

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний технологічний університет  
Кафедра кріогенної техніки



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

**На тему:** «Дослідження повітророздільної установки середнього тиску для отримання рідкого кисню»

Здобувача Лупенко О.О.  
(прізвище, ініціали)

2м курсу КТ-262м групи

Керівник проф. Симоненко Ю.М.  
(посада, прізвище та ініціали)

Консультанти: проф. Морозюк Л.І  
(посада, прізвище та ініціали)

**Кваліфікаційна робота допускається до захисту**

Рішення кафедри від \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ р., протокол № \_\_\_\_\_

Завідувач кафедри КТ \_\_\_\_\_ **Юрій СИМОНЕНКО**

Одеса - 2023 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ІНЖЕНЕРНОЇ МЕХАНІКИ

Кафедра Кріогенної техніки  
Ступінь вищої освіти Магістр  
Спеціальність 142 «Енергетичне машинобудування»  
Освітня програма «Кріогенні технології виробництва,  
зрідження і транспортування природного газу»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри КТ**

д.т.н., проф. Симоненко Ю.М

«\_\_» \_\_\_\_ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**

Лупенко Олега Олександровича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження повітророздільної установки середнього тиску для  
отримання рідкого кисню

керівник роботи д.т.н., проф. Симоненко Юрій Михайлович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 30 жовтня 2023 року № 631-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 11 грудня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Стаціонарна повітророздільна установка середнього тиску  
з 3000 м<sup>3</sup>/год переробляемого повітря, для отримання 463,5 кг/год рідкого кисню,  
з концентрацією 99,7 %O<sub>2</sub>.

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

Провести аналіз літературних джерел та вивчити існуючі схеми газифікаційних установок.

Схемне рішення установки. Виконати технологічний розрахунок. Визначити кількість  
перероблюваного повітря. Розрахувати енергетичні баланси апаратів. Визначення питомих витрат  
Енергії. Розрахувати теплообмінник переохолоджувач рідкого кисню. Загальні висновки.  
Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу:

Презентація Power Point ( 12 слайдів)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	проф. Морозюк Л.І.		

7. Дата видачі завдання 30.10.2023

Керівник \_\_\_\_\_ проф. Симоненко Ю.М.  
 Завдання прийняв до виконання \_\_\_\_\_ Лупенко О.О.

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення технічного завдання	5 днів	
2	Огляд і аналіз літератури	30 днів	
3	Розробка схемно-циклового рішення об'єкта	10 днів	
4	Енергетичні розрахунки елементів об'єкта	15 днів	
5	Розробка графічних моделей	10 днів	
6	Адаптація методів дослідження до практичного застосування	20 днів	
7	Аналіз результатів досліджень	8 днів	
8	Оформлення пояснювальної записки	5 днів	
9	Обговорення та затвердження результатів роботи	5 днів	
10	Підготовка матеріалів роботи до захисту	5 днів	

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_  
 (підпис)

Лупенко О.О.  
 (прізвище та ініціали)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
 (підпис)

Симоненко Ю.М.  
 (прізвище та ініціали)

*Несу відповідальність за ідентичність електронного та друкованого варіантів кваліфікаційної роботи, даю згоду на обробку персональних даних та не заперечую проти розміщення кваліфікаційної роботи на офіційних web-ресурсах ОНТУ.*

*Підтверджую, що в кваліфікаційній роботі відсутні порушення норм академічної доброчинності*

Здобувач-дипломник \_\_\_\_\_  
 (ПІБ)

Лупенко О.О.  
 (підпис)

## АНОТАЦІЯ

Досліджено повітророздільну установку середнього тиску для отримання рідкого кисню. Схема установки піддалася змінам. А саме, додано низькотемпературну машину, прибрано зі схеми насос рідкого кисню та змінено конструкцію теплообмінника зріджувача. Він, у свою чергу, став двопотоковим. Для зміненої схеми було розраховано теплообмінник переохолоджувач рідкого кисню. Виконано його гідравлічний та конструктивний розрахунок. Процес ректифікації розраховувався графоаналітичним методом Мак-Кеба та Тілі. Після розрахунку, було отримано 20 тарілок, які забезпечують перебіг процесу. В результаті всіх змін, повітряроздільна установка середнього тиску, з 3000 м<sup>3</sup>/год. переробляемого повітря, виробляє 463,5 кг/год. рідкого кисню.

**Ключові слова:** Кисень, теплообмінник, енергетичні характеристики, криогенна, повітророздільна, установка, зріджувач, переохолоджувач.

## ABSTRACTS.

A medium-pressure air separation unit for the production of liquid oxygen was investigated. The scheme of the plant has been modified. Namely, a low-temperature machine was added, the liquid oxygen pump was removed from the scheme, and the design of the liquefier heat exchanger was changed. It, in turn, became a two-stream heat exchanger. The liquid oxygen supercooler heat exchanger was designed for the changed scheme. Its hydraulic and structural design was performed. The rectification process was calculated by the graph-analytical method of McCabe and Thiele. After the calculation, 20 plates were obtained to ensure the process flow. As a result of all the changes, the medium-pressure air separation unit, with 3000 m<sup>3</sup>/h of processed air, produces 463.5 kg/h of liquid oxygen.

**Keywords:** Oxygen, heat exchanger, energy characteristics, cryogenic, air separation, plant, liquefier, subcooler.

## Зміст

<b>Вступ</b>	<b>6</b>
<b>1. Призначення та область використання</b>	<b>7</b>
<b>2. Технічна характеристика</b>	<b>8</b>
<b>3. Опис та обґрунтування схеми установки</b>	<b>9</b>
<b>4. Технологічний розрахунок</b>	<b>11</b>
4.1 Початкові дані для розрахунку	12
4.2 Матеріальні баланси установки та апаратів	13
4.3 Схема установки	14
<b>5.Визначення кількості перероблюваного повітря</b>	<b>15</b>
<b>6. Енергетичні баланси апаратів</b>	<b>16</b>
6.1.Тепловий баланс переохолоджувала азотної флегми	16
6.2. Тепловий баланс переохолоджувала кубової рідини	17
6.3.Енергетичний баланс переохолоджувала рідкого кисню	18
6.4.Енергетичний баланс вузла ректифікації	20
6.5.Енергетичний баланс основного теплообмінника	21
6.6 Енергетичний баланс блоку розділення	22
6.7.Енергетичний баланс теплообмінника зріджувача	24
6.8 Енергетичний баланс детандерного теплообмінника	25
<b>7.Визначення питомих витрат енергії</b>	<b>26</b>
7.1 Визначення загальної питомої використаної потужності	26
<b>8. Розрахунок процесу ректифікації</b>	<b>28</b>
<b>9. Розрахунок ректифікаційної колони</b>	<b>30</b>
<b>10. Розрахунок теплообмінника переохолоджувача рідкого кисню</b>	<b>51</b>
<b>11.Обґрунтування обраних матеріалів</b>	<b>65</b>
<b>12.Перевірка міцності основних деталей та вузлів</b>	<b>66</b>
12.1. Перевірка міцності днища нижньої ректифікаційної колони	66
12.2. Перевірка міцності обичайки нижньої ректифікаційної колони	69
<b>13. Техніка безпеки при роботі з рідким та газоподібним киснем</b>	<b>71</b>
<b>14. Висновок</b>	<b>72</b>
<b>15. Заключення</b>	<b>73</b>
<b>15. Список літератури</b>	<b>74</b>

