбувається поступове згасання турбулентності. Це виражається більш різкою зміною концентрації в міру наближення до поверхні розділення. Безпосередньо біля поверхні перенесення сильно сповільнюється, оскільки його швидкість вже визначається швидкістю

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						9
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		



Згідно плівкової моделі, кількість речовини  $q$ , яка перейшла через одиницю поверхні в одиницю часу, пропорційна різниці концентрацій в ядрі і на кордоні фази, якщо перенесення походить від ядра до поверхні розділення фаз:

$$q = \frac{D}{\delta_{E\Phi}} \cdot (c_0 - c_{GP}), \quad (1.1)$$

де  $c_0$  і  $c_{GP}$  – відповідно середня концентрація в ядрі фази і концентрація на межі поділу фаз;

$\delta_{E\Phi}$  – «ефективна» або «приведена» товщина прикордонної плівки.

Для фази по іншу сторону поверхні розділу величина  $q$  пропорційна різниці концентрацій на кордоні і в ядрі фази.

У рівнянні (1.1)  $D/\delta_{E\Phi}$  – коефіцієнт, що характеризує швидкість масовіддачі, а величина  $\delta_{E\Phi}$  за своїм змістом – товщина деякого прикордонного шару, опір якого молекулярній дифузії еквівалентно опору перенесення, зумовленого в дійсності конвективною дифузиею.

У плівковій моделі значно спрощено справжні гідродинамічні умови поблизу кордону розділення фаз, де відбувається загасання турбулентності. Із цієї причини більшість дослідних даних не підтверджують залежності  $q \sim D$ , як випливає із рівняння (1.1), якщо вважати, що величина  $\delta_{E\Phi}$  не залежить від  $D$ .

Крім того, ефективні товщини плівок практично не піддаються розрахунку або вимірюванню.

Матеріальний баланс ректифікаційної колони за потоками:

$$G_F = G_D + G_W; \quad (1.2)$$

Матеріальний баланс ректифікаційної колони за легколетким компонентом:

$$G_F \cdot x_F = G_D \cdot x_D + G_W \cdot x_W, \quad (1.3)$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
						11
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

де  $G_F$ ,  $G_D$ ,  $G_W$  – масові або мольні витрати живлення, дистилляту та кубового залишку відповідно;

$x_F$ ,  $x_D$ ,  $x_W$  – вміст легколетучого компонента в живленні, дистилляті і кубовому залишку відповідно.

Прихід тепла:

– з теплоносієм в кип'ятильнику  $Q_K$ ;

– з вихідною сумішшю  $Q_F$ ;

– з флегмою  $Q_\Phi$ .

Витрата тепла:

– з парами, які надходять з колони в дефлегматор  $Q_G$ ;

– із залишком  $Q_W$ ;

– втрати в навколишнє середовище  $Q_{ВТР}$ .

Таким чином, рівняння теплового балансу приймає вигляд:

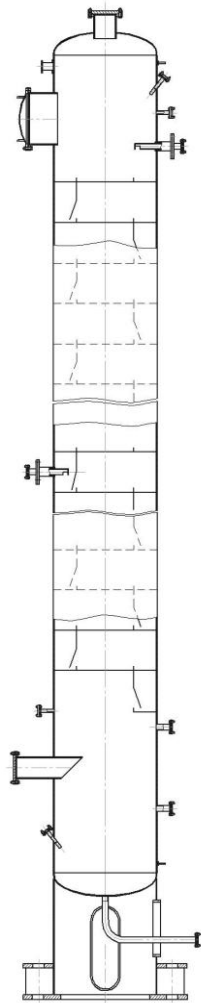
$$Q_K + Q_F + Q_\Phi = Q_G + Q_W + Q_{ВТР}. \quad (1.4)$$

### 1.3 Опис конструкції апарату та вибір основних конструкційних матеріалів

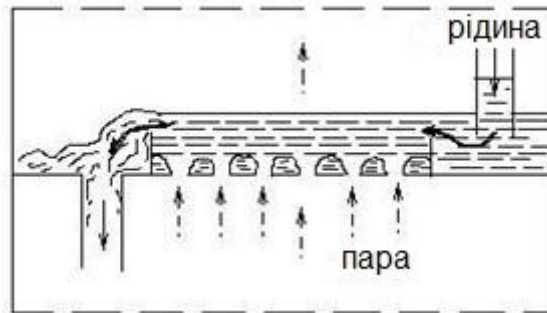
Нашим об'єктом дослідження є тарілчаста ректифікаційна колона (див. рис. 1.2, а). За конструкцією це вертикальний циліндричний апарат, до якого приварено днище. Кришка приєднана за допомогою фланцевого з'єднання. У середині апарату у якості контактних пристроїв встановлені ситчаті тарілки (див. рис. 1.2, б). За допомогою тарілок секціонується простір усередині колони та створюється спрямований рух газової та рідинної фаз.

Ситчаті тарілки виготовляються із металевих листів із рівномірно розміщеними по поверхні отворами 3–6 мм, призначеними для проходу газу знизу. Для запобігання провалу рідини через ці отвори газ повинен рухатись із достатньою швидкістю.

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12



а



б

Рисунок 1.2 – Схема тарілчастої колони (а)  
та принцип роботи ситчатої тарілки (б)

Принцип роботи колони полягає у наступному. Пара, що утворилася у випарнику, повертається під нижню тарілку колони, тим самим забезпечуючи її паровим зрошенням. Унизу колони температура майже дорівнює температурі кипіння висококиплячого компонента.

Попередньо нагріта до кипіння вихідна суміш подається на тарілку живлення колони, яка ділить колону на дві частини: нижню (вичерпну) і верхню (зміцнюючу). Вихідна суміш із живильної тарілки стікає на нижче розташовані, взаємодіючи на своєму шляху з паром, що рухається від низу до верху по колоні. У результаті такої взаємодії пара збагачується легколетким

компонентом, а стікаюча вниз рідина, навпаки, збіднюється цим компонентом, а збагачується труднолетким. У нижній частині колони йде процес вичерпання легколеткого компоненту із вихідної суміші.

Для збереження високої чистоти розділюваних компонентів, необхідно здійснювати рідинне зрошення верхньої частини колони. Утворений дистилат ділиться на два потоки: один у вигляді продукту спрямовується на подальше охолодження і на склад готової продукції, а інший повертається назад у колону в якості флегми. На верхній тарілці колони температура майже дорівнює температурі кипіння низькокиплячого компонента.

У хімічній промисловості умови роботи апаратів характеризуються широким діапазоном температур – приблизно від  $-250$  до  $+800^{\circ}\text{C}$  при тисках від  $0,015$  Па до  $600$  МПа при агресивному впливі середовищ [6].

Основними вимогами, яким повинні відповідати хімічні апарати, є механічна надійність, довговічність, конструктивні досконалість, простота виготовлення, зручність транспортування, монтажу, експлуатації тощо [6–8].

