

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра «Хімічної інженерії»

## **КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА БАКАЛАВРА**

**зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»**

**освітня програма «Комп'ютерний інжиніринг обладнання хімічних  
виробництв»**

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

Виконав:

студент групи ХМ-71

Буглак Андрій Миколайович

прізвище та ініціали

Залікова книжка

№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота бакалавра

захищена на засіданні ЕК

з оцінкою: \_\_\_\_\_

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Підпис голови**

(заступника голови) комісії

Керівник

ст. викл., к. т. н.

Скиданенко М.С.

СУМИ 2021

# 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 ХМ-71

Семестр 8

### ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Студенту Буглаку Андрію Миколайовичу

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

2. Вихідні дані:  $G_n = 1500$  кг/год,  $X_{и} = 22\%$ ,  $X_{д} = 94\%$ ,  $X_{к} = 2,5\%$ .

Розробити колону з ковпачковими тарілками

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

1) Технологічна схема - 1,0 арк.

2) Збірне креслення апарату – 1,0 арк.

3) Складальне креслення – 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 бакалавра:

Етапи і розділи курсового проектування	ТИЖНІ				
	1, 2	3, 4, 5, 6	7, 8, 9	10, 11, 12, 13	14
1 Вступ	X X				
2 Технологічна частина		X X X X			
3 Розрахункова частина			X X X		
4 Розробка креслень				X X X X	
5 Оформлення записки					X
6 Захист проекту					X

6. Дата видачі завдання

\_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

Керівник \_\_\_\_\_

ст. викл. Скиданенко М.С.

(підпис)

посада, прізвище

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 37 с., 9 рис., 3 табл., 2 додатки, 13 джерел.

Графічні матеріали: технологічна схема установки, складальне креслення колони, складальне креслення ковпачкової тарілки, складальне креслення опори колони – всього 3 аркуша формату А1.

Тема роботи: «Ректифікаційна установка у виробництві ацетону. Розробити тарілчасту ректифікаційну колону.»

Наведені теоретичні основи та особливості процесу ректифікації, виконані розрахунки матеріального і теплового балансів процесу, технологічні розрахунки апарата, визначені його розміри, гідравлічний опір, обґрунтований вибір матеріалу для виготовлення апарата, розраховане і вибране допоміжне обладнання.

Розрахунками на міцність і герметичність показана надійність роботи спроектованого апарата.

Ключові слова: АПАРАТ, УСТАНОВКА, АЦЕТОН-БЕНЗОЛ, КОЛОНА РЕКТИФІКАЦІЙНА, РОЗРАХУНОК, МОНТАЖ РЕМОНТ, ФЛАНЦЕВЕ З'ЄДАННЯ, ОПОРА.

## ЗМІСТ

<b>Вступ</b> .....	4
<b>1 Технологічна частина</b> .....	5
1.1 Опис технологічної схеми виробництва.....	5
1.2 Теоретичні основи процесу .....	6
1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструктивних матеріалів	7
<b>2 Технологічні розрахунки процесу і апарата</b> .....	10
2.1 Матеріальний та тепловий баланси процесу.....	10
2.2 Технологічні розрахунки.....	14
2.3 Конструктивні розрахунки.....	21
2.4 Гідравлічний опір апарата.....	22
2.5 Вибір допоміжного обладнання.....	24
<b>3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність</b> .....	26
3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки.....	26
3.2 Розрахунок фланцевого з'єднання.....	29
3.3 Розрахунок опори апарата.....	30
<b>4 Монтаж та ремонт апарата</b> .....	32
4.1 Монтаж розробленого апарата.....	32
4.2 Ремонт апарата.....	33
<b>5 Охорона праці</b> .....	35
<b>Список літератури</b> .....	37
<b>Додаток А</b>	
<b>Додаток Б</b>	

					<b>XI.A.00.00.00ПЗ</b>		
Изм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Разраб.	Буглак				Лит.	Лист	Листов
Провер.	Скиданенко				3	37	
Н. Контр.					<b>СумДУ ХМ – 71</b>		
Утв.							

## ВСТУП [1]

Ректифікація відома з початку ХІХ століття як один з найважливіших технологічних процесів головним чином спиртової та нафтової промисловості. В даний час ректифікацію все ширше застосовують в самих різних областях хімічної технології, де виділення компонентів у чистому вигляді має дуже важливе значення (в виробництвах органічного синтезу, ізоотопів, полімерів, напівпровідників і різних інших речовин високої чистоти).

Ректифікація один із способів розділення рідких сумішей, заснований на різному розподілі компонентів суміші між рідкою і паровою фазами. При ректифікації потоки пари і рідини, рухаючись в протилежних напрямках, багаторазово контактують один з одним в спеціальних пристроях, а частина пари (або рідини), що виходить з апарату, повертається назад після конденсації (для пари) або випаровування (для рідини). Такий протилежний рух контактних потоків супроводжується процесами теплообміну і масового обміну, які на кожному етапі контактного потоку до стану рівноваги; Ректифікація дозволяє досягти більшого видобутку і збагачення на потрібному компоненті або компонентної групі.

Ректифікаційні установки за принципом дії діляться на періодичні і безперервні. В установках безперервної дії колективна сира суміш надходить в колону і продукти поділу виводяться з неї безперервно. В установках періодичної дії розділяється суміш завантажують в куб одночасно і ректифікацію проводять до отримання продуктів заданого кінцевого складу.

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		4

# Технологічна частина

## 1.1 Опис технологічної схеми [1]

Принципова схема ректифікаційної установки представлена на рис. 1. Вихідну суміш з проміжної ємності 1 відцентровим насосом 2 подають в теплообмінник 3, де вона підігривається до температури кипіння. Нагріта суміш надходить на поділ в колону ректифікації 5 на тарілку живлення, де склад рідини дорівнює складу вихідної суміші  $x_F$ .

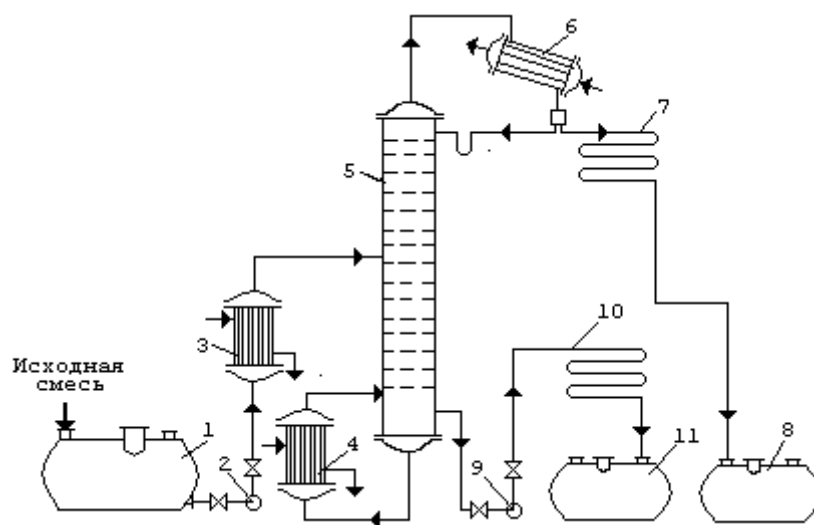


Рисунок 1.1 - Принципова схема ректифікаційної установки: 1 - ємність для вихідної суміші; 2, 9 - насоси; 3 - теплообмінник-підігривач; 4 - кип'ятильник; 5 - колона ректифікації; 6 - дефлегматор; 7 - холодильник дистиляту; 8 - ємність для збору дистиляту, 10 - холодильник кубової рідини; 11 - ємність для кубової рідини.

Стікаючи вниз по колоні, рідина взаємодіє з піднімається вгору паром, що утворюється при кипінні кубової рідини в кип'ятильник 4. Початковий склад пара приблизно дорівнює складу кубового залишку  $x_w$ , тобто збіднений легколетучим компонентом. В результаті масообміну з рідиною пар збагачується легколетучим компонентом. Для більш повного збагачення верхню частину колони зрошують відповідно до заданого флегмового числом рідиною (флегмою) складу  $x_p$ , яку отримують в дефлегматоре 6 шляхом конденсації пара, що виходить з колони. Частина конденсату

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

XI.A.00.00.00ПЗ

Лист

5

виводиться з дефлегматора у вигляді готового продукту поділу - дистиляту, який охолоджується в теплообміннику 7 і направляється в проміжну ємність 8.

З кубової частини колони насосом 9 безперервно виводиться кубова рідина - продукт, збагачений труднолетучими компонентами, який охолоджується в теплообміннику 10 і прямує в ємність 11.

Таким чином, в ректифікаційній колоні здійснюється безперервний нерівноважний процес поділу вихідної бінарної суміші на дистилат (з високим вмістом легколетучего компонента) і кубовий залишок (збагачений труднолетучим компонентом).

## 1.2 Теоретичні основи процесу [2]

Ректифікація - один із способів розділення рідких сумішей заснований на різному розподілі компонентів суміші між рідкою і паровою фазами. . В якості апаратів для проведення ректифікації використовуються ректифікаційні колони - що складаються з власне колони, де здійснюється протитечійне контактування пара і рідини, і пристроїв, в яких відбувається випаровування рідини і конденсація пари - куба і дефлегматора. Колона представляє собою вертикально стоячий порожній циліндр усередині якого встановлені так звані тарілки (контактні пристрої різної конструкції) або поміщений фігурний кусковий матеріал - насадка. Куб і дефлегматор - це звичайно кожухотрубні теплообмінники (знаходять застосування також трубчасті печі і куби-випаровувачі)

Призначення тарілок і насадки - поділ міжфазної поверхні і поліпшення контакту між рідиною і паром. Тарілки, як правило, забезпечуються пристроєм для переливу рідини. В якості насадки ректифікаційних колон зазвичай використовуються кільця діаметр яких дорівнює їх висоті.