## Вступ

Технологія поділу повітря методом глибокого охолодження з метою одержання кисню, азоту, аргону та криптон-ксенон суміш призвели до формування незалежної індустрії. Стрімкий розвиток кисню інженерії обумовлена високою ефективністю використання кисню, а також інших продуктів розділення повітря у багатьох основних сферах сучасних технологій. Кисень широко використовується в різанні металу й зварюванні процесів у машинобудуванні та металу. Поряд з киснем, що широко використовується в різних галузях промисловості знаходиться азот в газоподібних і рідких формах. Азот газоподібний використовується в чорних і кольорових металургіях, хімічної та нафтової промисловості, як інертна середа для плавлення, спеціальні сталі й сплави. Аргон широко використовуються в нових процесах металургійної плавки сталі, напівпровідників, у процесах аргонно-дугової зварювання металів. Криптон, Ксенон, Неон знаходить широке застосування.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 1. Призначення та область використання

Установка розділення повітря призначена для: кисню газу технічного класу I сорту відповідно до ГОСТ 5583-78. Продукт може використовуватися для ремонтно-механічних робіт, машин та інших підприємств. Кисень використовується для зварювання та різання металів, а також в медицині. Пристрій виробляється для потреб народного господарства та експортної поставки в регіонах з помірним або тропічний кліматом. Установка може працювати в районах з сейсмічною активністю 8 балів за ГОСТ 6249-52. Найбільшу частину установки поділу (Блок з колонами) може бути встановлений в приміщенні і на вулиці.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 2. Технічні характеристики

1. Продуктивність установки по повітрю:

3000 м<sup>3</sup>/год

2. Продуктивність установки по кисню:

463,5 кг/год

3. Концентрація продукційного рідкого кисню:

99.7 % O<sub>2</sub>

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 3. Опис та обґрунтування схеми установки

В установці використано цикл середнього тиску з розширенням повітря у турбодетандері.

Рекуперация холоду відбувається у завитих трубчатих теплообмінниках, розділення повітря відбувається у колонні двократної ректифікації.

Просушення повітря та його чистка від вуглекислот та вуглеводородів відбувається у цеолітовому очисному блоці. Попереднє охолодження повітря перед очисним блоком проходить у теплообміннику за рахунок холоду зворотних потоків.

Повітря, через забірник повітря, потрапляє у компресор, де стискається до тиску 6,7 МПа, потім потрапляє у теплообмінник зріджувач для попередньої чистки від вологи. Після зріджувача, з температурою приблизно 281К, через вологовіддільник, потрапляє у блок комплексної чистки та осушки (далі БКО) на два адсорбера, один з яких в робочому режимі, а інший в режимі відновлення. Після БКО повітря надходить до основного теплообмінника та низькотемпературної холодильної машини у рівних частинах, одна частина надходить до теплообмінника і потім з'єднується с іншим потоком, який після хол машини має температуру 240К. Вони змішуються і потім знову розділяються на детандерний потік та дросельний. Детандерний потік із температурою 200К потрапляє на розширення у турбодетандер, де розширюється до тиску 0,7МПа та температури 112К і потрапляє у детандерний теплообмінник, де охолоджується до 107К та потрапляє на розділення у нижню ректифікаційну колону, а дросельний потік не змішуючись із детандерним потрапляє також у колону нижню, де вже відбувається конденсація кубової рідини та кипіння азоту, який із збірника відбирається у верхню колону, проходячи через теплообмінник переохолоджувач азотної флегми. Кубова рідина із куба нижньої колони проходячи через теплообмінник переохолоджувач кубової

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

рідини та рідкого кисню потрапляє на зрошення у середину верхньої колони. Пари азоту із НРК потрапляють у міжтрубний простір конденсатора-випарника, де охолоджують кисень у трубному просторі. У кубі верхньої колони збирається кисень, який поступає у КД-Випарник, звідки після потрапляє у теплообмінник переохолоджувач рідкого кисню, після якого збирається у збірнику рідкого кисню та видається споживачу. Пари азоту відбираються зверху верхньої колони та надходять через теплообмінники переохолоджувачі азотної флегми та кубової рідини віддаючи свій холод на охолодження зворотних потоків, потім відкидний азот надходить у основний теплообмінник та теплообмінник зріджувач, де нагріваючись практично до температури навколишнього середовища частина азоту викидується у атмосферу, а частина потрапляє у БКО для виконання регенеративних функцій. Проходячи через нагрівальний елемент азот потрапляє у адсорбер для його очищення, поки один адсорбер починає регенерацію, інший включається у роботу, після того, як пари азоту пройшли через сорбент та відновили його поглинальні властивості азот викидається у атмосферу.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						10
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 4. Технологічний розрахунок

### 4.1 Початкові дані для розрахунку

1. Продуктивність установки	$K=463,5$ кг/год;
2. Кількість переробляемого повітря,	$V=3000$ м <sup>3</sup> /год;
3. Концентрації, %O <sub>2</sub> :	
Продукційного кисню	$y^k=99.7$ ;
Кубової рідини	$x^R=33$ ;
Азотної флегми	$x^N=2.5$ ;
4. Температури і різності температур, К	
Повітря на вході у зріджувачі	$T_2=313$ ;
Повітря на вході у очисний блок	$T_3=281$ ;
Повітря перед основним т\о	$T_4=283$ ;
Переохолодження азотної флегми	$\Delta T_D=11$ ;
Переохолодження кубової рідини	$\Delta T_R=3.5$ ;
5. Тиск, МПа	
Повітря після компресора	$P_k=6,7$ ;
у кубі нижній колонні	$P_{н.к.}=0,7$ ;
у кубі верхній колонні	$P_{в.к.}=0,16$ ;
6. Опір, МПа	
зріджувача	$\Delta P_{ож}=0,004$ ;
очисного блоку	$\Delta P_{бо}=0,02$ ;
основного теплообмінника	$\Delta P_{то}=0,013$ ;
нижньої колонни	$\Delta P_{нк}=0,01$ ;
верхньої колони	$\Delta P_{вк}=0,018$ ;
переохолоджувачі	$\Delta P_{по}=0,004$ ;

7. Теплоприливи, кДж/кмоль

до блоку розділення

$$q_{бр}=185;$$

до верхньої колони

$$q_{вк}=70;$$

до нижньої колони

$$q_{нк}=40;$$

до конденсатора-випарника

$$q_{ки}=40;$$

до переохолоджувача

$$q_{пер}=5;$$

до теплообмінника

$$q_{то}=30;$$

до зрідчувача

$$q_{ож}=5;$$

8. Адіабатичний ККД турбодетандера

$$\eta=0,82.$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 4.2 Матеріальні баланси установки і апаратів

Метою складання матеріальних балансів є визначення долей А, К, R, N.  
Розрахунок проводиться на 1 кмоль переробляемого повітря, тобто  
 $V=1$  кмоль.