Здійснимо підбір конструктивних матеріалів для виготовлення апарата. Підбір будемо здійснювати, беручи до уваги робочу температуру, агресивність середовища та величину робочого тиску.

Із огляду на перераховані вище параметри, вибираємо сталь 09Г2С.

Сталь 09Г2С відноситься до класу низьколегованих сталей. Спосіб поставки – листовая сталь. Характеризується підвищеною міцністю і ударною в'язкістю в інтервалі температур від мінус  $70$  до плюс  $475^{\circ}\text{C}$ . Добре деформується як в гарячому, так і холодному стані, легко піддається обробці різанням. Дуже добре зварюється усіма видами зварювання. Однак через велику в'язкість вона гірше піддається механічній обробці. Крім того, сталь нестійка в багатьох агресивних середовищах.

Несучі елементи зварних і незварних конструкцій колони виконані зі сталі Ст3. Це конструкційна вуглецева звичайної якості. Добре зварюється усіма видами зварювання, не схильна до відпускнуї крихкості.

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		14

Для усіх інших деталей використана конструкційна легована сталь 35Х.

У якості прокладкового матеріалу для ущільнення фланцевих та інших з'єднань використовуємо пароніт. Це листовий прокладковий матеріал, виготовлений пресуванням азбокаучукової маси, що складається з азбесту, каучуку і порошкових інгредієнтів.

					ХІ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		15

## 2 Технологічні розрахунки процесу та апарату

### 2.1 Технологічні розрахунки

Технологічні розрахунки виконуємо у відповідності до методики, що представлена у джерелі [9]. У нашому випадку продуктивність колони за бінарною сумішшю задана у масових одиницях (кг/год.), тому необхідно перевести молярні частки легколеткого компоненту також у масові:

$$\bar{x}_f = x_f \cdot \frac{M_{\text{ллк}}}{M_f}; \quad (2.1)$$

$$\bar{x}_D = x_D \cdot \frac{M_{\text{ллк}}}{M_D}; \quad (2.2)$$

$$\bar{x}_W = x_W \cdot \frac{M_{\text{ллк}}}{M_W}; \quad (2.3)$$

$$M_F = M_{\text{ллк}} \cdot x_F + M_{\text{млк}} \cdot (1 - x_F), \text{ кг/кмоль}, \quad (2.4)$$

де  $M_F = 78 \cdot 0,3 + 92 \cdot (1 - 0,3) = 87,8$  кг/кмоль;

$$M_D = M_{\text{ллк}} \cdot x_D + M_{\text{млк}} \cdot (1 - x_D), \text{ кг/кмоль};$$

$$M_D = 78 \cdot 0,9 + 92 \cdot (1 - 0,9) = 79,4 \text{ кг/кмоль};$$

$$M_W = M_{\text{ллк}} \cdot x_W + M_{\text{млк}} \cdot (1 - x_W), \text{ кг/кмоль};$$

$$M_W = 78 \cdot 0,05 + 92 \cdot (1 - 0,05) = 91,3 \text{ кг/кмоль}.$$

$M_{\text{ллк}} = 78$  кг/кмоль – молярна маса легколеткого компоненту [10];

$M_{\text{млк}} = 92$  кг/кмоль – молярна маса труднолеткого компоненту [10].

$$\bar{x}_f = 0,3 \cdot \frac{78}{87,8} = 0,267 \text{ мас. частки};$$

$$\bar{x}_D = 0,9 \cdot \frac{78}{79,4} = 0,884 \text{ мас. частки};$$

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
						16
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



$$\bar{x}_w = 0,05 \cdot \frac{78}{91,3} = 0,043 \text{ мас. частки.}$$

Спільне розв'язання рівнянь (1.2) і (1.3) дозволяє отримати залежність для визначення масових витрат дистилляту і кубового залишку:

$$G_D = G_f \cdot \frac{\bar{x}_f - \bar{x}_w}{\bar{x}_D - \bar{x}_w}; \quad (2.5)$$

$$G_D = 6000 \cdot \frac{0,267 - 0,043}{0,884 - 0,043} = 1598 \text{ кг/год.};$$

$$G_w = G_f \cdot \frac{\bar{x}_D - \bar{x}_f}{\bar{x}_D - \bar{x}_w}; \quad (2.6)$$

$$G_w = 6000 \cdot \frac{0,884 - 0,267}{0,884 - 0,043} = 4402 \text{ кг/год.}$$

Рівноважну криву будуємо у координатах  $y - x$  за довідковими даними при рівноважних складах рідини і пари  $y$  залежності від температури (див. Додаток Б).

Визначаємо мінімальне флегмове число:

$$R_{\min} = \frac{x_D - y_f^*}{y_f^* - x_f}; \quad (2.7)$$

де  $y_f^*$  – склад пари, яка перебуває в рівновазі з вихідною сумішшю;  
 $y_f^* = 0,5$  – визначається з кривої рівноваги.

$$R_{\min} = \frac{0,9 - 0,55}{0,55 - 0,3} = 1,4.$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		17

Далі визначаємо оптимальне флегмовое число при  $\beta = 1,8$ :

$$R = \beta \cdot R_{\min} = 1,8 \cdot 1,4 = 2,52. \quad (2.8)$$

Розрахуємо масову витрату стікаючої по колоні флегми:

$$G_R = R \cdot G_D; \quad (2.9)$$

$$G_R = 2,52 \cdot 1598 = 4027 \text{ кг/год.}$$

Розрахуємо масову витрату піднімаючихся по колоні парів:

$$G_V = (R + 1) \cdot G_D; \quad (2.10)$$

$$G_V = (2,52 + 1) \cdot 1598 = 5625 \text{ кг/год.}$$

Робоча лінія процесу для верхньої частини колони:

$$y = \frac{R}{R+1} \cdot x + \frac{x_D}{R+1}; \quad (2.11)$$

Робоча лінія процесу для нижньої частини колони:

$$y = \frac{F+R}{R+1} \cdot x - \frac{F-1}{R+1} \cdot x_W, \quad (2.12)$$

де  $F$  – число живлення:

$$F = \frac{G_F}{G_D} \cdot \frac{M_D}{M_F}; \quad (2.13)$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
						18
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F = \frac{6000}{1598} \cdot \frac{79,4}{87,8} = 3,4.$$

Далі знаходимо ординату т. А, у якій перетинаються робочі лінії:

$$y_f' = \frac{2,52}{2,52+1} \cdot 0,3 + \frac{0,9}{2,52+1} = 0,47;$$

$$y_f'' = \frac{3,4+2,52}{2,52+1} \cdot 0,3 - \frac{3,4-1}{2,52+1} \cdot 0,05 = 0,47.$$

Рівність значень  $y_f' = y_f''$  засвідчує про правильність розрахунків.