Суміш, що розділяється безперервно подається в колону ректифікації, а з колони безперервно відводяться дві або більше число фракцій, збагачених одними компонентами і збіднених іншими. Повна колона складається з двох

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		6

секцій зміцнюючої і вичерпної. Вихідна суміш (зазвичай при температурі кипіння) подається в колону, де змішується з так званою витягнутою рідиною, що стікає по контактних пристроях (тарілкам або насадці) вичерпної секції протитечією до піднімаючого потоку пара. Досягаючи низу колони, рідина збагачується важколетучими компонентами. В низу рідина частково випаровується в результаті нагріву підвідних теплоносіїв, і пара знову надходить у вичерпну секцію. Пройшовши її, збагачений легколетучими компонентами, пар надходить в дефлегматор, де зазвичай повністю конденсується відповідним холодоагентом. Отримана рідина ділиться на два потоки - дистилят і флегму. Дистилят є продуктивним потоком, а флегма надходить на зрошення зміцнюючої секції, по контактних пристроях якої стікає. Частина рідини виводиться з куба колони у вигляді так званого кубового залишку (також продуктивний потік).

Таким чином, в ректифікаційній колоні створюються два зустрічних потоку - потік піднімаючих вгору парів і потік стікаючої назустріч їм рідини. Контакт між ними відбувається на спеціальних тепломасообмінних пристроях, розташованих по висоті колони з певним кроком. Такі пристрої виконуються у вигляді горизонтальних тарілок або насадок.

### **1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструктивних матеріалів [1]**

Колона ректифікації є вертикальний циліндричний апарат зі зварним або збірним корпусом. Вихідна суміш нагрівається в підігрівачі і подається в середню частину колони. Стікаючи вниз по колоні, рідина взаємодіє з піднімається вгору парою, що утворюється при кипінні кубової рідини в кип'ятильник. Початковий склад пара приблизно дорівнює складу кубового залишку  $x_w$ , тобто збіднений легколетучим компонентом. В результаті масообміну з рідиною пар збагачується легколетучим компонентом. Для більш повного збагачення верхню частину колони зрошують відповідно до заданого флегмового числом рідиною (флегмою) складу  $x_p$ , яку отримують в дефлегматоре шляхом конденсації пара, що виходить з колони. Частина

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		7



конденсату виводиться з дефлегматора у вигляді готового продукту поділу - дистилляту, який охолоджується в теплообміннику і направляється в проміжну ємність .

З кубової частини колони насосом безперервно виводиться кубова рідина - продукт, збагачений труднолетучими компонентами, який охолоджується в теплообміннику і прямує в ємність.

При конструюванні хімічної апаратури слід застосовувати стійкі металеві та неметалеві конструкційні матеріали в заданих агресивних середовищах. Матеріали повинні бути хімічно і корозійностійкими в заданому середовищі при її робочих параметрах, мати гарну зварюваність і відповідними характеристиками міцності і пластичними характеристиками в робочих умовах, допускати холодну і гарячу механічну обробку, а також мати можливо низьку вартість і бути недефіцитних. При виконанні розрахунків на міцність в першу чергу стикаються з необхідністю оцінки загальної поверхневої корозії обраного конструкційний матеріал, що характеризується проникністю  $\Pi$  мм / рік.

Завжди потрібно прагнути до вибору конструкційних матеріалів, що характеризуються мінімальної проникністю. У розрахунках апаратури на міцність втрата по товщині матеріалу на корозію враховується відповідної надбавкою  $C$ , яка визначається амортизаційним терміном служби апарату і проникністю за формулою:

$$C = \Pi T_a = 0,1 \cdot 20 = 2 \text{ мм.}, \text{ де } \Pi \leq 0,1 \text{ мм/рік.}$$

$C$  – прибавка до розрахункових товщин;  $\Pi = 0,1$  мм/год – швидкість корозії  
 $T_a = 20$  - років термін служби апарату.

Приймаємо сталь X18H1OT, для якої  $\sigma^* = 134 \text{ МПа}$ .

$[\sigma]$  - допустиме напруження.

$$[\sigma] = \sigma^* \eta = 1 \cdot 134 = 134 \text{ Мпа} \quad (1.3)$$

$\eta = 1$  – поправочний коефіцієнт, що враховує вид заготовки.

Сталь X18H1OT застосовується для обичайок, днищ, фланців, трубних решіток, болтів, шпильок, валів, патрубків штуцерів, корпусів кришок,

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

XI.A.00.00.00ПЗ

Лист

8

тарілок, фланців і інших деталей зварної, кованої, литий хімічної апаратури, що працюють із середовищами середньої і підвищеної вартості в межах  $t - 254$  до  $+ 6000\text{C}$  і необмеженим тиском.

Інші деталі, не стикаються з токсичною, корозійною середовищем, виготовляються зі сталі Ст3.

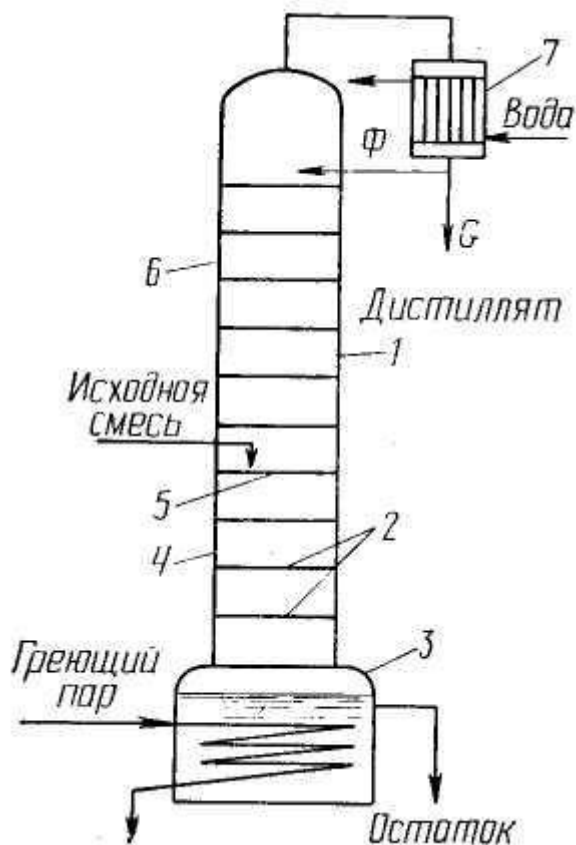


Рис.1.2 Схема ректифікаційної колони

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

XI.A.00.00.00ПЗ

Лист

9

## 2. Технологічні розрахунки процесу і апарата

### 2.1 Матеріальний та тепловий розрахунок процесу

Позначимо масова витрата дистиляту через  $G_D$  кг/ч, кубового залишка через  $G_W$  кг/ч.

З рівнянь матеріального балансу

$$\begin{aligned} G_F &= G_D + G_W; \\ G_F X_F &= G_D X_D + G_W X_W, \end{aligned} \quad (2.1)$$

де,  $G_F$ ,  $G_D$ ,  $G_W$  – масові або молярні витрати живлення, дистиляту і кубового залишку;

$X_F$ ,  $X_D$ ,  $X_W$  – вміст легколетучого компонента в живленні, дистиляті і кубовому залишку, масові або молярні частки.

ацетон (температура кипіння  $t = 56$  °С, мол маса  $M = 58$  кг/кмоль)

бензол (температура кипіння  $t = 80,2$  °С, мол маса  $M = 78$  кг/кмоль)

Переводимо з мольних в масові відсотки

Визначаємо молярну масу суміші

вихідної

$$M_F = M_1 \cdot x_F + M_2 \cdot (1 - x_F) = 58 \cdot 0,22 + 78 \cdot (1 - 0,22) = 73,6 \text{ кг/кмоль} \quad (2.2)$$

$$\bar{x}_F = \frac{M_1 \cdot x_F}{M_F} = \frac{58 \cdot 0,22}{73,6} = 0,173 \quad (2.3)$$

дистиляту

$$M_D = M_1 \cdot x_D + M_2 \cdot (1 - x_D) = 58 \cdot 0,94 + 78 \cdot (1 - 0,94) = 59,2 \text{ кг/кмоль} \quad (2.4)$$

$$\bar{x}_D = \frac{M_1 \cdot x_D}{M_D} = \frac{58 \cdot 0,94}{59,2} = 0,921 \quad (2.5)$$

кубового залишку

$$M_W = M_1 \cdot x_W + M_2 \cdot (1 - x_W) = 58 \cdot 0,025 + 78 \cdot (1 - 0,025) = 77,5 \text{ кг/кмоль} \quad (2.6)$$

$$\bar{x}_W = \frac{M_1 \cdot x_W}{M_W} = \frac{58 \cdot 0,025}{77,5} = 0,0187 \quad (2.7)$$

$$\bar{G}_W = \frac{\bar{G}_F (\bar{x}_D - \bar{x}_F)}{\bar{x}_D - \bar{x}_W} = \frac{1500 \cdot (0,921 - 0,173)}{0,921 - 0,0187} = 1243,5 \text{ кг/год} \quad (2.8)$$

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		10

$$\bar{G}_D = \bar{G}_F - \bar{G}_W = 1500 - 1243,5 = 256,5 \text{ кг/год} \quad (2.9)$$

Відносні мольні витрати живлення:

$$F = \frac{X_D - X_W}{X_F - X_W} = \frac{0,94 - 0,025}{0,22 - 0,025} = 4,7 \quad (2.10)$$

Крива рівноваги точок перегину не має.