1. Рівняння матеріального балансу ПРУ:

$$V=A+K$$

$$V \cdot y_B = K \cdot y_K + A \cdot y_A,$$

де

$$y_B = 20,95 \text{ кмоль/кмоль}$$

$$y_A = 3 \text{ кмоль/кмоль}$$

$$y_K = 99,7 \text{ кмоль/кмоль}$$

$$K = (y_B - y_A) / (y_K - y_A) = \frac{20,95 - 3}{99,7 - 3} = 0,16 \text{ кмоль/кмоль}$$

$$A = V - K = 1 - 0,16 = 0,84 \text{ кмоль/кмоль}$$

1. Рівняння матеріального балансу нижньої колони:

$$V=R+N$$

$$V \cdot y_B = R \cdot x_R + N \cdot x_N$$

$$R = \frac{V(y_B - x_N)}{x_R - x_N} = \frac{1(0,2095 - 0,025)}{0,33 - 0,025} = 0,605 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$$

(2)

де:

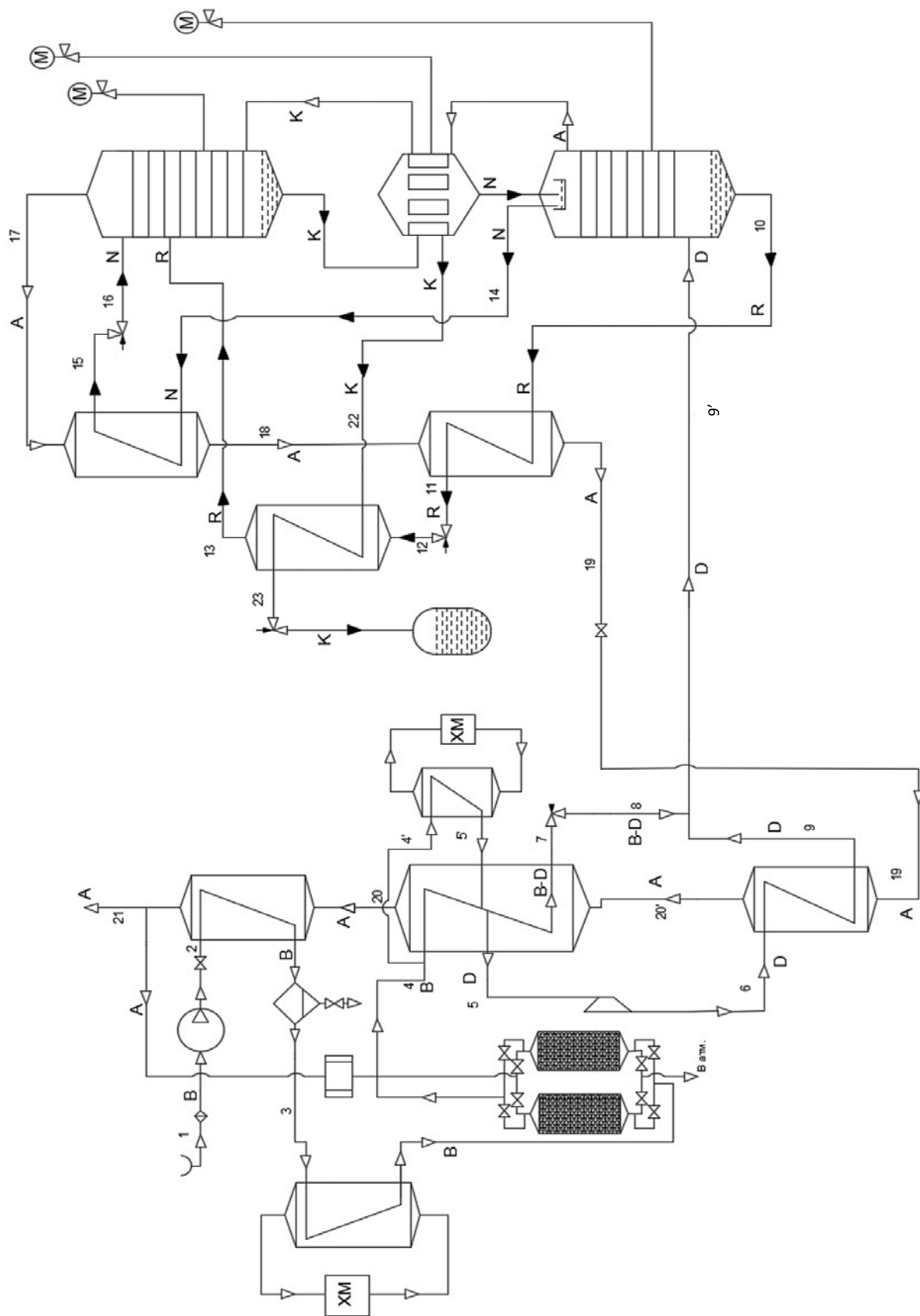
$x_R = 33\% O_2$  – концентрація кубової рідини

$x_N = 2,5\% O_2$  концентрація азотної флегми

$$N = V - R = 1 - 0,605 = 0,395 \text{ кмоль/кмоль}$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 4.3 Схема установки



Мал. 1. Розрахункова схема установки

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

КРМ.КТ.2.631-03.1.19

Лист

14

## 5.Визначення кількості перероблюваного повітря

Розрахункова кількість повітря приймається рівною номінальній продуктивності 4 ВМ 10-50/71 при  $T = 293 \text{ K}$  и  $P_1 = 760 \text{ мм. рт. ст.}$