Середні молярні концентрації рідини визначаються за середньоарифметичними залежностями:

– у верхній частині колони

$$x_{cp}' = \frac{(x_f + x_D)}{2}; \quad (2.14)$$

$$x_{cp}' = \frac{(0,3+0,9)}{2} = 0,6;$$

– у нижній частині колони

$$x_{cp}'' = \frac{(x_f + x_W)}{2}; \quad (2.15)$$

$$x_{cp}'' = \frac{(0,3+0,05)}{2} = 0,175.$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		19

Середні молярні концентрації парової фази визначаються за рівняннями робочих ліній:

– у верхній частині колони

$$y'_{cp} = \frac{R}{R+1} \cdot x'_{cp} + \frac{x_D}{R+1}; \quad (2.16)$$

$$y'_{cp} = \frac{2,52}{2,52+1} \cdot 0,6 + \frac{0,9}{2,52+1} = 0,69;$$

– у нижній частині колони

$$y''_{cp} = \frac{F+R}{R+1} \cdot x''_{cp} - \frac{F-1}{R+1} \cdot x_W; \quad (2.17)$$

$$y''_{cp} = \frac{3,4+2,52}{2,52+1} \cdot 0,175 - \frac{3,4-1}{2,52+1} \cdot 0,05 = 0,26.$$

Середня молярна маса парів:

– у верхній частині колони:

$$M'_{cp} = y'_{cp} \cdot M_{лк} + (1 - y'_{cp}) \cdot M_{тлк}; \quad (2.18)$$

$$M'_{cp} = 0,69 \cdot 78 + (1 - 0,69) \cdot 92 = 82 \text{ кг/кмоль};$$

– у нижній частині колони:

$$M''_{cp} = y''_{cp} \cdot M_{лк} + (1 - y''_{cp}) \cdot M_{тлк}; \quad (2.19)$$

$$M_{cp}'' = 0,26 \cdot 78 + (1 - 0,26) \cdot 92 = 88 \text{ кг/кмоль.}$$

Середні густини парів визначаються за рівнянням Клайперона:

– у верхній частині колони:

$$\rho_y' = \frac{M_{cp}' \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + t_y')} ; \quad (2.20)$$

– у нижній частині колони:

$$\rho_y'' = \frac{M_{cp}'' \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + t_y'')} ; \quad (2.21)$$

де  $t_y' = 92^\circ\text{C}$  – середня температура пари у верхній частині колони в залежності від концентрації  $y_{cp}'$ ;

$t_y'' = 103^\circ\text{C}$  – середня температура пара в нижній частині колони в залежності від концентрації  $y_{cp}''$ .

$$\rho_y' = \frac{82 \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + 92)} = 2,74 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_y'' = \frac{88 \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + 103)} = 2,85 \text{ кг/м}^3.$$

Середні густини рідини знаходяться за правилом адитивності:

– у верхній частині колони

$$\rho_x' = x_{cp}' \cdot \rho_{лк}' + (1 - x_{cp}') \cdot \rho_{тлк}' ; \quad (2.22)$$

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
						21
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\rho'_x = 0,6 \cdot 805 + (1 - 0,6) \cdot 800 = 803 \text{ кг/м}^3;$$

– у нижній частині колони

$$\rho''_x = x''_{cp} \cdot \rho''_{лк} + (1 - x''_{cp}) \cdot \rho''_{млк}; \quad (2.23)$$

$$\rho''_x = 0,175 \cdot 790 + (1 - 0,175) \cdot 780 = 782 \text{ кг/м}^3.$$

Теплове навантаження кип'ятильника дорівнює:

$$Q_W = G_V \cdot r_w = G_V \cdot (r_{лк} \cdot \bar{x}_w + r_{млк} (1 - \bar{x}_w)); \quad (2.26)$$

де  $r_{лк} = 385$  кДж/кг,  $r_{млк} = 388$  кДж/кг – питома теплота випаровування легколеткого і труднолеткого компонентів при усереднених температурах [10].

$$Q_W = \frac{5625}{3600} \cdot (385 \cdot 0,043 + 388 \cdot (1 - 0,043)) = 606 \text{ кВт.}$$

Витрата гріючої пари у кип'ятильнику становить:

$$G_{г.п.} = Q_W / r_{г.п.}, \quad (2.27)$$

де  $r_{г.п.} = 2260$  кДж/кг – питома теплота випаровування гріючої пари [10].

$$G_{г.п.} = \frac{606}{2260} = 0,27 \text{ кг/с.}$$

Теплове навантаження дефлегматора дорівнює:

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
						22
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Q_D = G_V \cdot r_d = G_V \cdot \left( r_{лк} \cdot \bar{x}_D + r_{млк} \cdot (1 - \bar{x}_D) \right); \quad (2.28)$$

$$Q_D = \frac{5625}{3600} \cdot (385 \cdot 0,884 + 388 \cdot (1 - 0,884)) = 602 \text{ кВт.}$$

Витрата води в дефлегматорі визначається за формулою:

$$G_e = \frac{Q_D}{C_e \cdot (t_{кв} - t_{нв})}, \quad (2.29)$$

де  $C_e = 4,2$  кДж/кг·К – питома теплоємність охолоджуючої води [10].

$$G_e = \frac{602}{4,2 \cdot 20} = 7,17 \text{ кг/с.}$$

## 2.2 Конструктивні розрахунки

Конструктивні розрахунки виконуємо у відповідності до методики, що представлена у джерелі [9].

Знаходимо граничну і робочу швидкості парів у верхній і нижній частинах колони:

$$\omega' = (0,7 \div 0,9) \cdot \omega_{np}; \quad (2.30)$$

де  $\omega_{np}$  – швидкість газу, що відповідає точці захлинання.

$$\omega_{np} = c \cdot \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_n}{\rho_n}}; \quad (2.31)$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		23

де  $c$  – коефіцієнт, який вибирається у залежності від типу тарілок і відстані між ними. Для ситчатих тарілок при відстані між тарілками  $H = 400$  мм  $c = 0,045$ .

Гранична швидкість парів для верхньої частини колони:

$$\omega'_{np} = 0,045 \cdot \sqrt{\frac{803 - 2,74}{2,74}} = 0,77 \text{ м/с.}$$

Гранична швидкість парів для нижньої частини колони:

$$\omega''_{np} = 0,045 \cdot \sqrt{\frac{782 - 2,85}{2,85}} = 0,74 \text{ м/с.}$$

Робоча швидкість парів для верхньої частини колони:

$$\omega' = 0,9 \cdot 0,77 = 0,7 \text{ м/с.}$$

Робоча швидкість парів для нижньої частини колони:

$$\omega'' = 0,9 \cdot 0,74 = 0,67 \text{ м/с.}$$

Відношення масових витрат рідкої і парової фаз становить:

– у верхній частині колони

$$\left(\frac{L}{G}\right)' = \frac{G_R}{G_V} = \frac{R}{R+1}; \quad (2.32)$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)' = \frac{2,52}{2,52+1} = 0,72;$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		24