Визначаємо мінімальне число флегми за рівнянням:

$$R_{\text{мин}} = \frac{X_D - Y_F^*}{Y_F^* - X_F} = \frac{0,94 - 0,43}{0,43 - 0,22} = 2,414 \quad (2.11)$$

де,  $Y_F^* = 0.43$  – мольну частку бензолу в парі, рівноважному з рідиною живлення, визначаємо по діаграмі  $Y^* - X$  (табл. 2.1)

Таблиця 2.1 - Рівноважні дані для системи ацетон-бензол

Ацетон – бензол C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O-C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>			
<i>x</i>	<i>y</i>	<i>t</i>	<i>P</i>
0,0	0,00	80,10	760
1	3,52	79,20	
5	14,96	76,35	
10	25,31	73,60	
20	40,30	69,70	
30	51,47	66,75	
40	60,30	64,50	
50	67,85	62,65	
60	74,64	61,00	
70	81,00	59,60	
80	87,37	58,35	
90	93,71	57,25	
95	96,87	56,70	
99	99,37	56,27	
100	100,00	56,18	

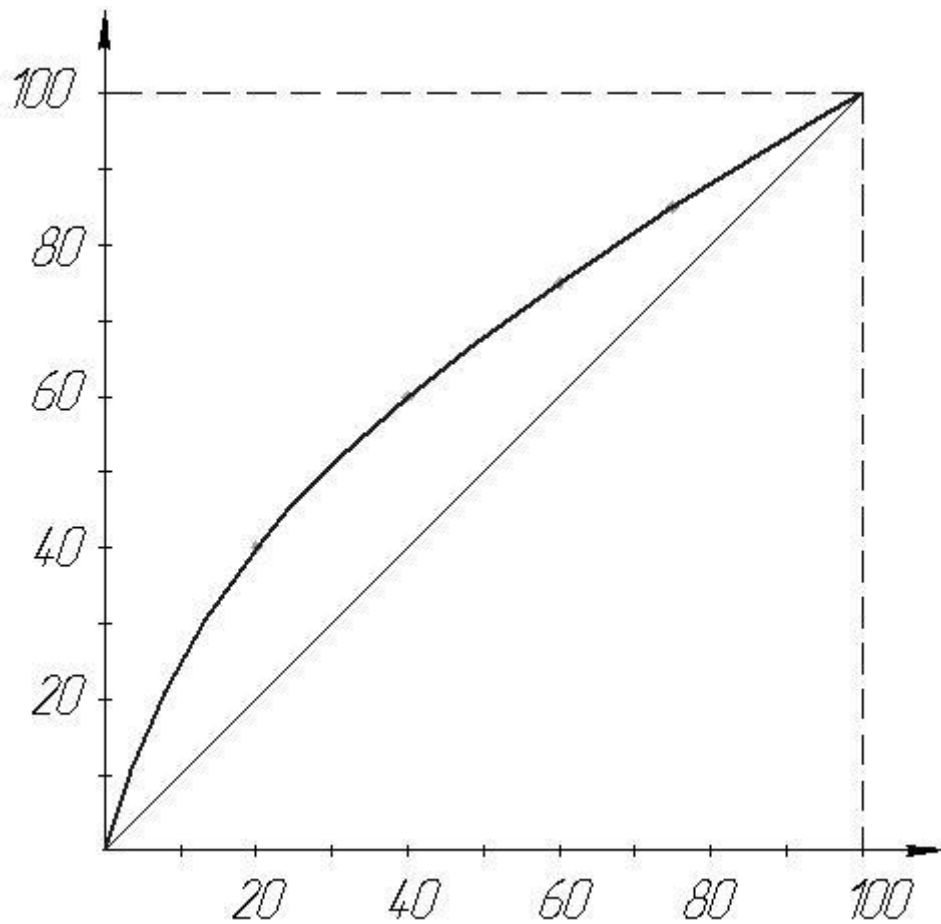


Рисунок 2.1 – рівноважна лінія

Робоче число флегми:

$$R = 1.3R_{\text{МИН}} + 0.3 = 1.3 \cdot 2,414 + 0.3 = 3,44 \quad (2.12)$$

Рівняння робочих ліній:

а) верхньої (зміцнювальної) частини колони:

$$y = \frac{R}{R+1}x + \frac{X_D}{R+1} = \frac{3,44}{3,44+1}x + \frac{0,94}{3,44+1}; \quad (2.13)$$

$$y = 0,77x + 0,21$$

б) нижньої (вичерпної) частини колони:

$$y = \frac{R+F}{R+1}x - \frac{F-1}{R+1}x_w = \frac{3,44+4,7}{3,44+1}x - \frac{4,7-1}{3,44+1} \cdot 0,025; \quad (2.14)$$

$$y = 1,83x - 0,021$$

Витрата теплоти, що віддається охолоджуючої води в дефлегматоре-конденсаторі, знаходимо з рівняння:

$$Q_d = G_D(1+R)r_D = \frac{256,5}{3600} \cdot (1+3,44) \cdot 719,4 \cdot 10^3 = 227,5 \text{ кВт}; \quad (2.15)$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

XI.A.00.00.00ПЗ

Лист

12

Тут

$$r_D = \bar{x}_D \cdot r_1 + (1 - \bar{x}_D) r_2 = 0,921 \cdot 752,2 \cdot 10^3 + (1 - 0,921) \cdot 337 \cdot 10^3 = 719,4 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \quad (2.16)$$

де  $r_D$  і  $r_T$  - питомі теплоти конденсації ацетону і бензолу при  $64,2^\circ\text{C}$ .

Витрата теплоти, одержуваної в кубі-випарнику від пари, що гріє, знаходимо з рівняння:

$$Q_K = Q_D + G_D c_D t_D + G_W c_W t_W - G_F c_F t_F + Q_{\text{пот}}$$
$$Q_K = 1,05 \left( 227,5 + \frac{256,5}{3600} 2226 \cdot 56 + \frac{1243,5}{3600} \cdot 1,914 \cdot 79,8 - \frac{1500}{3600} 1,963 \cdot 70,9 \right) = 242,7 \text{ кВт} \quad (2.17)$$

Тут теплові втрати прийняті в розмірі 5% від корисно витрачається теплоти; питомі теплоємності взяті відповідно при  $t_D = 56^\circ\text{C}$ ,  $t_W = 79,8^\circ\text{C}$  и  $t_F = 70,9^\circ\text{C}$ ; температура кипіння визначені по рис. 2.1

Теплоємність визначаємо по номограмі

$$c_F = x_F \cdot c_1 + (1 - x_F) \cdot c_2 \quad (2.18)$$

де  $c_1$  і  $c_2$  - теплоємності ацетону і бензолу при відповідній температурі кипіння

$$c_F = 0,173 \cdot 2298 + (1 - 0,173) \cdot 1893 = 1963 \text{ Дж/кг К} \quad (2.19)$$

$$c_D = 0,921 \cdot 2258 + (1 - 0,921) \cdot 1848 = 2226 \text{ Дж/кг К} \quad (2.20)$$

$$c_W = 0,0187 \cdot 2309 + (1 - 0,0187) \cdot 1906 = 1914 \text{ Дж/кг К} \quad (2.21)$$

Витрата теплоти в паровому підігрівачі вихідної суміші:

$$Q = G_F c_F (t_F - t_{\text{НАЧ}}) = \frac{1500}{3600} 1,963 (70,9 - 20) = 41,6 \text{ кВт} \quad (2.22)$$

Витрата теплоти, що віддається охолоджуючій воді у водяному холодильнику дистиляту:

$$Q = G_D c_D (t_D - t_{\text{КОН}}) = \frac{256,5}{3600} 2226 \cdot (56 - 20) = 5,7 \text{ кВт} \quad (2.23)$$

Витрата теплоти, що віддається охолоджуючій воді у водяному холодильнику кубового залишку:

$$Q = G_W c_W (t_W - t_{\text{КОН}}) = \frac{1243,5}{3600} \cdot 1,914 (79,8 - 20) = 36,2 \text{ кВт}; \quad (2.24)$$

Витрата грюючого пара, що має тиск  $p_{\text{АБС}} = 0,3 \text{ кгс/см}^2$  і вологість 5%:

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		13

а) в кубі-випарнику

$$G_{Г.П} = \frac{Q_K}{r_{Г.П}x} = \frac{242,7 \cdot 10^3}{2171 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 0,118 \text{ кг/с}; \quad (2.25)$$

де  $=2171 \times 10^3$  Дж/кг - питома теплота конденсації гріючої пари, при його тиску  $P=3$ атм

б) в підігрівачі вихідної суміші

$$G_{Г.П} = \frac{41,6 \cdot 10^3}{2171 \cdot 10^3 \cdot 0,95} = 0,02 \text{ кг/с}; \quad (2.26)$$

Витрата охолоджуючої води при нагріванні її на  $t_{BK} - t_{BH} = 40 - 20 = 20^0 C$

а) в дефлегматоре

$$V_B = \frac{Q_D}{c_B (t_{KOH} - t_{HACH}) \rho_B} = \frac{227,5 \cdot 10^3}{4190 \cdot 20 \cdot 996} = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}; \quad (2.27)$$

$\rho_B = 996$ кг/м<sup>3</sup> - щільність води при середній температурі

$$t_{cp} = \frac{t_{BK} + t_{BH}}{2} = \frac{40 + 20}{2} = 30^0 C$$

б) у водяному холодильнику дистиляту

$$V_B = \frac{5,7 \cdot 10^3}{4190 \cdot 20 \cdot 996} = 6,8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{с}; \quad (2.28)$$

в) у водяному холодильнику кубового залишку

$$V_B = \frac{36,2 \cdot 10^3}{4190 \cdot 20 \cdot 996} = 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}. \quad (2.29)$$

## 2.2 Технологічні розрахунки

### Визначення швидкості пара и діаметра колони

Середні концентрації рідини:

а) у верхній частині колони

$$x'_{cp} = (x_F + x_D) / 2 = (0,22 + 0,94) / 2 = 0,58 \quad (2.30)$$

б) в нижній частині колони

$$x''_{cp} = (x_F + x_W) / 2 = (0,22 + 0,025) / 2 = 0,122 \quad (2.31)$$

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

Середні концентрації пара знаходимо за рівнянням робочих ліній:

а) у верхній частині колони

$$y'_{cp} = 0,78x'_{cp} + 0,21 = 0,78 \times 0,58 + 0,21 = 0,66 \quad (2.32)$$

б) в нижній частині колони

$$y''_{cp} = 1,83x''_{cp} - 0,021 = 1,83 \times 0,122 - 0,021 = 0,2 \quad (2.33)$$

Середні температури пара визначаємо по діаграмі t-x, y (рис. 2,2)