Кількість перероблюваного повітря:

$$V_{\text{ном}} = 3000 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Мінімальна кількість перероблюваного повітря визначається з урахуванням втрат продуктивності компресора:

$$V_{\text{min}} = 0.9 \cdot V_{\text{ном}}$$

$$V_{\text{min}} = 0.9 \cdot 3000 = 2700 \text{ м}^3/\text{ч} \quad (4.8)$$

Визначення кількості повітря  $K$ , яке отримуємо в установці:

$$V' = \frac{2700}{24 \cdot 3600} = 0,039 \frac{\text{кмоль}}{\text{с}}$$

$$K' = V' \cdot K = 0.039 \cdot 0.16 = 0.00624 \frac{\text{кмоль}}{\text{с}} \text{ или } 510 \frac{\text{кг}}{\text{год}}$$

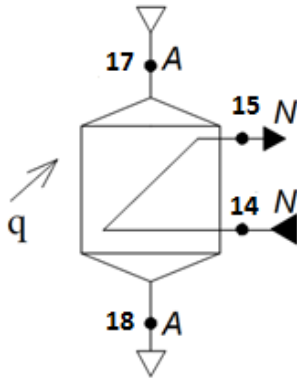
З урахуванням 10% втрат повітря кількість продукційного кисню буде:

$$K' = 0.00624 \cdot 0.9 = 0.006 \frac{\text{кмоль}}{\text{с}} \rightarrow 463,5 \frac{\text{кг}}{\text{год}} \text{ O}_2$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 6. Енергетичні баланси апаратів

### 6.1. Енергетичний баланс теплообмінника переохолоджувача азотної флегми



Мал.2. Переохолоджувач азотної флегми

Метою розрахунку є визначення ентальпії азота після апарату, (точка 18).

$$A \cdot i_{17} + N \cdot i_{14} + q_{nep} = A \cdot i_{18} + N \cdot i_{15}$$

$$I_{18} = i_{17} + \frac{N \cdot (i_{14} - i_{15}) + q_{nep}}{A} \quad (4)$$

де  $i_{14} = -2200,8$  кДж/кмоль – ентальпія азотної флегми, визначаємо по тиску насичення  $P_{14} = 0,7$  МПа и  $T_{14} = 97,9$  К;

$i_{17} = 2273,6$  кДж/кмоль – ентальпія азоту при тиску  $P_{17} = 0,16$  МПа ;

Внаслідок охолодження азотної флегми на 11 К, маємо:

$$T_{15} = T_{14} - \Delta T_N = 97,9 - 11 = 86,9 \text{ К};$$

$I_{15} = -2909$  кДж/кмоль – ентальпія азота при  $P_{15} = 0,7$  МПа;

$$I_{18} = 2273,6 + \frac{0,395 \cdot (-2200,8 - (-2909)) + \frac{5}{3}}{0,806} = 2622,8 \text{ кДж/кмоль};$$

Визначаємо температуру у точці 18 при  $P_{18} = 0,16$  МПа и  $i_{18} = 2622,8$  кДж/кмоль

$$T_{18} = 92,8 \text{ К};$$

Визначення ступеню сухості азотної флегми на вході у верхню колону:

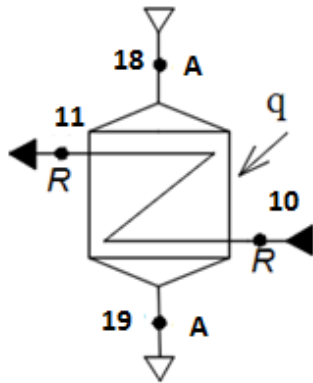
$I_{15} = i_{16} = -2909$  кДж/кмоль, при  $P_{15} = 0,16$  МПа и  $i_{16} = -2909$  кДж/кмоль;

$$x = \frac{i_{16} - i'}{i'' - i'} ;$$

$$x = \frac{-2909 - (-3242,4)}{2273,6 - (-3242,4)} = 0,06 \text{ или } 6\%.$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		16

## 6.2. Енергетичний баланс теплообмінника переохолоджувача кубової рідини



Мал. 3. Переохолоджувач кубової рідини

Метою розрахунку теплового балансу є визначення ентальпії відкидної фракції на виході із переохолоджувача.

$$R \cdot i_{10} - A \cdot i_{18} + q_{nep} = R \cdot i_{11} + A \cdot i_{19}$$

$$I_{19} = i_{18} + \frac{R \cdot (i_{10} - i_{11}) + q_{nep}}{A} \quad (5)$$

де

$$(i_{10} - i_{11}) = C_{pR} \cdot \Delta T_R$$

$$C_{pR} = C_{pK} \cdot x_R + C_{pA} \cdot (1 - x_R), \quad (6)$$

где  $C_{pK}$  – теплоємність рідкого кисню при  $P=0,7$  МПа;

/ Усі дані теплоємностей та ентальпії визначені за допомогою програми для розрахунку термодинамічних властивостей речовин /

$$C_{pK} = 57,3 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)} \quad C_{pA} = 60,9 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)} \quad \text{при } P=0,7 \text{ МПа}$$

$$C_{pR} = 57,3 \cdot 0,33 + 60,9 \cdot (1 - 0,33) = 59,71 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$$

$$i_{11} = x_{O_2} \cdot i'_{O_2} + x_{N_2} \cdot i'_{N_2}$$

При  $P=0,7$  МПа,  $i'_{O_2} = -3049,6$  кДж/кмоль

При  $P=0,7$  МПа,  $i'_{N_2} = -2200,8$  кДж/кмоль

$$i_{10} = 0,33 \cdot (-3049,6) + 0,67 \cdot (-2200,8) = -2481 \text{ кДж/кмоль}$$

$$i_{10} - i_{11} = 59,71 \cdot 3,5 = 209 \text{ кДж/кмоль}$$

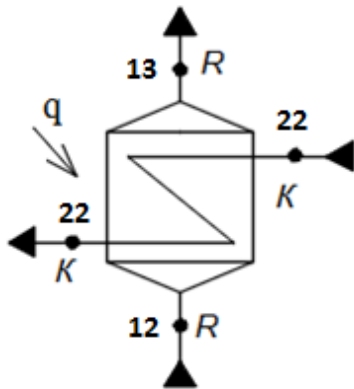
$$i_{11} = -2481 - 209 = -2690 \text{ кДж/кмоль}$$

$$i_{19} = 2622,8 + \frac{0,605 \cdot 209 + \frac{5}{3}}{0,806} = 2781,7 \text{ кДж/кмоль}$$

Цій ентальпії при  $P_{19} = 0,16$  МПа відповідає  $T_{19} = 98,03$  К

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		17

### 6.3. Енергетичний баланс теплообмінника переохолоджувача рідкого кисню



Мал. 4. Переохолоджувач рідкого кисню

Мета розрахунку: визначення параметрів кубової рідини після ТО.

$$R \cdot i_{12} + K \cdot i_{22} + q_{пер} = R \cdot i_{13} + K \cdot i_{23} \quad (7)$$

$$i_{11} = i_{12} = -2690 \text{ кДж/кмоль}$$

$T_{12} = K$  - температура кубової рідини при  $P = 0.16$  МПа и  $i_{12} = -2690$  кДж/кмоль, визначаємо за рівнянням змішування.