– у нижній частині колони

$$\left(\frac{L}{G}\right)'' = \frac{G_R + G_f}{G_V} = \frac{R + F}{R + 1}; \quad (2.33)$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)'' = \frac{2,52 + 3,4}{2,52 + 1} = 1,68.$$

Об'ємна витрата парів у верхній частині колони:

$$V' = \frac{G_V}{\rho_y'}; \quad (2.34)$$

$$V' = \frac{5625}{3600 \cdot 2,74} = 0,57 \text{ м}^3/\text{с};$$

Об'ємна витрата парів у нижній частині колони:

$$V'' = \frac{G_V}{\rho_y''}; \quad (2.35)$$

$$V'' = \frac{5625}{3600 \cdot 2,85} = 0,55 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Розраховуємо діаметр колони:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega}}; \quad (2.36)$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		25

– для верхньої частини колони

$$D' = \sqrt{\frac{0,57}{0,785 \cdot 0,7}} = 1,0 \text{ м};$$

– для нижньої частини колони

$$D'' = \sqrt{\frac{0,55}{0,785 \cdot 0,67}} = 1,0 \text{ м}.$$

Приймаємо ректифікаційну колону діаметром 1000 мм.

У результаті побудови горизонтальних і вертикальних відрізків між робочою та рівноважною лініями (див. Додаток А) отримуємо таке число теоретичних тарілок: у верхній частині  $N'_m = 8$  шт.; у нижній частині  $N''_m = 6$  шт.

Число дійсних тарілок можна визначити за допомогою к.к.д. тарілки:

$$N_\partial = N_m / \eta; \quad (2.37)$$

де  $\eta = 0,5$  – середній к.к.д. ситчатої тарілки [11].

Отже, число практичних тарілок у верхній частині колони дорівнює:

$$N_\partial = 8 / 0,5 = 16 \text{ шт.}$$

Число практичних тарілок у нижній частині колони:

$$N_\partial = 6 / 0,5 = 12 \text{ шт.}$$

Висота тарільчастої частини колони дорівнює:

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		26

$$H_T = (N_D - 1) \cdot H, \quad (2.38)$$

де  $N_D = 12 + 16 = 28$  шт. – загальна кількість реальних тарілок у колоні;  
 $H = 400$  мм – відстань між тарілками.

$$H_T = (28 - 1) \cdot 400 = 10800 \text{ мм.}$$

Діаметр патрубк визначається за формулою [11]:

$$D = \sqrt{\frac{G}{\rho \cdot 3600 \cdot 0,785 \cdot \omega}}; \quad (2.39)$$

де  $\omega$  – швидкість пари або рідини, м/с.

Швидкість пари приймається в межах 15–20 м/с, а швидкість рідини 0,5–2 м/с [9].

Діаметри патрубків для входу і виходу парів:

$$d_V = \sqrt{\frac{5625}{3600 \cdot 2,8 \cdot 0,785 \cdot 20}} = 0,189 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметри патрубків  $d_V = 200$  мм.

Діаметр патрубка для входу флегми:

$$d_R = \sqrt{\frac{4027}{3600 \cdot 800 \cdot 0,785 \cdot 1,0}} = 0,042 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр патрубка  $d_R = 50$  мм.

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		27

Діаметр патрубків для входу вихідної суміші:

$$d_F = \sqrt{\frac{6000}{3600 \cdot 785 \cdot 0,785 \cdot 1,0}} = 0,052 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр патрубків  $d_F = 60$  мм.

Діаметр патрубків для виходу кубового залишку:

$$d_W = \sqrt{\frac{4402}{3600 \cdot 780 \cdot 0,785 \cdot 0,7}} = 0,053 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр патрубків  $d_W = 60$  мм.

### 2.3 Гідрравлічні розрахунки

Гідрравлічний розрахунок проводимо у відповідності до методики, що представлена у джерелі [11].

Гідрравлічний опір ситчатої тарілки дорівнює:

$$\Delta p_{\text{заг}} = \Delta p_{\text{сух}} + \Delta p_{\sigma} + \Delta p_{\text{пр}}, \quad (2.40)$$

де  $\Delta p_{\text{сух}}$  – гідрравлічний опір сухої тарілки, Па;

$\Delta p_{\sigma}$  – опір, зумовлений силами поверхневого натягу, Па;

$\Delta p_{\text{пр}}$  – опір парорідинного шару, Па.

Оскільки відгінна частина колони більш навантажена за рідиною, то гідрравлічний розрахунок проводимо для тарілки, що розташована у нижній частині апарату.

Гідравлічний опір сухої тарілки становить:

$$\Delta p_{\text{сyx}} = \xi \cdot \frac{\rho_n \cdot \omega_{\text{отв}}^2}{2}, \quad (2.41)$$

де  $\xi = 1,82$  – коефіцієнт опору незрошуваних ситчатих тарілок із вільним перетином 5–10 % [11];

$\omega_{\text{отв}}$  – швидкість пари в отворах тарілки.

Швидкість пари в отворах тарілки:

$$\omega_{\text{отв}} = \frac{w}{F}, \quad (2.42)$$

де  $w$  – дійсна робоча швидкість парів, м/с;

$F = 5,14$  % – вільний перетин тарілки [11].

$$\omega_{\text{отв}} = \frac{0,67}{0,0514} = 13 \text{ м/с};$$

$$\Delta p_{\text{сyx}} = 1,82 \cdot \frac{2,85 \cdot 13^2}{2} = 438 \text{ Па.}$$

Опір, зумовлений силами поверхневого натягу:

$$\Delta p_{\sigma} = \frac{4 \cdot \sigma}{d_0}, \quad (2.43)$$

де  $\sigma = 2 \cdot 10^2$  Н/м – поверхневий натяг рідини при середній температурі [10];

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
						29
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$d_0 = 0,004$  м – діаметр отворів тарілки [11].

$$\Delta p_\sigma = \frac{4 \cdot 2 \cdot 10^{-2}}{0,004} = 20 \text{ Па.}$$

Опір парорідинного шару на тарілці:

$$\Delta p_{np} = 1,3 \cdot h_{np} \cdot \rho_{np} \cdot g \cdot k, \quad (2.44)$$

де  $h_{np}$  – висота парорідинного шару, м.

$$h_{np} = h_n + \Delta h, \text{ м} \quad (2.45)$$

де  $h_n$  – висота зливної перегородки, м;

$\Delta h$  – висота шару над зливною перегородкою, м.

$$\Delta h = \left( \frac{V_p}{1,85 \cdot \Pi \cdot k} \right)^{\frac{2}{3}}, \text{ м} \quad (2.46)$$

де  $V_p$  – об'ємна витрата рідини, м<sup>3</sup>/с;

$\Pi$  – периметр зливної перегородки, м;

$k = \rho_{np} / \rho_p$  – відношення густини парорідинного шару (піни) до густини рідини,  $k \approx 0,5$  [11].