а) при  $y'_{cp} = 0,66$   $t'_{cp} = 64,7^{\circ}C$

б) при  $y''_{cp} = 0,2$   $t''_{cp} = 77,1^{\circ}C$

в) при  $x_w = 0,025$   $t_w = 79,8^{\circ}C$

г) при  $x_D = 0,94$   $t_D = 56^{\circ}C$

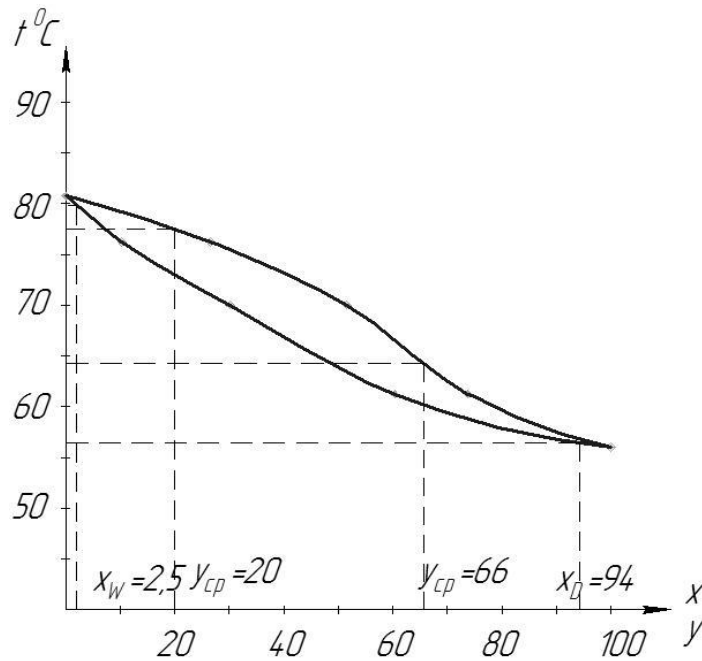


Рисунок 2.2- Визначення температури по t-x, y діаграмі

Середні молярний маси і щільності пара:

$$M'_{cp} = 0,66 \times 58 + (1 - 0,66) \times 78 = 64,8 \text{ кг / кмоль} \quad (2.34)$$

$$\rho'_{cp} = \frac{M'_{cp} T_0}{22,4 T'_{cp}} = \frac{64,8 \times 273}{22,4 \times (273 + 64,7)} = 2,34 \text{ кг / м}^3 \quad (2.35)$$

$$M''_{cp} = 0,2 \times 58 + (1 - 0,2) \times 78 = 73,9 \text{ кг / кмоль} \quad (2.36)$$

$$\rho''_{cp} = \frac{M''_{cp} T_0}{22,4 T''_{cp}} = \frac{73,9 \times 273}{22,4 \times (273 + 77,1)} = 2,57 \text{ кг / м}^3 \quad (2.37)$$



Середня щільність пара в колоні:

$$\rho_n = (\rho_{cp}' + \rho_{cp}'') / 2 = (2,34 + 2,57) / 2 = 2,46 \quad (2.38)$$

Щільність рідкого ацетону при середній температурі 70,9°C

$\rho_1 = 731,7 \text{ кг/м}^3$ , а рідкого бензола при 70,6 °C  $\rho_2 = 824 \text{ кг/м}^3$

$$\rho_{cp} = \frac{1}{\frac{x_F}{\rho_1} + \frac{1-x_F}{\rho_2}} = \frac{1}{\frac{0,173}{731,7} + \frac{1-0,173}{824}} = 806,4 \text{ кг/м}^3 \quad (2.39)$$

Визначаємо швидкість пара в колоні. За даними каталогу-довідника «Колонні апарати» приймаємо відстань між тарілками  $h = 300 \text{ мм}$ .

Для ковпачкових тарілок за графіком (2 рис. 7.2) знаходимо  $C = 0,055$ .

Швидкість пара в колоні по рівнянню:

$$\omega = C \sqrt{\rho_{ж} / \rho_n} = 0,055 \sqrt{806,4 / 2,46} = 1 \text{ м/с} \quad (2.40)$$

Об'ємна витрата проходить через колону пара при середній температурі в колоні  $t_{cp} = (64,7 + 77,1) / 2 = 70,9^\circ\text{C}$

$$V = \frac{G_D (R+1) \times 22,4 T_{св} \rho_0}{M_D T_0 \times 3600 \rho} = \frac{256,5 (3,44 + 1) \times 22,4 \times (273 + 70,9) \times 1,033}{59,2 \times 273 \times 3600 \times 1} = 0,16 \text{ м}^3/\text{с}, \quad (2.41)$$

де  $M_D$ - мольная маса дистилляту, що дорівнює

$$\text{Діаметр колони: } D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega}} = \sqrt{\frac{0,16}{0,785 \cdot 1}} = 0,45 \quad (2.42)$$

За каталогом-довідником «Колонні апарати» беремо  $D = 500 \text{ мм}$  [1 стр. 214].

Тоді швидкість пара в колоні буде:

$$\omega = \frac{V}{0,785 D^2} = \frac{0,16}{0,785 \times 0,5^2} = 0,815 \text{ м/с}. \quad (2.43)$$

Вільний перетин колони  $0,196 \text{ м}^2$

Довжина лінії барботажа  $2,45 \text{ м}$

Периметр зливу  $0,4 \text{ м}$ .

Переріз переливу  $0,007 \text{ м}^2$

Відносна площа для проходу пари  $F = 8\%$

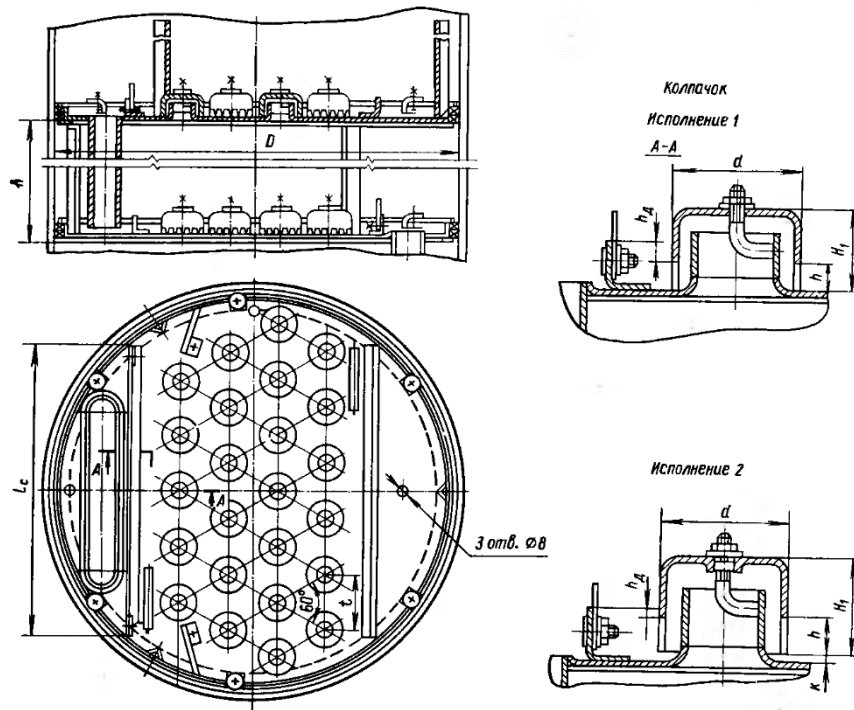


Рисунок 2.3 – Загальний вигляд тарілки ТСК-1

### Визначення числа тарілок і висоти колони

а) Наносимо на діаграму у - х робочі лінії верхньої і нижньої частини колони (рис. 2.3) і знаходимо число ступенів зміни концентрації  $n_T$ . У верхній частині колони  $n_T' \approx 9$  у нижній частині  $n_T'' \approx 5$  всього 14 ступенів.

Число тарілок розраховуємо за рівнянням:

$$n = n_T / \eta.$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата
------	------	----------	--------	------

XI.A.00.00.00ПЗ

Лист

17

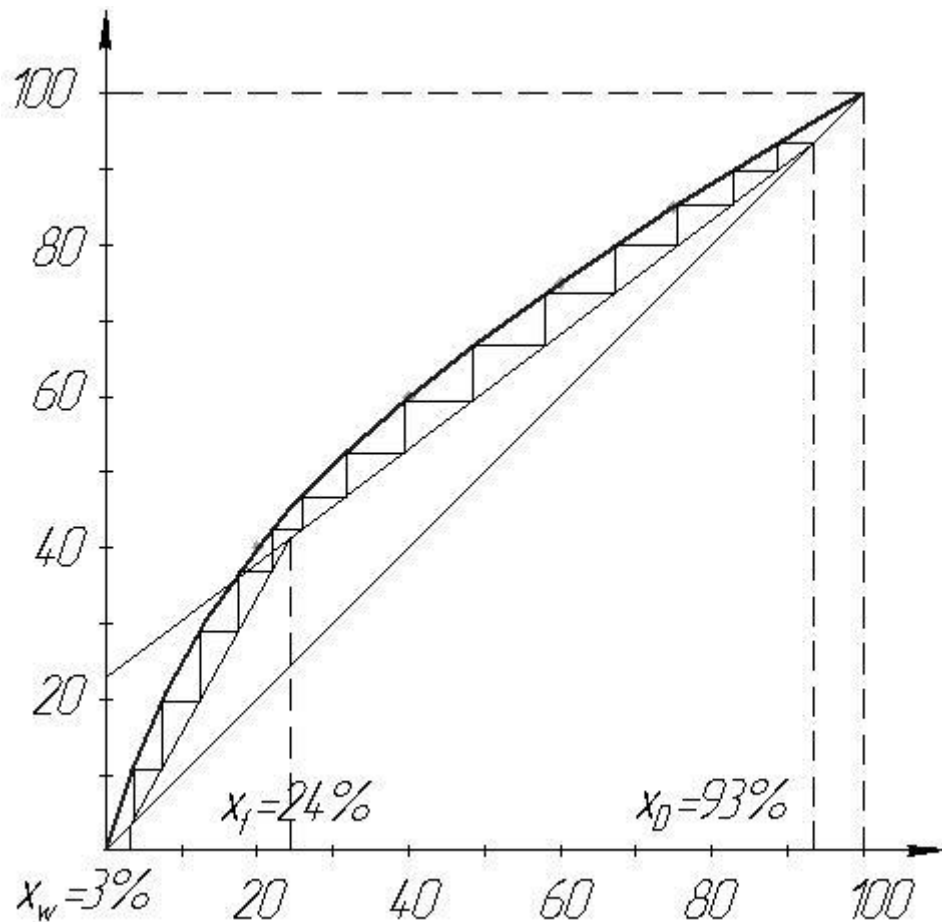


Рисунок 2.3 - Визначення числа ступенів зміни концентрації.