где  $i_{22} = -4208$  кДж/кмоль – ентальпія рідкого кисню в насиченому стані при  $P = 0,16$  МПа,  $T_{22} = 93,7$  К.

Температура рідкого кисню після апарату:

$$T_{23} = T_{22} - \Delta T_K;$$

$$T_{23} = 93,7 - 9 = 84,7 \text{ К.}$$

$i_{23} = -4704$  кДж/кмоль – ентальпія рідкого кисню після апарату

при  $P = 0,16$  МПа и  $T_{23} = 84,7$  К.

$$i_{13} = -2690 + \frac{0,194 \cdot (-41208 + 4704) + \frac{5}{3}}{0,605} = -2523 \text{ кДж/кмоль}$$

## Визначення ступеню сухості кубової рідини

Мета: Визначення стану кубової рідини

/ Дані розраховані за допомогою програми розрахунку термодинамічних властивостей крієнних речовин /

$P=0,16$  МПа

$$i'_{N_2} = -3278.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \text{ ентальпія насичення рідкого азоту,}$$

$$i''_{N_2} = 2262.4 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \text{ ентальпія насичення пару азота,}$$

$$i'_{O_2} = -4182.4 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \text{ ентальпія насичення рідкого кисню,}$$

$$i''_{O_2} = 2662.4 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} \text{ ентальпія насичення пару кисню;}$$

$$i'_R = 0.33(-4182.4) + 0.67(-3278.8) = -3577 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} ;$$

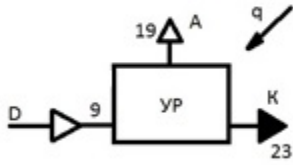
$$i''_R = 0.33 * 2662.4 + 0.67 * 2262.4 = 2394.4 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} ;$$

$$x = \frac{i_{13} - i'_R}{i''_R - i'_R} = \frac{-2578 + 3577}{2394.4 + 3577} = 0.17 \text{ или } 17\%$$

*Тобто у кубовій рідині 17% парів кисню*

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

#### 6.4.Енергетичний баланс вузла ректифікації



Мал.6. Вузел ректифікації

У вузел ректифікації входять наступні елементи: нижня та верхня ректифікаційні колони, конденсатор-випарник, теплообмінники переохолоджувачі азотної флегми, кубової рідини та рідкого кисню.

Мета: визначення ентальпії повітря на вході у вузол ректифікації та температури повітря.

$$B \cdot i_9 + q_{ур} = A \cdot i_{19} + K \cdot i_{23} \quad (10)$$

$$I_9 = A \cdot i_{19} + K \cdot i_{23} - q_{ур}$$

ГДЕ  $q_{ур} = q_{н+} + q_{в.к+} + q_{ки+} + q_{пер}$   
 $q_{ур} = 40 + 60 + 40 + 5 = 155 \text{ кДж/кмоль}$

$$i_9 = (0,84 \cdot 2786 + 0,16 \cdot (-4690) - 155 + 0,198 \cdot 5700) / 0,802 = 2803 \text{ кДж/кмоль}$$

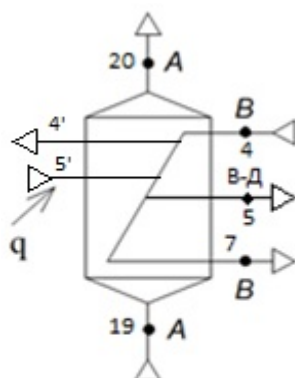
Визначаємо температуру у точці 9 при  $P_9 = 0,7 \text{ МПа}$  и  $i_9 = 2803 \text{ кДж/кмоль}$

$$T_9 = 107 \text{ К}$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		20

## 6.5. Енергетичний баланс основного теплообмінника

Мета: Визначення температури повітря на виході із основного теплообмінника.



$$Bi_5 + Ai_{19} + Bi_4 + q_{TO} = Ai_{20} + (B-D)i_7 + Di_5 + Bi_4$$

$$I_7 = \frac{A(i_{19} - i_{20}) + Bi_4 - Di_5 + q_{TO}}{B - D} \quad (14),$$

$$I_7 = \frac{0,5(7746 - 6276) + 0,84 \cdot 3040 + 15 + 0,84 \cdot 7792 - 0,198 \cdot 4760}{1}$$

$$= 2282 \text{ кДж/кмоль};$$

Визначаємо температуру у точці 7 при  $P_7 = 6,7$  МПа та

$$i_7 = 2282 \text{ кДж/кмоль}; \quad T_7 = 155 \text{ К};$$

Мал. 7. Основний теплообмінник

Визначення ентальпії повітря в т.9 (див. Малюнок 1) в результаті змішування дросельного та детандерного потоків. Ентальпія повітря до дроселю  $I_7$  дорівнює ентальпії повітря після дроселю  $I_8$

$$i_7 = i_8;$$

$$i_9 = i_8(B - D) + Di_6 = 2282 * 0,198 + 0,802 * 2956 = 2822 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}};$$

Температура повітря на вході у нижню колону  $T_9 = 101,7 \text{ К}$ .

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						21
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 6.6. Енергетичний баланс блоку розділення

Мета розрахунку енергобалансу установки:

1. Перевірити чи достатньо в установці холоду для компенсації втрат холоду, тобто перевіряємо рівність правої і лівої частин.
2. Визначення температури відкидного азоту на виході із основного теплообмінника.

$$B\Delta i_K + D\Delta i_D = q_{б.р} + q_{ж} + q_2 \quad (11)$$

де  $\Delta i_K$  – ізотермічний дросель ефект стиснення повітря у компресорі на рівні  $T=283\text{K}$ .

$$\Delta i_K = i_{B 0,1}^{283} + i_{B 4,5}^{283} = 8212,8 - 7747 = 465 \text{ кДж/кмоль}$$

$i_{B 0,1}^{283} = 8212,8 \text{ кДж/кмоль}$  – ентальпія повітря на вході у компресор;

$i_{B 4,5}^{283} = 7747 \text{ кДж/кмоль}$  – ентальпія повітря після компресору;

$q_{б.р} = 185 \text{ кДж/кмоль}$  – тепло приливи до блоку розділення;

$q_2 = q_{нео}^A$  – недорекуперація азоту;

$$q_{нео}^A = A(i_{A 0,1}^{283} - i_{20})$$

$$q_{нео}^A = 0,806(8235 - 7267) = 968 \text{ кДж/кмоль}$$

де  $i_{A 0,1}^{283} = 8235 \text{ кДж/кмоль}$  – ентальпія азоту за нормальних умов;