Об'ємна витрата рідини:

$$V_p = \left( \frac{G_D \cdot R}{M_D} + \frac{G_F}{M_F} \right) \cdot \frac{M_{cp}}{\rho_p}; \quad (2.47)$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
						30
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$V_p = \left( \frac{1598 \cdot 2,52}{79,4} + \frac{6000}{87,8} \right) \cdot \frac{88}{3600 \cdot 780} = 3,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Висота шару над зливною перегородкою:

$$\Delta h = \left( \frac{3,7 \cdot 10^{-3}}{1,85 \cdot 0,73 \cdot 0,5} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,03 \text{ м}.$$

Висота пароріднинного шару:

$$h_{np} = 0,04 + 0,03 = 0,07 \text{ м}.$$

Опір пароріднинного шару на тарілці:

$$\Delta p_{np} = 1,3 \cdot 0,07 \cdot 780 \cdot 9,81 \cdot 0,5 = 348 \text{ Па}.$$

Загальний гідравлічний опір тарілки:

$$\Delta p = 438 + 20 + 348 = 806 \text{ Па}.$$

Умова нормальної роботи тарілок:

$$H_m > 1,8 \cdot \frac{\Delta p}{\rho_p \cdot g}, \quad (2.48)$$

де  $H_m$  – відстань між тарілками, м.

$$1,8 \cdot \frac{\Delta p}{\rho_p \cdot g} = 1,8 \cdot \frac{806}{780 \cdot 9,81} = 0,19.$$

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		31

Оскільки  $0,4 > 0,19$  – це підтверджує правильність прийнятої раніше відстані між тарілками  $H_m = 400$  мм.

Мінімальна швидкість пари в отворах, достатня для того, щоб ситчаста тарілка працювала усіма отворами:

$$w_{o \text{ .min}} = 0,67 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \rho_p \cdot h_{np}}{\xi \cdot \rho_n}}; \quad (2.49)$$

$$w_{o \text{ .min}} = 0,67 \cdot \sqrt{\frac{9,81 \cdot 780 \cdot 0,07}{1,82 \cdot 2,85}} = 6,8 \text{ м/с};$$

$13 \text{ м/с} > 6,8 \text{ м/с}$  – це означає, що тарілка працюватиме усіма отворами.

Загальний гідравлічний опір колони:

$$\Delta p_k = N_o \cdot \Delta p; \quad (2.50)$$

$$\Delta p_k = 28 \cdot 806 = 22568 \text{ Па.}$$

## 2.4 Розрахунок та вибір допоміжного обладнання

### Підбір насосу для подачі вихідної суміші [12].

Для всмоктуючого і напірного трубопроводів приймаємо однакову швидкість плинину рідини, яка дорівнює  $w = 1,5$  м/с.

Діаметр трубопроводу визначаємо за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}; \quad (2.51)$$

де  $V$  – об'ємна витрата суміші, що подається в колону,  $\text{м}^3/\text{с}$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		32



$$V = \frac{6000}{3600 \cdot 800} = 2,08 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$d = \sqrt{\frac{2,08 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 1,5}} = 0,042 \text{ м.}$$

Приймаємо стандартизований діаметр трубопроводу 50 мм.

Визначаємо критерій Рейнольдса для рідини у трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_p}{\mu}, \quad (2.52)$$

$$\text{Re} = \frac{1,5 \cdot 0,05 \cdot 800}{2,8 \cdot 10^{-4}} = 214286 \text{ – тобто режим турбулентний.}$$

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

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,05} = 0,004;$$

$$\frac{1}{e} = 250; 560 \cdot \frac{1}{e} = 140000; 10 \cdot \frac{1}{e} = 2500; \text{Re} > 560 \cdot \frac{1}{e}.$$

Для зони, що є автомодельною по відношенню до Re:

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}; \quad (2.53)$$

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

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		33

Визначаємо суму коефіцієнтів місцевих опорів окремо для всмоктуючої та напірної 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 напірної лінії: 1) вентиль прямоточний  $\xi_1 = 0,65$ ; 2) 3 коліна з кутом  $90^\circ$   $\xi_2 = 3 \cdot 1,1 = 3,3$ ; 3) 1 кожухотрубний теплообмінник  $\xi_3 = 3,05$ ; 4) вихід з труби  $\xi_4 = 1$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4;$$

$$\Sigma \xi = 0,65 + 3,3 + 3,05 + 1 = 8.$$

Втрати напору у всмоктуючій лінії знаходимо за рівнянням:

$$h_{П.ВС.} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (2.54)$$

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

$$h_{П.ВС.} = \left( 0,028 \cdot \frac{3}{0,05} + 2,7 \right) \cdot \frac{1,5^2}{2 \cdot 9,81} = 0,5 \text{ м.}$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		34

Втрата напору в напірній лінії:

$$h_{\text{П.НАП.}} = \left( 0,028 \cdot \frac{7}{0,05} + 8 \right) \cdot \frac{1,5^2}{2 \cdot 9,81} = 1,37 \text{ м.}$$

Загальні втрати напору:

$$h_{\text{П}} = h_{\text{П.ВС.}} + h_{\text{П.НАП.}}; \quad (2.55)$$

$$h_{\text{П}} = 0,5 + 1,37 = 1,87 \text{ м.}$$

Напір насосу дорівнює:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_{\text{ж}} \cdot g} + H_{\text{Г}} + h_{\text{П}}, \quad (2.56)$$

де  $P_2 - P_1$  – різниця тисків у апараті та в ємності, із якої подається рідина. У нашому випадку, враховуючи, що тиск у колоні також атмосферний, ця різниця дорівнює 0;

$H_{\text{Г}}$  – геометрична висота піднімання рідини, м.

$$H = 0 + 8 + 1,87 = 9,87 \text{ м.}$$

Визначаємо корисну потужність насосу:

$$N_{\text{П}} = \rho_p \cdot g \cdot V \cdot H; \quad (2.57)$$

$$N_{\text{П}} = 800 \cdot 9,81 \cdot 2,08 \cdot 10^{-3} \cdot 9,87 = 161 \text{ Вт.}$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		35

Потужність, яку повинен розвинути електродвигун насосу на вихідному валу при встановленому режимі роботи:

$$N = \frac{N_{\Pi}}{\eta_{\text{пер}} \cdot \eta_n}, \quad (2.58)$$

де  $\eta_n = 0,6$  – коефіцієнт корисної дії насосу;

$\eta_{\text{пер}} = 1$  – коефіцієнт корисної дії передачі від електродвигуна до насоса.

$$N = \frac{161}{1 \cdot 0,6} = 268 \text{ Вт.}$$

Вибираємо відцентровий насос марки НМШ 8-25-8,5/25-5 із наступними параметрами: об'ємна подача насосу 8,5 м<sup>3</sup>/год.; напір насосу 25 м; потужність, яку споживає насос 7,5 кВт; частота обертів 1450 об/хв.