Для визначення середнього к.к.д. тарілок  $\eta$  знаходимо коефіцієнт відносної летючості поділюваних компонентів  $\alpha = P_0 / P_T$  і динамічний коефіцієнт в'язкості вихідної суміші  $\mu$  при середній температурі в колоні, яка дорівнює  $70,9^\circ\text{C}$ .

При цій температурі тиск насиченої пари ацетону  $P_1 = 1211,4 \text{ мм.рт.ст.}$

бензола  $P_2 = 556,4 \text{ мм.рт.ст.}$ , звідки  $\alpha = 1211,4/556,4 = 2,18$  [1 стр. 565, рис. XIV]

Динамічний коефіцієнт в'язкості ацетону при  $70,9^\circ\text{C}$  дорівнює  $0,211 \text{ сП}$ , бензола  $0,343 \text{ сП}$  [1 стр. 516, табл. IX]

$$\lg \mu_{\text{см}} = x_1 \lg \mu_6 + (1 - x_1) \lg \mu_m \quad (2.44)$$

$$\lg \mu_{\text{см}} = 0,22 \cdot \lg 0,211 + (1 - 0,22) \lg 0,343 = -0,511$$

$$\mu_{\text{см}} = 0,308 \text{ сПа} \cdot \text{с}$$

Тоді:

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		18

$$\alpha\mu = 2,18 \cdot 0,308 = 0,66 \quad (2.45)$$

За графіком знаходимо (2 рис. 7.4)  $\eta = 0,53$ . Довжина шляху рідини на тарілці

$$l = D - 2b = 0,5 - 2 \cdot 0,12 = 0,26 \text{ м.} \quad (2.46)$$

За графіком (2 рис. 7.5) знаходимо значення поправки на довжину шляху  $\Delta=0.1$ . Середній ККД тарілок:

$$\eta_l = \eta(1 + \Delta) = 0,53(1 + 0,1) = 0,58 \quad (2.47)$$

Для порівняння розрахуємо середній к.к.д. тарілки  $\eta_0$  за критеріальною формулою, отриманої шляхом статистичної обробки багаточисельних дослідних даних для сітчатих і ковпачкових тарілок:

$$\eta_l = 0.068 K_1^{0.1} \times K_2^{0.115}. \quad (2.48)$$

У цій формулі безрозмірні комплекси:

$$K_1 = \frac{\text{Re}_\Pi \text{Pr}'_{\text{ж}} \frac{\mu_\Pi}{\mu_{\text{ж}}}}{S_{\text{СВ}}} = \frac{\omega h_\Pi \rho_\Pi \mu_{\text{ж}} \mu_\Pi}{S_{\text{СВ}} \mu_\Pi \rho_{\text{ж}} D_{\text{ж}} \mu_{\text{ж}}} = \frac{\omega h_\Pi \rho_\Pi}{S_{\text{СВ}} \rho_{\text{ж}} D_{\text{ж}}}; \quad (2.49)$$

$$K_2 = \frac{\text{Re}_\Pi \text{Pr}'_{\text{ж}} \frac{\nu_\Pi}{\nu_{\text{ж}}}}{We} = \frac{\omega h_\Pi \sigma}{\nu_\Pi \rho_{\text{ж}} \omega^2 h_\Pi D_{\text{ж}} \nu_{\text{ж}}} = \frac{\sigma}{\omega \rho_{\text{ж}} D_{\text{ж}}}, \quad (2.50)$$

де  $\omega$  – швидкість пара в колоні, м/с;

$S_{\text{СВ}}$  – відносна площа вільного перерізу тарілки;

$h_\Pi$  – висота зливний перегородки, м;

$\rho_\Pi$  и  $\rho_{\text{ж}}$  – щільності пара в рідині, кг/м<sup>3</sup>;

$D_{\text{ж}}$  – коефіцієнт дифузії легколетучего компонента у вихідній суміші, м<sup>2</sup>/с;

$\sigma$  – поверхневий натяг рідини живлення, Н/м.

Фізико-хімічні константи віднесені до середньої температури в колоні.

Попередньо розрахуємо коефіцієнт дифузії  $D_{\text{ж}}$ :

$$D_{\text{ж}} = 7.4 \times 10^{-12} \frac{(\beta\mu)^{0.3} T}{\mu_{\text{ж}} \nu^{0.6}}. \quad (2.51)$$

поверхневий натяг при температурі в колоні, яка дорівнює 76,8<sup>0</sup>С

$$\sigma = x_F \cdot \sigma_1 + (1 - x_F) \sigma_2 = 0,173 \cdot 19,9 + (1 - 0,173) \cdot 21,5 = 21,2 \text{ мН/м} \quad (2.52)$$

У нашому випадку:  $\beta = 1,15$ ;  $\mu_{ж} = 0,308 \text{ сП} = 0,308 \times 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ ;

$M = M_F = 73,6 \text{ кг} / \text{кмоль}$ ;  $\nu = 74$ ;  $T = 70,9 + 273 = 343,9 \text{ К}$ .

Коефіцієнт дифузії:

$$D_{ж} = 7,4 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{(1,15 \cdot 73,6)^{0,5} \cdot 343,9}{0,308 \cdot 74^{0,6}} = 5,74 \cdot 10^{-9} \text{ м}^2 / \text{с}. \quad (2.53)$$

Безрозмірні комплекси:

$$K_1 = \frac{\omega h_{ж} \rho_n}{S_{св} \rho_{ж} D_{ж}} = \frac{0,815 \cdot 0,04 \cdot 2,46}{0,08 \cdot 806,4 \cdot 5,74 \cdot 10^{-9}} = 2,16 \cdot 10^5; \quad (2.54)$$
$$K_2 = \frac{\sigma}{\omega \rho_{ж} D_{ж}} = \frac{21,2 \cdot 10^{-3}}{0,815 \cdot 806,4 \cdot 5,78 \cdot 10^{-9}} = 0,53 \cdot 10^4.$$

Середній ККД тарілки:

$$\eta_0 = 0,068 K_1^{0,1} \times K_2^{0,115} = 0,068 (2,16 \cdot 10^5)^{0,1} \cdot (0,53 \cdot 10^4)^{0,115} = 0,62 \quad (2.55)$$

приймаємо найменший ккд 0,63.

Що близько до знайденого значення

Число тарілок: у верхній частині колони

$$n' = n'_T / \eta_l = 9 / 0,62 = 14,5 \quad (2.56)$$

Приймаємо 15 тарілок

в нижній частині колони

$$n'' = n''_T / \eta_l = 5 / 0,62 = 8 \quad (2.57)$$

Приймаємо 8 тарілок

Загальна кількість тарілок  $n = 15 + 8 = 23$  шт

Висота тарельчатої колони:

$$H_T = (n-1)h = (23-1)0,3 = 6,6 \text{ м}. \quad (2.58)$$

Висота колони

$$H = z_1 + z_2 + z_3 + H_T$$

$z_1 = 0,5 \text{ м}$  - висота сепараційного простору

$z_2 = 1 \text{ м}$  – висота кубової частини

$z_3 = 1 \text{ м}$  – висота опори

$$H = 6,6 + 0,5 + 1 + 1 = 9,1 \text{ м} \quad (2.59)$$

### 2.3 Конструктивний розрахунок

Розрахуємо діаметр трубопроводу подачі живлення:

$$G_f = \frac{1500}{3600} = 0,417 \text{ кг/с} \quad (2.60)$$

$$Q = \frac{G_f}{\rho} = \frac{0,417}{806,4} = 0,00052 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (2.61)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00052}{3,14 \cdot 1}} = 0,026 \text{ м} \quad (2.62)$$

Приймаємо 25 мм.

Розрахуємо діаметр трубопроводу входу флегми:

$$G_R = \frac{256,5 \cdot 3,44}{3600} = 0,25 \text{ кг/с} \quad (2.63)$$

$$Q = \frac{G_R}{\rho} = \frac{0,25}{806,4} = 0,0003 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (2.64)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,0003}{3,14 \cdot 1}} = 0,02 \text{ м} \quad (2.65)$$

Приймаємо 25 мм.

Розрахуємо діаметр трубопроводу виходу парів:

$$V_B = 0,16 \text{ кг/с}$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,16}{3,14 \cdot 20}} = 0,1 \text{ м} \quad (2.66)$$

Приймаємо 100 мм.

Розрахуємо діаметр трубопроводу виходу кубової рідини:

$$Q = \frac{1243,5 / 3600}{806,4} = 0,00043 \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \quad (2.67)$$

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00043}{3,14 \cdot 1}} = 0,023 \text{ м} \quad (2.68)$$

Приймаємо 25 мм.

Розрахуємо діаметр трубопроводу виходу кубового залишку:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00043}{3,14 \cdot 0,5}} = 0,036 \text{ м} \quad (2.69)$$

Приймаємо 40 мм.

## 2.4 Гідравлічний опір апарата

Розрахуємо гідравлічний опір тарілки у верхній і в нижній частині колони з рівняння:

$$\Delta\rho = \Delta\rho_{\text{сух}} + \Delta\rho_0 + \Delta\rho_{\text{пж}}. \quad (2.70)$$

а) верхня частина колони.

Гідравлічний опір сухої тарілки:

$$\Delta\rho_{\text{сух}} = \zeta \omega^2 \rho_n / 2 = 4,5 \cdot 10,19^2 \cdot 2,34 / 2 = 545,9 \text{ Па} \quad (2.71)$$

де  $\zeta = 4,5$  – коефіцієнт опору незрошуваних ковпачкових тарілок з вільним перетином 12,2% [1 стор. 225];

$\omega_0 = 0,815 / 0,08 = 10,19 \text{ м/с}$  – швидкість пара в отворах тарілки.