$\Delta i_D$  – холод, виробляє мий у детандері.

$$\Delta i_D = D(i_5 - i_6) = D(i_5 - i_{6s}) \eta = 0.802 * 0.82 * (4760 - 2500) = 1486 \text{ кДж/кмоль},$$

де  $\eta = 0.82$  – адиабатичний ККД турбодетандера,

$$i_6 = i_5 - \eta(i_5 - i_{6s}),$$

$$S_5 = S_{6s};$$

$T.5$  по  $P=0,7 \text{ МПа}$  и  $T=200 \text{ K}$ ,  $S_5 = 124 \text{ кДж/(кмоль*К)}$ ,  $i_5 = 4760 \text{ кДж/кмоль}$ ;

$$i_6 = 6226 - 0.65(6226 - 1893) = 2372.8 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}};$$

$$T_6 = 112 \text{ K};$$

$$B\Delta i_K + D\Delta i_D = q_{б.р} + q_{ж} + q_2;$$

$$q_{ж} = K_{ж}(i_k - i_{23});$$

$$K_{ж} = \frac{3126 - 185 + 821}{12926} = 0,16 \text{ или } 16\%;$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						22
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Визначення розбіжності ентальпій:

$$\text{Похибка складає } \frac{2822-2715}{2822} * 100 = 3,8 \%$$

Цей результат попадає у діапазон допустимих значень (1,5~5)%

Перевіряємо енергобаланс блоку розділення:

$$B\Delta i_K + D\Delta i_D = q_{б.р} + q_{ж} + q_2;$$

$$465 + 0,802 * 1486 + 1470 = 185 + 0,16 * 12926 + 821$$

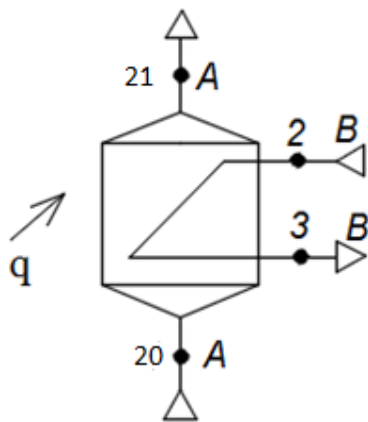
$$3126 = 3084$$

Холоду в установці виробляється на 42 кДж/кмоль більше, ніж витрачається.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 6.7. Енергетичний баланс азотного теплообмінника зріджувача

Метою складання балансу є визначення параметрів азоту на виході із зріджувача.



Мал.9. Азотний теплообмінник зріджувач.

$$Vi_2 + A i_{20} + q_{ож} = Vi_3 + Ai_{21}$$

$$i_{21} = i_{20} + \frac{\hat{A}(i_2 - i_3) + q_{\hat{A}}}{A} \quad (17)$$

де

$i_2 = 8300$  кДж/кмоль – ентальпія вологого повітря при  $P = 6,7$  МПа и  $T = 300$  К

$i_3 = 7680$  кДж/кмоль – ентальпія вологого повітря при  $P = 6,7$  МПа и  $T = 281$  К

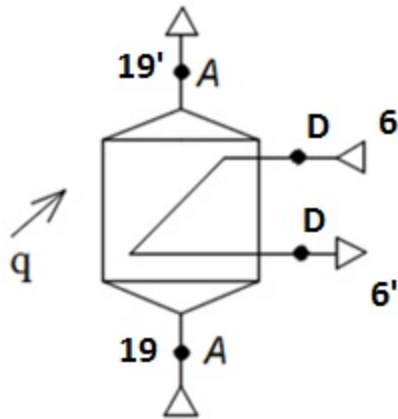
$$i_{21} = 7792 + \frac{(8430 - 7828) + 5}{0,806} = 8573 \text{ кДж/кмоль}$$

Цьому значенню  $i_{21} = 8573$  відповідає  $T_{21} = 294$

К при  $P = 0,16$  МПа.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 6.8 Енергетичний баланс детандерного теплообмінника



Мета: Визначення ентальпії детандерного потоку на виході із теплообмінника.

$$Ai_{19} + Di_6 + q = Ai_{19'} + Di_{6'}$$

$$i_{6'} = \frac{A(i_{19} - i_{19'}) + Di_6 + q}{D};$$

$$i_{19'} = \frac{0.806(2956 - 2715) + 0.802 * 2786 + 5}{0.802} = 3040 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}};$$

Температура у цій точці  $T_{19'} = 107\text{K}$ .

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 7.Визначення питомих витрат енергії

### 7.1 Визначення загальної питомої витрачаємої потужності:

Згідно паспортним даним компресора 4ВМ10-50/71, споживана потужність при тиску нагнітання складає:

$$N_{KM} = 630 \text{ кВт} \cdot \text{г};$$

Потужність, споживана холодильною машиною:

$$N_{ПОТР.} = 18 \text{ кВт} \cdot \text{ч},$$

З урахування того, що машина працює 50% часу при експлуатації установки, то витрачаємо потужність складає:

$$N_{XM} = 0.5 \cdot N_{ПОТР.}, \quad (18)$$

$$N_{XM} = 0.5 \cdot 18 = 9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Встановлена потужність електронагрівача блока очистки  $N_{VCT.} = 60 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ .

Тривалість роботи електронагрівача за цикл роботи блока очистки складає 32%:

$$N_{Э.Н.} = 0.32 \cdot N_{VCT.}, \quad (19)$$

$$N_{Э.Н.} = 0.32 \cdot 60 = 19 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Потужність, яка споживається електродвигуном водяного насосу:

$$N_{B.H.} = 2 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

Потужність, яка споживається електродвигуном маслонасосу детандера :

$$N_{M.H.} = 3.5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Потужність, яка споживається щитом управління  $N_{щ} = 2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ ;

Загальна потужність, що споживається:

$$N = N_{KM} + N_{XM} + N_{Э.Н.} + N_{В.Н.} + N_{М.Н.} + N_{щ}, \quad (20)$$

$$N = 630 + 9 + 19 + 2 + 3.5 + 2 = 665.5 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