**Підбір ємності для вихідної суміші [11].** Ємність для зберігання вихідної суміші розраховуємо, виходячи з 6–8 годинного резерву робочого часу, а також з урахуванням коефіцієнту заповнення  $\psi = 0,8 \dots 0,85$ .

Приймаємо  $\psi = 0,85$ .

Розрахунковий об'єм ємності:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}; \quad (2.59)$$

$$V_{EP} = \frac{6000 \cdot 6}{0,85 \cdot 800} = 52,9 \text{ м}^3.$$

Задамося діаметром ємності  $D = 3,6$  м.

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		36

У такому випадку висота ємності буде дорівнювати:

$$H = \frac{V_{EP}}{0,785 \cdot D^2}; \quad (2.60)$$

$$H = \frac{52,9}{0,785 \cdot 3,6^2} = 5,2 \text{ м.}$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		37

### 3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність

#### 3.1 Розрахунок товщини стінки корпусу апарату [13]

Основні розрахункові параметри:

- усереднена температура середовища становить 105°C;
- робоча температура стінки дорівнює 100°C;
- робочий тиск у колоні 0,1 МПа.

Розрахунковий тиск для апаратів з робочим надлишковим тиском  $P > 0,07$  МПа відповідно до рекомендацій наведених у [13] складе:

$$P_p = 1,1 \cdot p = 1,1 \cdot 0,1 = 0,11 \text{ МПа.} \quad (3.1)$$

За [13] приймаємо стандартне значення 0,25 МПа.

Пробний тиск при гідравлічному випробуванні згідно [13] складе:

$$P_{np} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot P_p \cdot [\sigma]_{20} / [\sigma] \\ P_p + 0,3 \end{array} \right\}, \quad (3.2)$$

де  $[\sigma]_{20}, [\sigma]$  – допустиме напруження для сталі 09Г2С при температурі 20°C і температурі 100°C відповідно [13]:  $[\sigma]_{20} = 160$  МПа;  $[\sigma] = 152$  МПа.

$$P_{np} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot 0,1 \cdot 160 / 152 \\ 0,1 + 0,3 \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,16 \\ 0,4 \end{array} \right\} = 0,4 \text{ МПа.}$$

Розрахункове значення для модуля поздовжньої пружності для сталі 09Г2С [13]:  $E_{20} = 2 \cdot 10^5$  МПа;  $E = 2 \cdot 10^5$  МПа.

Коефіцієнт міцності зварного шва, згідно [13], складе:  $\varphi = 0,9$ .

Товщина стінки циліндричної обичайки, навантаженої внутрішнім надлишковим тиском [13]:

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		38

$$S_k = \frac{P_{np} \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \phi_p - P_{np}}; \quad (3.3)$$

$$S_k = \frac{0,4 \cdot 1}{2 \cdot 152 \cdot 0,9 - 0,4} = 1,46 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Виконавча товщина стінки [13]:

$$S \geq S_k + C, \quad (3.4)$$

де  $C$  – загальне значення прибавки, яка складається зі складових:

$$C = C_1 + C_2 + C_3, \quad (3.5)$$

де  $C_1$  – прибавка на корозію і ерозію, при проникності  $\Pi = 0,1$  мм/рік та терміні служби колони  $\tau = 15$  років складе

$$C_1 = \Pi \cdot \tau = 0,1 \cdot 15 = 1,5 \text{ мм};$$

$C_2$  – прибавка на мінусове значення граничного відхилення по товщині листа, мм;

$C_3$  – технологічна прибавка, яка враховується в залежності від прийнятої технології виготовлення і не включає в себе округлення розрахункової товщини елемента до номінальної товщини за стандартом, мм.

Прибавки  $C_2$  і  $C_3$  враховуються лише в тому випадку, коли сума їх перевищує 5 % від розрахункової товщини обичайки.

Отже:

$$C = 1,5 + 0 + 0 = 1,5 \text{ мм};$$

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		39

$$S = 0,00146 + 0,0015 = 0,003 \text{ м.}$$

Приймаємо  $S = 4 \text{ мм}$ .

Допустимий внутрішній надлишковий тиск:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \phi_p \cdot (S - C)}{D + (S - C)}; \quad (3.6)$$

$$[p] = \frac{2 \cdot 152 \cdot 0,9 \cdot (0,004 - 0,0015)}{1 + (0,004 - 0,0015)} = 0,68 \text{ МПа.}$$

Умова міцності виконується:

$$P < [P]: 0,4 \text{ МПа} < 0,68 \text{ МПа.}$$

### 3.2 Розрахунок товщини стінки кришки (днища) апарату

Номінальна товщина стінки еліптичної кришки (днища), навантаженої внутрішнім надлишковим тиском:

$$S_R = \frac{P_p \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \phi - 0,5 \cdot P_p}, \quad (3.7)$$

де  $R = D$  (для еліптичних днищ) – радіус кривизни в вершині днища [13].

$$S_R = \frac{0,4 \cdot 1,0}{2 \cdot 152 \cdot 0,9 - 0,5 \cdot 0,4} = 1,47 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		40



Загальне значення прибавки до товщини стінки кришки (днища) складе:

$$C = 1,5 + 0 + 0 = 1,5 \text{ мм};$$

$$S = 0,00147 + 0,0015 = 0,003 \text{ м.}$$

Також приймаємо  $S = 4 \text{ мм}$ .

### 3.3 Розрахунок опори апарату

Визначимо навантаження порожнього апарату на опору за формулою:

$$Q_{an} = M_{an} \cdot g, \quad (3.8)$$

де  $M_{an}$  – маса порожнього апарату;

$$M_{an} = M_{\kappa} + M_{\text{дн}} + M_{\text{кр}} + M_{\text{т}} + M_{\text{фл}}, \quad (3.9)$$

де  $M_{\kappa}$ ,  $M_{\text{дн}}$ ,  $M_{\text{кр}}$ ,  $M_{\text{т}}$ ,  $M_{\text{фл}}$  – відповідно маси корпусу, днища, кришки, тарілок, фланців і арматури, кг.

Маса циліндричного корпусу становить:

$$M_{\kappa} = H \cdot \pi \cdot D \cdot s \cdot \rho, \quad (3.10)$$

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

$$M_{\kappa} = 10,8 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 0,004 \cdot 7800 = 1058 \text{ кг.}$$

Маса еліптичної кришки (днища):

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
						41
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\text{дн}} = M_{\text{кр}} = F \cdot s \cdot \rho, \quad (3.11)$$

де  $F=1,16 \text{ м}^2$  – площа внутрішньої поверхні еліптичної кришки (днища).

$$M_{\text{дн}} = M_{\text{кр}} = 1,16 \cdot 0,004 \cdot 7800 = 36,2 \text{ кг.}$$

Маса контактних тарілок:

$$M_m = N_{\text{д}} \cdot m_m, \quad (3.12)$$

де  $m_m = 41,8 \text{ кг}$  – маса ситчастої тарілки діаметром 1000 мм.

$$M_m = 28 \cdot 41,8 = 1170,4 \text{ кг.}$$

Сумарну масу фланців і арматури приймемо рівною  $M_{\text{фл}} = 1000 \text{ кг}$ .