Опір, обумовлене силами поверхневого натягу:

$$\Delta\rho_0 = 4\sigma / d_0 = 4 \cdot 21,2 \cdot 10^{-3} / 0,005 = 17 \text{ Па} \quad (2.72)$$

$d_0 = 0,004 \text{ м}$  – діаметр прорізів еквівалентний

Опір парорідинного шару на тарілці:

$$\Delta\rho_{\text{пж}} = 1,3 h_{\text{пж}} \rho_{\text{пж}} g k. \quad (2.73)$$

Висота парорідинного шару:

$$h_{\text{пж}} = h_n + \Delta h. \quad (2.74)$$

Величину  $\Delta h$  - висоту шару над зливний перегородкою розраховуємо за формулою:

$$\Delta h = \left( \frac{V_{\text{ж}}}{1,85 \Pi k} \right)^{2/3}, \quad (2.75)$$

де  $V_{\text{ж}}$  – об'ємна витрата рідини  $\text{м}^3 / \text{с}$ ;

$\Pi$  – периметр зливної перегородки  $\text{м}$ ;

$k = \rho_{\text{пж}} / \rho_{\text{ж}}$  – відношення щільності парорідкого шару (піни) до щільності рідкого, прийняте приблизно рівним 0.5.

Об'ємна витрата рідини у верхній частині колони:

$$V_{\text{ж}} = \frac{G_D R M_{\text{ср}}}{M_D \rho_{\text{ж}}} = \frac{256,5 \cdot 3,44 \cdot 64,8}{3600 \cdot 59,2 \cdot 806,4} = 0,0003 \text{ м}^3 / \text{с},$$

$$\Delta h = \left( \frac{0.0003}{1,85 \cdot 0,4 \cdot 0,5} \right)^{2/3} = 0,01 \text{ м.}$$

Висота парорідкого шару:

$$h_{\text{пж}} = h_n + \Delta h = 0,04 + 0,01 = 0,05$$

$$\Delta \rho_{\text{пж}} = 1,3 \cdot h_{\text{пж}} \cdot k \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g = 1,3 \cdot 0,05 \cdot 0,5 \cdot 806,4 \cdot 9,81 = 255,9 \text{ Па.}$$

Загальний гідравлічний опір тарілки у верхній частині колони:

$$\Delta \rho' = \Delta \rho_{\text{сyx}} + \Delta \rho_0 + \Delta \rho_{\text{пж}} = 545,9 + 17 + 255,9 = 818,8 \text{ Па.}$$

б) нижня частина колони:

$$\Delta \rho_{\text{сyx}} = 4,5 \cdot 10,19^2 \cdot 2,57 / 2 = 601 \text{ Па};$$

$$V_{\text{ж}} = \left( \frac{G_D R}{M_D} + \frac{G_F}{M_F} \right) \frac{M_{\text{сп}}}{\rho_{\text{ж}}} = \left( \frac{256,5 \cdot 3,44}{59,2} + \frac{1500}{73,6} \right) \frac{73,9}{806,4 \cdot 3600} = 0,001 \text{ м}^3 / \text{с},$$

$$\Delta h = \left( \frac{0,001}{1,85 \cdot 0,4 \cdot 0,5} \right)^{2/3} = 0,019 \text{ м}$$

$$h_{\text{пж}} = 0,04 + 0,019 = 0,059 \text{ м}$$

$$\Delta \rho_{\text{пж}} = 1,3 \cdot 0,059 \cdot 0,5 \cdot 806,4 \cdot 9,81 = 350,2 \text{ Па}$$

Загальний гідравлічний опір тарілки в нижній частині колони:

$$\Delta \rho'' = 601 + 17 + 350,2 = 968,2 \text{ Па.}$$

Перевіримо, чи дотримується при відстані між тарілками  $h = 0,5$  необхідне для нормальної роботи тарілок умова

$$h > 1,8 \frac{\Delta \rho}{\rho_{\text{ж}} g}$$

Для тарілок нижній частині колони, у яких гідравлічний опір  $\Delta \rho$  більше, ніж у тарілок верхній частині:

$$\frac{1,8 \Delta \rho'}{\rho_{\text{ж}} g} = \frac{1,8 \times 968,2}{806,4 \times 9,81} = 0,22 \text{ м}$$

Отже, вищевказане умова дотримується

Перевіримо рівномірність роботи тарілок - розрахуємо мінімальну швидкість пара в отворах  $\omega_{0,\text{мин}}$ , достатню для того, щоб тарілка працювала усіма отворами:

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		23



$$\omega_{0, \text{мин}} = 0,67 \sqrt{\frac{g \rho_{\text{ж}} h_{\text{н.ж}}}{\zeta \rho_n}} = 0,67 \sqrt{\frac{9,81 \cdot 806,4 \cdot 0,059}{4,5 \cdot 2,57}} = 4,25 \text{ м/с}. \quad (2.76)$$

Розрахована швидкість  $\omega = 10,19 \text{ м/с}$ ; отже, тарілки працюватимуть усіма отворами.

Загальна гідравлічний опір тарілок:

$$\Delta\rho = \Delta\rho' \cdot n_B + \Delta\rho'' \cdot n_H = 818,8 \cdot 15 + 968,2 \cdot 8 = 20027 \text{ Па}$$

## 2.5 Вибір допоміжного обладнання

### Розрахунок кип'ятильника

Поверхня кип'ятильника визначається за формулою:

$$F_K = Q_B / (K \cdot \Delta t_{\text{cp}}) \quad (2.77)$$

де  $Q_B$  – кількість тепла, що вноситься гарячим струменем,

$$Q_B = 792\,000 \text{ кДж/ч} = 210\,000 \text{ Вт};$$

$K$  - коефіцієнт теплопередачі, прийнятий за [2],  $K = 450 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}$ ;

Тиск насиченої водяної пари дорівнює 0,4 МПа, температура пара при цьому тиску  $140 \text{ }^\circ\text{C}$

Так як насичена водяна пара конденсується при постійній температурі  $t_{\text{ВП}}$ , що відповідає її тиску, то середня різниця температур визначається так:

$$\Delta t_{\text{cp}} = t_{\text{ВП}} - t_w = 140 - 75,6 = 64,4 \text{ }^\circ\text{C} \text{ – середня різниця температур,}$$

де  $t_w$  – температура залишку, що входить в кип'ятильник і виходить з кип'ятильника.

$$F_K = 210\,000 / (450 \cdot 64,4) = 7,2 \text{ м}^2$$

Витрата водяної пари:

$$G_{\text{ВП}} = Q_B / r \quad (2.78)$$

$$G_{\text{ВП}} = 792\,000 / 2141 = 370 \text{ кг/ч,}$$

де  $r$  – теплота конденсації водяного пара, кДж/кг.

Приймаємо по ГОСТ 15121-79 [6] теплообмінник типу ТН з площею

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		24

поверхні теплообміну  $F = 7,5 \text{ м}^2$ , 1-о ходовий, діаметром  $D=273 \text{ мм}$  і довжиною труб  $l=2 \text{ м}$ .

### Розрахунок дефлегматора

Для розрахунку поверхні конденсатора-холодильника обчислюється середній температурний напір між теплообмін. середовищами - дистиллятом і водою.

Беручи температуру води на вході в конденсатор  $15^\circ\text{C}$ , а на виході із конденсатора –  $35^\circ\text{C}$  при температурі верха  $76,6^\circ\text{C}$  (при противоточному русі середовищ), отримуємо різниці температур і обчислюємо середній температурний напір:

$$\Delta t_1 = 76,6 - 35 = 41,6^\circ\text{C}; \quad \Delta t_2 = 35 - 15 = 20^\circ\text{C},$$

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2} \quad (2.79)$$

$$\Delta t_{CP} = \frac{41,6 + 20}{2} = 30,8^\circ\text{C}$$

Поверхня конденсатора-холодильника визначаємо за формулою:

$$F_{КХ} = Q_d / K \cdot \Delta t_{CP}, \quad (2.80)$$

де  $Q_d$  – теплове навантаження на конденсатор-холодильник ,

$$Q_d = 801\,551 \text{ кДж/ч} = 222\,653 \text{ Вт};$$

$$K = 300 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К} - \text{коефіцієнт теплопередачі [2], } K = 300 \text{ Вт} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К};$$

$$F_{КХ} = 222\,653 / (300 \cdot 30,8) = 24 \text{ м}^2;$$

Приймаємо по ГОСТ 15121-79 [6] теплообмінник типу ТН з площею поверхні теплообміну  $F = 26 \text{ м}^2$ , 1-о ходовий, діаметром  $D=400 \text{ мм}$  і довжиною труб  $l=3 \text{ м}$ .

Розрахунок витрати води на охолодження дистилляту:

$$G_B = \frac{Q_d}{C_B \cdot (t_H - t_K)} \quad (2.81)$$

де  $C_B$  – теплоємність води,  $C_B = 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$

$$G_B = Q_d / 4,19 \cdot (35 - 15) = 801\,551 / 4,19 \cdot (35 - 15) = 9\,565 \text{ кг/ч.}$$

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		25

## 3 Розрахунки на міцність та герметичність

### 3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки

Головним складовим елементом корпусу більшості хімічних апаратів є обичайка. У хімічному апаратобудуванні найбільш поширені циліндричні обичайки, що відрізняються простотою виготовлення, раціональним витратою матеріалу і достатньою міцністю.

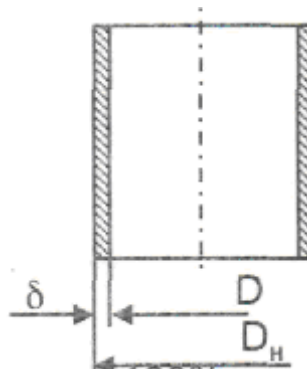


Рисунок 3.1 - Схема обичайки.