Загальна потужність з урахування неповної завантаженості компресору:

$$N_{KM} = \frac{698 \cdot 3000}{775} = 2701 \text{ кВт} \cdot \text{ч} \quad (21)$$

$$N = 2701 + 630 + 9 + 19 + 2 + 3.5 + 2 = 3366,5 \text{ кВт} \cdot \text{ч};$$

Питомі витрати електроенергії на виробництво  $1 \text{ м}^3$  рідкого кисню:

$$N_{уд}^K = \frac{N}{П^K},$$

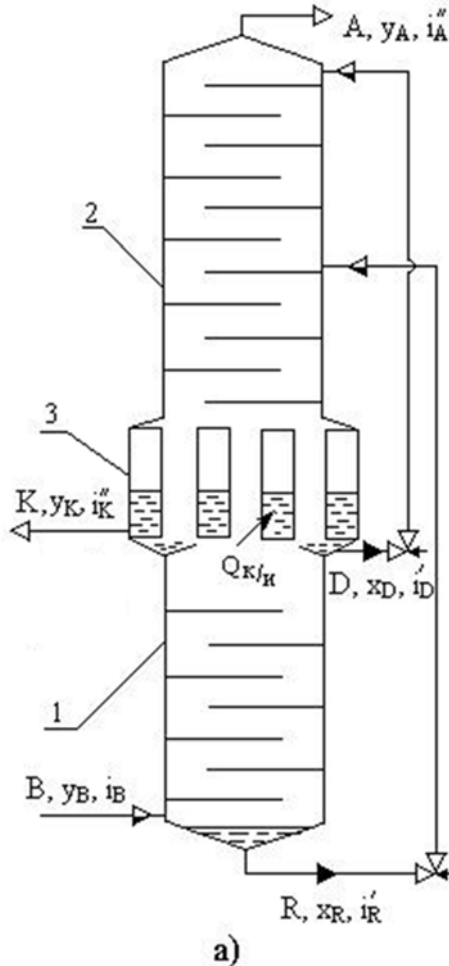
$$N_{уд}^K = \frac{3366,5}{3000} = 1,12 \text{ кВт}. \quad (22)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 8. Розрахунок процесу ректифікації

### 8.1 Розрахунок ректифікації в нижній колоні

Визначення кількості теоретичних тарілок розраховується методом Мак-Кеба і Тіле.



Визначення числа ректифікаційних тарілок в нижній колоні в діаграмі Y-x  
Складемо рівняння балансу нижньої колони:

$$G=g+N$$

$$Gy=gx+Nx_N$$

Навантаження на конденсатор-випарник визначимо із балансу ВРК:

$$Q_{ки} = Ai_{17} + Ki_{22} - Ni_{16} - Ri_{13} - q_{вк} - 0,5q_{ки};$$

Де  $A=0,84$  кмоль/кмоль;

$K=0,16$  кмоль/кмоль;

$R=0,605$  кмоль/кмоль;

$N=0,395$  кмоль/кмоль;

$$Q_{ки} = 0,84 \cdot 2275 + 0,16 \cdot (-4208) - 0,395 \cdot (-2909) - 0,605 \cdot (-2528) - 70 - 20 = 3826 \text{ кДж/кмоль};$$

Витрату пара визначимо по навантаженню конденсатора - випарника і теплоті пароутворення  $r$ :

$$G = \frac{Q_{к-в}}{r} \quad (1.31)$$

де:  $r = 4841$  кДж/кмоль (9.4)

$$G = \frac{3826}{4841} = 0,79 \text{ кмоль/кмоль}$$

Витрату рідини визначемо з балансу :

$$g = G - N = 0,79 - 0,395 = 0,395 \text{ кмоль/кмоль}$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Рівняння робочої лінії для нижньої колони

$$y = \frac{g}{G} x + \frac{N}{G} x_N \quad (1.33)$$

$$y = \frac{0,395}{0,79} x + \frac{0,395}{0,79} \cdot 97,5$$

$$y = 0,5x + 48,75$$

при  $x=0$   $y=48,75\%$  об  $N_2$

при  $x=x_N=97,5$   $y=97,5\%$  об  $N_2$

З побудови отримуємо число теоретичних тарілок в нижній колоні:

$$n_T = 5,8 \text{ шт.}$$

Приймаючи ККД тарілки  $\eta = 0,3$  виходячи з допущень методу розрахунку визначимо дійсне число тарілок.:

$$n_d = n_T \eta \quad (1.34)$$

$$n_d = 5,8 / 0,3 = 19,3 \text{ шт.}$$

Приймаємо 20 шт.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		29

## 9. Розрахунок ректифікаційної колони

Основна мета розрахунку – визначення конструктивних параметрів ректифікаційної колони і гідравлічного опору колони.

Ректифікаційна колона проекрованої установки являє собою циліндричний посуд із внутрішнім діаметром  $700\text{мм}$ , у якому встановлено 20 алюмінієві поперечно-точних тарілок із сепарацією фаз. Відстань між тарілками  $H_T = 50\text{мм}$ . По висоті колони по черзі встановлені тарілки із двома та одним зливним карманом, тим самим забезпечуючи поперемінний потік рідини.

Гідравлічний опір колони визначається, як сума опорів кожної тарілки  $P_{\text{кол.}} = n \cdot \Delta P_T$ , де  $n$  в – число тарілок;

$\Delta P_T$  – опір тарілки.

Виконуємо гідравлічний розрахунок тарілки, який перевіряє нормальну працездатність колони та підбираємо найбільш оптимальний діаметр перфорації тарілок.

Середній опір тарілки визначимо виходячи із розрахунку верхнього та нижнього перерізу колони.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						30
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## Розрахунок верхнього перерізу колони

Дані для розрахунку:

Тип тарілки – двозливна.

Кількість пару в перерізі  $G_1 = 0.79$  кмоль/кмоль;

Кількість рідини у перерізі  $g_1 = 0.395$  кмоль/кмоль;

Концентрація пару та рідини  $y_1 = x_1 = 97,5\%$  об.  $N_2$ ;

Щільність пару (при 0,7МПа)  $\rho^n = 27,35$  кг/м<sup>3</sup>;

Щільність рідини(при 0,7МПа)  $\rho^{жс} = 683,7$  кг/м<sup>3</sup>;

Щільність азоту при нормальних умовах  $\rho_{Н.У.}^{N_2} = 1.167$  кг / м<sup>3</sup>;

Тиск в перерізі  $P_B = 0.7$  МПа;

Температура  $T_B = 97,9$  К;

Коефіцієнт поверхневого натягу:  $\sigma = 0,00454$  Н/м;

Витрата рідини в робочих умовах:

$$L_p = \frac{g_1 \cdot B \cdot \rho_{Н.У.}^{N_2}}{\rho^ж}, \quad (6.1)$$

$$L_p = \frac{0.395 \cdot 2700 \cdot 1.167}{683.7} = 1.72 \text{ м}^3/\text{год};$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						31
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Витрата пару в робочих умовах:

$$G_p = \frac{G_1 \cdot B \cdot \rho_{H.V.}^{N_2}}{\rho^{\pi}}, \quad (6.2)$$

$$G = \frac{0.79 \cdot 2700 \cdot 1.167}{27.35} = 78.74 \text{ м}^3/\text{Год};$$