Таким чином, маса порожнього апарату складе:

$$M_{\text{ан}} = 1058 + 2 \cdot 36,2 + 1170,4 + 1000 = 3300,8 \text{ кг.}$$

Вага порожнього апарата дорівнюватиме:

$$Q_{\text{ан}} = 3300,8 \cdot 9,81 = 32380 \text{ Н.}$$

Навантаження апарату на опору під час гідравлічних випробувань:

$$Q_{\text{ан}}^{\text{с}} = (M_{\text{ан}} + M_{\text{е}}) \cdot g, \quad (3.13)$$

де  $M_{\text{е}}$  – маса залитої в апарат води, кг.

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
						42
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\epsilon} = V \cdot \rho_{\epsilon}, \quad (3.14)$$

де  $V$  – об'єм апарату:

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H = \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} \cdot 10,8 = 8,478 \text{ м}^3;$$

$$M_{\epsilon} = 8,478 \cdot 1000 = 8478 \text{ кг.}$$

Вага апарату під час його гідравлічних випробувань:

$$Q_{an}^{\epsilon} = (32380 + 8478) \cdot 9,81 = 400817 \text{ Н.}$$

Вибираємо за [13] циліндричну опору третього типу: 3-1000-30-15-350.

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		43

## 4 Монтаж та ремонт апарату

### 4.1 Монтаж апарату [14]

Монтажні роботи є складовою частиною загального процесу будівництва підприємства або одного із його об'єктів. Монтаж обладнання проводиться як при будівництві нових об'єктів, так і при реконструкції та ремонті діючих. В останніх двох випадках монтажу передує демонтаж обладнання.

Монтажні майданчики оснащують необхідними вантажопідйомними механізмами і пристосуваннями. Це найчастіше канати, троси, стропи, блоки й поліспасти, різні талі і лебідки, а також вантажопідйомні машини і механізми. Такелажні засоби повинні бути простими у виготовленні, зручними для транспортування, монтажу, перестановки і демонтажу і, звичайно ж, безпечними в роботі.

Монтаж важкого обладнання на фундамент можна здійснювати в повністю зібраному вигляді або великими блоками шляхом нарощування або підрощування.

Тарілчаста ректифікаційна колона поставляється на монтажний майданчик у максимально готовому вигляді (якщо перевезення повністю зібраного апарату є неможливим, його поставляють максимально великими блоками). Завод-виготовлювач до відправки на монтажну ділянку повинен зробити контрольну збірку апарату, нанести необхідні складальні осі та контрольні риси.

Монтаж колонного апарату проводиться безпосередньо за монтажні штуцери, які розташовані вище центру ваги, за допомогою вантажопідйомних механізмів (стрілові крани, щогли тощо). Стропування апарату проводиться за верхню частину, тому для посилення в горизонтальному положенні його обв'язують кутками або швелерами.

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		44

Ступінь складності встановлення колонного апарату в проектне положення визначається його габаритними розмірами (висотою і діаметром), масою, а також висотою фундаменту.

Застосовують два основних способи підйому: ковзання і поворот навколо шарніру. Проектований колонний апарат має велику масу і його підйом забезпечується двома щоглами, що дозволяє легко встановлювати апарат на фундамент. Перед підйомом апарат розташовують якомога ближче до фундаменту. Щогли встановлюють по обидва боки від фундаменту вертикально або злегка похило. Необхідність нахилу щогл визначається довжиною самого апарату, його розташуванням по відношенню до фундаменту, розташуванням і висотою щогл, прийнятою схемою стропування.

Переконавшись у надійності такелажного оснащення і перевіривши роботу всіх механізмів, починають підйом апарату. До опорної частини апарату прикріплюють один або два відтяжних троси, вільні кінці яких намотують на барабани лебідок і апарат починають пересувати. При цьому його опорна частина ковзає по заздалегідь підготовленій підставці – на візках або металевих листах. Після відриву від землі апарат встановлюють вертикально, потім піднімають трохи вище фундаменту і плавно опускають на анкерні болти. Далі контролюють відхилення апарату від вертикальності і затягують анкерні болти.

Колонні апарати вивіряють на фундаменті особливо ретельно, оскільки навіть незначне його відхилення від строго вертикального положення може призвести до помітної втрати стійкості і порушення нормальної роботи внутрішніх контактних пристроїв (у нашому випадку клапанних тарілок). Для тарілчастої ректифікаційної колони максимально допустиме відхилення від вертикальності становить 0,1 % висоти апарату, але не більше 15 мм.

Кріплення апарату до фундаменту відбувається за допомогою фундаментних болтів, а також підлягає підливу бетонною сумішшю.

Після встановлення апарату на фундамент перевіряють, чи відповідає його розташування у просторі проектному плану, а відхилення від

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		45

вертикальності або горизонтальності знаходиться в допустимих межах. Допуск на точність монтажу зазвичай встановлюють на підставі паспорта обладнання та вимогам монтажних інструкцій. Перш за все, доводять до проектної висоти позначку опорної частини обладнання. Фактичний рівень опорної поверхні, як і горизонтальність апарату, визначають по нівеліру.

При підготовці колонного апарату до ремонту тиск усередині колони доводять до атмосферного, видаляють із апарату вуглеводні, пропарюють колону водяною парою. Водяна пара витісняє залишки токсичних сполук, щоб концентрація шкідливих і горючих речовин не перевищувала гранично допустимих концентрацій (ГДК). Після пропарювання колону промивають водою. У деяких випадках пропарку і промивку чередують і проводять по кілька разів.

Промивання колони водою сприяє також більш швидкому її охолодженню. Не можна приступати до ремонтних робіт, якщо температура промивної води перевищує 50°C.

Пропарену і промиту колону від'єднують від усіх апаратів і комунікацій глухими заглушками, що встановлюються на фланцевих з'єднаннях штуцерів. Установку кожної заглушки і подальше її зняття реєструють в спеціальному журналі.

#### **4.2 Ремонт апарату [14, 15]**

Ремонт апарату починають із його відкриття, яке необхідно проводити, суворо дотримуючись наступних правил. Спочатку відкривають верхній люк, причому перед цим в апарат протягом деякого часу подають водяну пару, щоб уникнути можливого підсосу повітря, у результаті якого може утворитися вибухонебезпечна суміш. Далі послідовно (згори вниз) відкривають інші люки. Категорично забороняється одночасно відкривати верхній і нижній люки. Не можна також відкривати спочатку нижній, а потім верхній люк, оскільки внаслідок різниці температур відбувається сильний

					<i>XI.P.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		46

приток повітря в колону, що може призвести до утворення вибухонебезпечної суміші.

Після відкриття люків колона деякий час провітрюється. Після закінчення провітрювання потрібно провести аналіз проб повітря, взятих із колони на різних висотних відмітках. До робіт всередині колони дозволяється приступати тільки тоді, коли аналіз покаже, що концентрація шкідливих газів у ній не перевищує гранично допустимих санітарних норм.