1. Обичайки апарату, що працюють під внутрішнім тиском

Вибираємо хромонікелева сталь X18H10T ГОСТ 5632-72;

Напруга, що допускається на розтяг  $[\sigma] = 148 \text{ МПа}$ ; [4 рис. IV с 176]

Робочий тиск  $p = 0,101 \text{ МПа}$ ;

Коефіцієнт міцності зварного шва, при 100% контролі зварного шва

$\varphi = 0,95$  ручна дугова електрозварювання

Проникність середовища в матеріал (швидкість корозії)  $I = 0,1 \cdot 10^3 \text{ м/год}$

Термін служби апарату  $\tau_a = 10 \text{ лет.}$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

XI.A.00.00.00ПЗ

Лист

26

Прибавка до розрахункової товщини стінки для компенсації корозії

$$c_k = \tau_a \cdot P = 10 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м/год} \quad (3.1)$$

Розрахункова товщина стінки циліндричної обичайки

$$[\sigma] / p = 148 / 0,101 = 1461 > 25 \text{ умова дотримується}$$

$$\delta = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]} + c_k = \frac{0,101 \cdot 0,5}{2 \cdot 0,95 \cdot 148} + 1 \cdot 10^{-3} = 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.2)$$

Виконавча товщина стінки циліндричної обичайки  $\delta = 4 \text{ мм}$

Перевірка

$$\frac{\delta - c_k}{D} = \frac{(4-1) \cdot 10^{-3}}{0,5} = 0,006 < 0,1 \text{ умова дотримується}$$

Допустимий тиск

$$[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_k)}{D + \delta - c_k} = \frac{2 \cdot 0,95 \cdot 148 \cdot (4-1) \cdot 10^{-3}}{0,5 + (4-1) \cdot 10^{-3}} = 1,68 \text{ МПа} \quad (3.3)$$

$$p / [p] = 0,101 / 1,68 = 0,6 < 1 \text{ умова дотримується}$$

Складовими елементами корпусів хімічних апаратів є днища, які зазвичай виготовляються з того ж матеріалу, що і обичайки, і приварюються до неї. Днище нероз'ємне обмежує корпус вертикального апарату знизу і зверху. Форма днища може бути еліптичної, сферичної, конічної і плоскої. Найбільш раціональною формою днищ для циліндричних апаратів є еліптичної. Еліптичні днища виготовляються з листового прокату штампуванням.

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

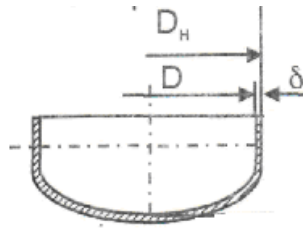


Рисунок 3.2 – Схема кришки

Коефіцієнт ослаблення днища отворами

$$\varphi_0 = \frac{D - d_0}{D} = \frac{0,5 - 0,1}{0,5} = 0,8 \quad (3.4)$$

Якщо  $\varphi_0 < \varphi_{ш}$ , то  $\varphi_0 = \varphi = 0,75$

Робоча товщина стінки кришки (днища)

$[\sigma] / p = 148 / 0,101 = 1461 > 25$  умова дотримується

$$\delta = \frac{p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]} + c_k = \frac{0,101 \cdot 0,5}{2 \cdot 0,8 \cdot 148} + 1 \cdot 10^{-3} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (3.5)$$

Виконавча товщина стінки циліндричної обичайки  $\delta = 4 \text{ мм}$

Перевірка

$$\frac{\delta - c_k}{D} = \frac{(4 - 1) \cdot 10^{-3}}{0,5} = 0,006 < 0,1 \text{ умова дотримується}$$

Допустимий тиск

$$[p] = \frac{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] \cdot (\delta - c_k)}{D + 0,5 \cdot (\delta - c_k)} = \frac{2 \cdot 0,8 \cdot 148 \cdot (4 - 1) \cdot 10^{-3}}{0,5 + 0,5 \cdot (4 - 1) \cdot 10^{-3}} = 1,42 \text{ МПа} \quad (3.6)$$

$p / [p] = 0,101 / 1,42 = 0,07 < 1$  умова дотримується

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

XI.A.00.00.00ПЗ

Лист

28

### 3.2 Розрахунок фланцевого з'єднання

Фланцеві з'єднання застосовують для роз'ємного з'єднання складових частин корпусів і кришок. На фланцях приєднують до апаратів труби, арматуру

Вибираємо стандартний фланець  $D=500\text{мм}$  и  $P_y = 0,3\text{МПа}$

ГОСТ 28759.2-90

Dф	Dб	D1	D2	D3	h	a	a1	s	d	число отв. z
мм										
620	580	544	552	543	25	13,5	12	8	23	20

Перевіряємо міцність фланцевого з'єднання за кількістю болтів

Зовнішній діаметр прокладки

$$D_{нл} = D_б - e = 0,58 - 0,034 = 0,576 \text{ м.} \quad (3.7)$$

Нормативний параметр  $e = 0,034 \text{ м}$ .

Вибираємо прокладку з пароніту тип I. Визначаємо дійсну ширину

прокладки:  $b = 0,016 \text{ м}$  (4 т. 1.42 с. 96)

Середній діаметр прокладки

$$D_{сн} = D_{нл} - b = 0,576 - 0,016 = 0,56 \text{ м} \quad (3.8)$$

Ефективна ширина прокладки

Якщо  $b \leq 15 \text{ мм}$ , то  $b_a = b = 0,016 \text{ м}$ , якщо  $b > 15 \text{ мм}$ , то

$k = 2,5$  - коефіцієнт для пароніта

Розрахункова сила осевого притиснення прокладки прямокутного перетину

$$P_n = \pi \cdot D_{сн} \cdot b_a \cdot k \cdot p = 3,14 \cdot 0,56 \cdot 0,016 \cdot 2,5 \cdot 0,101 = 0,007 \text{ МН} \quad (3.9)$$

Розрахункове розтяжне зусилля в болтах при робочих умовах

$$P_б = \frac{\pi \cdot D_{сн}^2}{4} p + P_n = \frac{3,14 \cdot 0,56^2}{4} \cdot 0,101 + 0,007 = 0,032 \text{ МН} \quad (3.10)$$

Кількість болтів

$$z = \frac{P_б}{[\sigma] \cdot F_б} = \frac{0,032}{80 \cdot 0,000314} = 2 \text{ шт} \quad (3.11)$$

$$\text{де } F_б - \text{ площа болта М20 } F_б = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,02^2}{4} = 0,000314 \text{ м}^2 \quad (3.12)$$

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		29

$[\sigma] = 80$  МПа – допустиме напруження матеріалу болта Таким чином, розрахункова кількість болтів виявляється менше прийнятого, отже, фланець навантаження витримає.

Більш детальний розрахунок фланцевого з'єднання було розраховано за допомогою програми PASSAT та представлено в додатку А.

### 3.3 Розрахунок опори апарата

Визначимо максимальну вагу апарату:

Маса тарілок

$$m_{\text{тарілок}} = 28,4 \cdot 23 = 653 \text{ кг} \quad (3.13)$$

Маса днища и кришки

$$m_{\text{днищ}} = 2 \cdot 250 = 500 \text{ кг} \quad (3.14)$$

Маса обічайки

$$m_{\text{обечайки}} = \rho_{\text{стали}} \cdot \pi \cdot D \cdot H \cdot \delta = 7900 \cdot 3,14 \cdot 0,5 \cdot 9,1 \cdot 0,004 = 452 \text{ кг} \quad (3.15)$$

Маса води

$$m_{\text{води}} = \rho_{\text{води}} \cdot H \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 1000 \cdot 9,1 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,5^2}{4} = 1786 \text{ кг} \quad (3.16)$$

Загальна маса

$$m_{\text{общ.}} = 653 + 500 + 452 + 1786 = 3391 \text{ кг} \quad (3.17)$$

Вага апарату

$$P = m \cdot g = 3391 \cdot 9,81 = 33266 \text{ Н} = 0,033 \text{ МН} \quad (3.18)$$

Вибираємо спідничну опору тип 3

G, МН	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>6</sub>	D	s <sub>1</sub>	s <sub>2</sub>	s <sub>3</sub>	d <sub>s</sub>	d <sub>6</sub>	число болтов
	мм									
до 0,25	700	450	620	500	6	20	12	28	M24	6

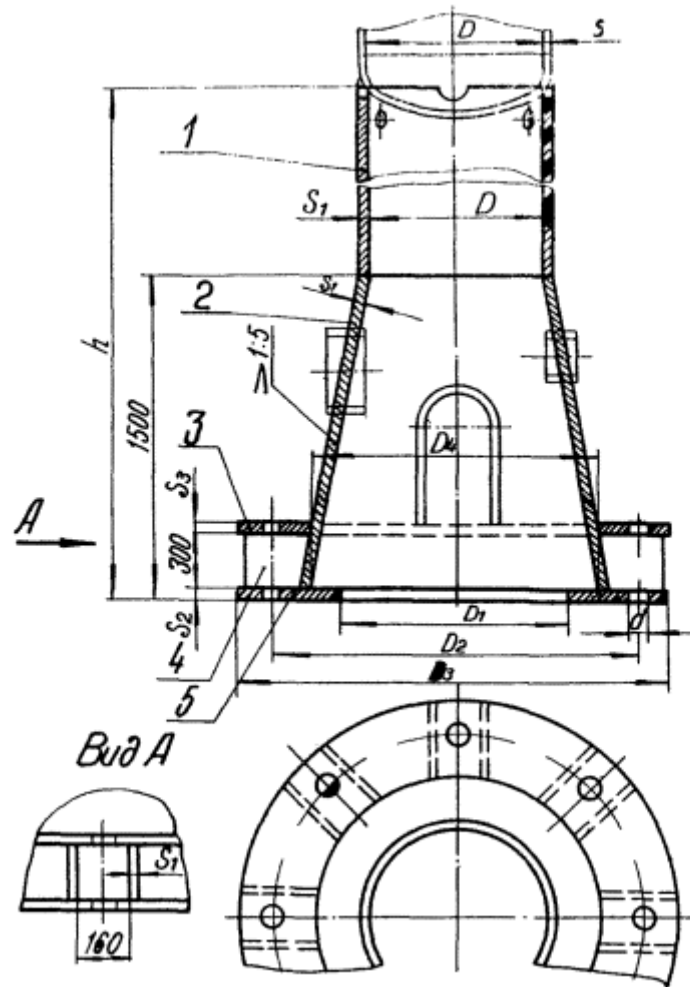


Рисунок 3.3 - Спіднична циліндрична опора з кільцевим опорним поясом

Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата

XI.A.00.00.00ПЗ

Лист

31



## 4 Монтаж та ремонт апарата

### 4.1 Монтаж розробленого апарата [3]

Основним обладнанням ректифікованого вузла є: колона ректифікації, емність - конденсатосборник, теплообмінники.

При проведенні монтажних робіт найбільшу складність викличе монтаж колони, що має великі габаритні розміри. З огляду на велику висоту колони, складність доставки до місця установки і складність монтажу, виготовляємо колону з трьох частин з наступною збіркою в процесі монтажу.

Монтаж колони повинна вести спеціалізована монтажна організація. У проекті виконання робіт (ППР) має передбачатися рішення наступних організаційно - технічних питань: першочергове виконання підготовчих і загальномайданчикових робіт, організація майданчиків для складування і укрупненого, послідовність монтажу, потоковість виробництва монтажних робіт, безпеку монтажних робіт. На основі ППР повинна бути розроблена технологічна карта (схема) монтажу.

При монтажі укрупненими блоками після установки в проектне положення чергового блоку проводиться монтаж тарілок, металоконструкцій, обслуговуючих площадок. Після цього монтується наступний блок.

Монтаж тарілок починається з установки опорних елементів, горизонтальність установки яких перевіряється за допомогою рейки і рівня. Деталі тарілок подаються на монтаж стріловим краном або краном - укосиною, що встановлюються для цієї мети на колоні. Після складання всіх елементів кожна тарілка перевіряється на барботаж. Для цієї мети закриваються всі люки, розташовані нижче контрольованої тарілки, тарілка

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		32

заливається водою, в нижню частину колони подається повітря від вентилятора або компресора. Рівномірність барботажа контролюється візуально.

#### 4.2 Ремонт апарата [3]

Суцільнозварні колони при ремонті не демонтуються. Демонтуються тільки внутрішні пристрої колон. Після підготовчих операцій (пропарювання, промивання) відкриваються люки колони. Люки потрібно відкривати в суворій послідовності, починаючи з верхнього, коли колона знаходиться під паром, для запобігання струму повітря через колону при одночасному відкритті верхнього і нижнього люка.

Після пропарювання колона промивається водою і провітрюється. Провітрювання необхідно для охолодження колони і доведення концентрацій продуктів до допустимих значень. Після закінчення провітрювання потрібно провести аналіз проб повітря, взятих з колони на різних висотних отмітках. До робіт всередині колони дозволяється приступати тільки тоді, коли аналіз покаже, що концентрація шкідливих газів і парів не перевищує гранично допустимих санітарних норм.

Тарілки розбираються всередині колони, виносяться через люки на обслуговуючі майданчики і транспортуються для чищення та ремонту. Спуск секцій тарілок проводиться за допомогою крана - укосіни. Кран - укосина через систему напрямних роликів і блоків з'єднується з лебідкою, встановленої на землі на необхідній відстані від працюючих апаратів і ремонтної колони. Лебідка повинна мати барабан з необхідною канатоємкістю і забезпечувати через кран - укосину підйом вантажу безпосередньо з нульової позначки.

Виявлення дефектів корпусу, що вимагає високої кваліфікації, включає візуальний огляд для визначення загального стану корпусу і ділянок, що піддаються найбільшому зносу; вимір залишкової товщини корпусу за допомогою ультразвукових дефектоскопів, шляхом мікрометрування і

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		33

контрольного просвердлювання отворів; перевірку на щільність зварних швів і рознімних з'єднань і т. д.

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

Зношені штуцери і люки вирізають і замінюють новими з обов'язковим встановленням зміцнювальних кілець. Бажано, щоб зміцнюють кільця нових штуцерів мали дещо більший діаметр, ніж старі: це дозволяє приварювати їх в новому місці. Ремонту піддають все штуцери, сигнальні отвори на зміцнювальних кільцях яких під час експлуатації були заглушені пробками.

При кожному ремонті вимірюють фактичну товщину стінки корпусу експлуатованого колонного апарату. Найбільш зношені ділянки корпусу колони вирізають, а на їх місце ставлять нову ділянку, заздалегідь свальцованний по радіусу колони. Зварювання виробляють встик. Вирізання великих ділянок корпусу може привести до ослаблення перетину і порушення стійкості. Тому до вирізання дефектного ділянки його зміцнюють стійками, що встановлюються всередині або зовні.

Проміжні обичайки легко замінюють наступним чином. Встановлюють підйомні щогли, які утримують верхню, неушкоджену частину колони, відокремлюють цю частину від пошкодженої ділянки газорезки і опускають на землю. Пошкоджену частину колони стропят і за допомогою тих же щогл опускають на землю. Заздалегідь підготовлену нову частину колони піднімають і стикуються з нижньою частиною колони, потім піднімають верхню її частину. Після перевірки монтованих частин заварюють обидва стикових шва.

## 5 Охорона праці

### **Відповідальність власника за невиконання нормативних вимог охорони праці [4]**

Відповідно до ст. 49 Закону України „Про охорону праці“ за порушення законодавчих та інших нормативних актів про охорону праці, створення перешкод для діяльності посадових осіб органів державного нагляду за охороною праці і представників професійних спілок винні працівники притягаються до дисциплінарної, адміністративної, матеріальної, кримінальної відповідальності згідно із законодавством.

Матеріальна відповідальність включає відповідальність як працівника, так і власника (підприємства).

Згідно КЗпП за порушення законодавства про охорону праці та невиконання приписів (розпоряджень) посадових осіб органів виконавчої влади з нагляду за охороною праці юридичні та фізичні особи, які відповідно до законодавства використовують найману працю, притягаються органами виконавчої влади з нагляду за охороною праці до сплати штрафу.

При цьому максимальний розмір штрафу не може перевищувати п'яти відсотків середньомісячного фонду заробітної плати за попередній рік юридичної чи фізичної особи, яка відповідно до законодавства, використовує найману працю.

У ст. 130 КЗпП зазначається, що працівники несуть матеріальну відповідальність за шкоду, заподіяну підприємству (установі) через порушення покладених на них обов'язків, в тому числі, і внаслідок порушення правил охорони праці. Матеріальна відповідальність встановлюється лише за пряму дійсну шкоду і за умови, коли така шкода заподіяна підприємству винними протиправними діями (бездіяльністю) працівника. Відповідальність, як правило, обмежується певною частиною заробітку працівника і не повинна перевищувати повного розміру заподіяної шкоди Матеріальна відповідальність може бути накладена незалежно від

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		

притягнення працівника до дисциплінарної, адміністративної чи кримінальної відповідальності.

Власник підприємства (установи) або уповноважена ним особа (орган) несе матеріальну відповідальність за заподіяну шкоду працівникові незалежно від наявності вини, якщо не доведе, що шкода заподіяна внаслідок непереборної сили або умислу потерпілого. Збитки у зв'язку з порушеннями законодавства про охорону праці можуть включати відшкодування потерпілому втраченого заробітку, одноразову допомогу, додаткові витрати на лікування, протезування, якщо потерпілий залишився живим, а також витрати на поховання в разі смерті потерпілого, одноразову допомогу на сім'ю та на утриманців.

Кодекс про адміністративні правопорушення визначає, що порушення вимог законодавчих та інших нормативних актів про охорону праці, тягне за собою накладення штрафу на працівників від чотирьох до десяти неоподатковуваних мінімумів доходів громадян (68-170 грн.) і на посадових осіб підприємств, установ, організацій незалежно від форм власності та громадян - суб'єктів підприємницької діяльності - від двадцяти до сорока неоподатковуваних мінімумів доходів громадян (340 – 680 грн.).

Однак, варто звернути увагу на те, що адмін. відповідальність за правопорушення, передбачені КУпАП, настає, якщо ці порушення своїм характером не тягнуть за собою кримінальної відповідальності.

Якщо ж порушення, визначених законом, умов охорони праці заподіяло шкоду здоров'ю когось із працівників, то згідно Кримінального кодексу України це порушення карається штрафом від ста до двохсот неоподатковуваних мінімумів доходів громадян (1700-3400 грн.) або виправними роботами на строк до двох років, або обмеженням волі на той самий строк.

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		36

## Список літератури

1. И. А. Александров Ректификационные и абсорбционные аппараты, Химия, Москва, 1971
2. Касаткин А. Г., Основные процессы и аппараты химической технологии, 8 изд., М., 1971
3. Ермаков В. И., Шеин В. С. Ремонт и монтаж химического оборудования: Учебное пособие для ВУЗов. - Л.: Химия, 1981. - 368 с., ил.
4. Кодекс законів про працю України 322-08 від 10.06.2021
5. Основные процессы и аппараты химической технологии /Пособие по проектированию / Под. ред. Ю.И. Дытнерского.- М: Химия, 1983 – 272 с.
6. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии /Учебное пособие/, К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков, 9-ое изд. перераб. и дополнен. Л. Химия,1987-575с.
7. Каталог. Колонные аппараты. Изд. 2-е, ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, М.: 1978, 31 с.
8. Основы конструирования и расчёта химической аппаратуры. Лацинский А.А., Толчинский А.Р., Л., «Машиностроение», 1970 г., 752 стр.
9. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Ленинград : Химия, 1987. – 576 с.
10. Охорона праці : конспект лекцій / укладач А. Ф. Денисенко. – Суми : СумДУ, 2007. – Ч. 1. – 128 с.
11. ГОСТ 2.790-74. ЕСКД. Обозначения графические. Аппараты колонные. – Введ. 01.01.75.
12. ГОСТ 2.701-84. ЕСКД. Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению. – Введ. 01.07.85.
13. Колонные аппараты : каталог. – 2-е изд. – Москва : ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1978. – 31 с.

					<i>XI.A.00.00.00ПЗ</i>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпис	Дата		37