Далі необхідно виконати ретельний зовнішній і внутрішній огляди корпусу колони для виявлення можливих дефектів, які утворилися при експлуатації апарату (механічні пошкодження, тріщини, корозія тощо). За необхідності огляду всієї поверхні корпусу розбирають внутрішні пристрої або їх частину. Наприклад, для доступу до тарілок, на рівні яких люки відсутні, розбирають проходи на тарілках, що лежать вище.

Суцільнозварні колонні апарати при ремонті повністю не демонтуються. Демонтуються лише внутрішні пристрої колони.

За характером виявленого дефекту встановлюють спосіб ремонту корпусу. Нецільні зварні шви вирубують, зачищають і заварюють відповідним електродом. Вельми важливо правильне перекривання нового і старого швів.

Зношені штуцери і люки вирізають і замінюють новими із обов'язковим встановленням зміцнювальних кілець. Бажано, щоб кільця нових штуцерів мали дещо більший діаметр, аніж старі: це дозволяє приварювати їх в новому місці.

Під час кожного ремонту вимірюють фактичну товщину стінки корпусу експлуатованого апарату. Найбільш зношені ділянки корпусу колони вирізають, а на їх місце вставляють нову ділянку. Зварювання проводять у стик. Вирізання великих ділянок корпусу може призвести до послаблення перерізу і порушення стійкості. Тому до вирізання дефектної ділянки цю ділянку зміцнюють спеціальними стійками.

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		47

Дуже часто, зважаючи на трудомісткість таких замін ділянок корпусу, визнають доцільним повну заміну корпусу колони. Демонтаж зношеної колони виконують у зворотному порядку (порівнюючи з монтажем).

Після ремонту ректифікаційну колону піддають гідравлічним або пневматичним випробуванням.

					ХІ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		48



## 5 Охорона праці

**Надання першої допомоги людині при ураженні її електричним струмом [16, 17].**

Перша допомога при ураженні електричним струмом повинна бути надана якомога швидше: найпростіші прийоми долікарської допомоги збільшать шанси на порятунок потерпілого на 30 %. При цьому діяти необхідно у певній послідовності, щоб не тільки врятувати життя працівника, а й зберегти своє власне. Як це зробити – розповімо далі.

При ураженні електричним струмом смерть часто буває клінічною, тому ніколи не слід відмовлятися від надання допомоги потерпілому і вважати його мертвим через відсутність дихання, серцебиття, пульсу. Вирішити питання про доцільність або непотрібність вжиття заходів щодо пожвавлення і винести висновок про смерть працівника має право тільки лікар.

В Україні працівники, що займаються виконанням спеціальних видів робіт на електроустановках, згідно з Правилами безпечної експлуатації електроустановок споживачів (НПАОП 40.1-1.21-98), затвердженим наказом Держнаглядохоронпраці України від 09.01.1998 № 4 повинні бути спеціально навчені безпечному виконанню таких робіт.

Працівники, які обслуговують електроустановки і мають II–III групи з електробезпеки, повинні вміти надавати на практиці першу допомогу постраждалим при нещасних випадках (зокрема, робити штучне дихання і зовнішній масаж серця різними способами). Ті, хто має IV–V групи з електробезпеки до того ж повинні вміти організовувати безпечне проведення робіт і навчати працівників інших груп правилам техніки безпеки і надання першої допомоги потерпілим від електричного струму.

У місцях постійного чергування персоналу повинні бути:

- аптечка з необхідними пристосуваннями і засобами для надання першої медичної допомоги;

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		49

- плакати, присвячені правилам надання першої допомоги, виконання штучного дихання і зовнішнього масажу серця.

Вони повинні бути вивішені на видних місцях.

При ураженні електричним струмом насамперед потрібно усунути контакт особи зі струмоведучими частинами обладнання. Потерпілий не може сам розірвати контакт із провідником, адже у більшості випадків у нього відбувається судома м'язів. Отже, необхідно якомога швидше відключити ту частину електрообладнання, якої торкається людина.

Не забудьте, що вологі або мокрі предмети є гарними провідниками струму. Тому одяг і поверхня предметів, якими здійснюють таке усунення контакту, повинні бути абсолютно сухими. Усунути контакт працівника зі струмоведучими частинами або проводами електроустановок напругою до 1000 В можна за допомогою:

- палиці;
- дошки;
- шапки;
- сухих рукавичок;
- рукавів одягу;
- діелектричних рукавичок тощо.

Для усунення контакту потерпілого зі струмоведучими частинами під напругою понад 1000 В слід одягнути діелектричні рукавички, боти і діяти штангою або ізолюючими кліщами, розрахованими на відповідну напругу.

Провідники слід перерізати інструментом з ізолюючими ручками або перерубувати сокирою з дерев'яним сухим сокирищем.

Постраждалого можна відтягнути за одяг подалі від місця ураження, не торкаючись при цьому відкритих частин його тіла і розташованих поруч металевих предметів. Уникайте контакту з його взуттям. Воно може бути вологим, а значить, добре проводити електричний струм. Найкращий варіант – надіти під час порятунку діелектричні рукавички. Їх можна обмотати сухим

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		50

одягом або натягнути на них рукава верхнього одягу. Якщо поруч є гумовий килимок або суха дошка, їх також використовують для того, щоб себе ізолювати.

Опинившись у безпечному місці, необхідно оцінити стан потерпілого і негайно почати надання першої допомоги. Виділяють три стани людини у залежності від дії електроструму на його організм:

1. Потерпілий в свідомості. Досить залишити його під наглядом у стані спокою, викликати медиків.
2. Потерпілий без свідомості, але дихає. Людину кладуть горизонтально, розстібають комір, пояс, послаблюють тісний одяг. До прибуття медичного персоналу можна спробувати привести людину до тями за допомогою нашатирного спирту.
3. У потерпілого переривчастий подих або він взагалі не дихає. Необхідно проводити непрямий масаж серця і штучне дихання до приїзду лікарів швидкої допомоги.

**Пам'ятайте!** Постраждалого слід переносити в інше місце тільки в тих випадках, коли йому та особі, послугами якої він користується, продовжує загрозувати небезпека або коли надання допомоги на місці неможливе. Щоб не втрачати час, не слід роздягати потерпілого. При проведенні штучного дихання потерпілий необов'язково повинен перебувати у горизонтальному положенні. Якщо потерпілий знаходиться на висоті, необхідно перед спуском на землю зробити штучне дихання безпосередньо в люльці, на щоглі або на опорі.

Незалежно від ступеня ураження струмом потерпілий ще деякий час повинен перебувати під наглядом медичного персоналу. Не слід відправляти його додому або відразу допускати до роботи, адже дія електричного струму може проявитися через кілька годин і привести до тяжких наслідків.

					XI.P.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		51