Ширина перфораційної полоси – 185мм;

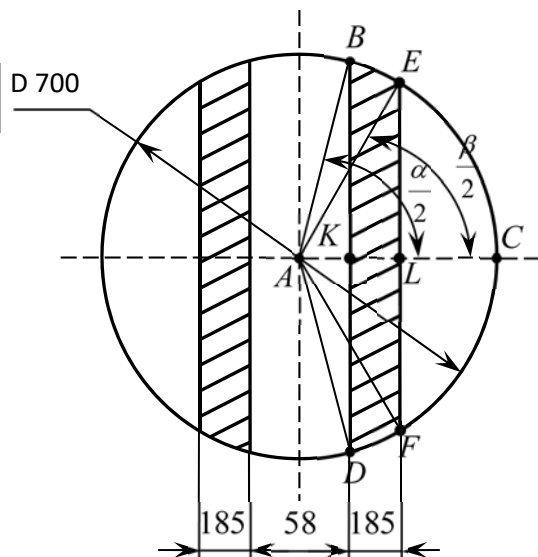
Діаметр перфорованого листа  $D_T = 2R = 700\text{мм}$ ;

Ширина прийомного карману – 58мм;

Площа барботажу

$$F_B = 2F_{BEFD} \quad (6.3)$$

Площа сектора  $ABCD$ :



$$F_{ABCD} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \alpha}{360} \quad (6.4)$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{AK}{AB} \quad (6.5)$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{29}{350} = 0.0829,$$

$$\frac{\alpha}{2} = 85.2^\circ,$$

$$\alpha = 170.5^\circ,$$

Мал. 6.1 – Схема  
двозливної тарілки

$$F_{ABCD} = \frac{\pi \cdot 350^2 \cdot 170.5}{360} = 0.1823 \text{ м}^2;$$

Площа трикутника  $ABD$ :

$$F_{\triangle ABD} = AK \cdot BK, \quad (6.6)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		32

$$BK = \sqrt{R^2 - AK^2}, \quad (6.7)$$

$$BK = \sqrt{0.350^2 - 0.029^2} = 0.3488 \text{ м},$$

$$F_{\Delta ABD} = 0.029 \cdot 0.3488 = 0.0101 \text{ м}^2;$$

Площа сектора  $AECF$  :

$$F_{AECF} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \beta}{360}, \quad (6.8)$$

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{AL}{AE}, \quad (6.9)$$

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{214}{350} = 0.611,$$

$$\frac{\beta}{2} = 52.3^\circ,$$

$$\beta = 104.6^\circ,$$

$$F_{AECF} = \frac{\pi \cdot 0.350^2 \cdot 104.6^\circ}{360} = 0.1118 \text{ м}^2;$$

Площа трикутника  $AEF$  :

$$F_{\Delta AEF} = AL \cdot EL, \quad (6.10)$$

$$EL = \sqrt{R^2 - AL^2}, \quad (6.11)$$

$$EL = \sqrt{0.350^2 - 0.214^2} = 0.2770 \text{ м},$$

$$F_{\Delta AEF} = 0.214 \cdot 0.277 = 0.0593 \text{ м}^2;$$

Площа сегмента  $ECFL$  :

$$F_{ECF} = F_{AECF} - F_{\Delta AEF}, \quad (6.12)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$F_{ECF} = 0.1118 - 0.0593 = 0.0525 \text{ м}^2;$$

Площа однієї перфорованої полоси:

$$F_{BEFD} = F_{ABCD} - F_{ECFL} - F_{\Delta ABD}, \quad (6.13)$$

$$F_{BEFD} = 0.1823 - 0.0525 - 0.0101 = 0.1197 \text{ м}^2;$$

Площа барботажу:

$$F_B'' = 2 \cdot 0.1197 = 0.2394 \text{ м}^2;$$

Площа щілинного зазору:

$$F_{щ}'' = 2 \cdot l_{щ}'' \cdot m, \quad (6.14)$$

де  $l_{щ}'' = 512 \text{ мм}$  – довжина щілини для двозливної тарілки,

$m = 19.5 \text{ мм}$  – ширина щілини,

$$F_{щ}'' = 2 \cdot 0.512 \cdot 0.0195 = 0.020 \text{ м}^2;$$

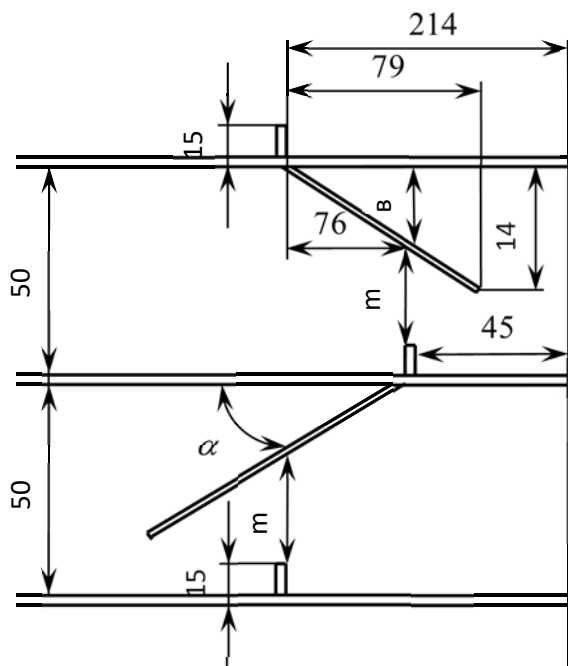


Рисунок 6.2 – Схема взаємного розташування тарілок

Швидкість барботажу:

$$W_B = \frac{G_P}{3600 \cdot F_B''}, \quad (6.15)$$

$$W_A = \frac{78.74}{3600 \cdot 0.2394} = 0.091 \text{ м/с};$$

Швидкість пара в щілинному зазорі:

$$W_{щ} = \frac{G_P}{3600 \cdot F_{щ}''}, \quad (6.16)$$

$$W_u = \frac{78.74}{3600 \cdot 0.02} = 1.09 \text{ м/с};$$

Щільність зрошування:

$$i'' = \frac{L_P}{P_{C.П}''}, \quad (6.17)$$

де  $P_{C.П}^I$  – периметр зливних перегородок,

$$P_{C.П}^I = 2 \cdot l_{C.П}'' , \quad (6.18)$$

$l_{C.П}'' = 0.512 \text{ м}$  – довжина зливної перегородки,

$$P_{C.П}^I = 2 \cdot 0.512 = 1.024 \text{ м} ,$$

$$i^I = \frac{1.72}{1.024} = 1.68 \text{ м}^2/\text{Год};$$

Коефіцієнт опору щілинного зазору:

$$\xi_{щ} = 1.8 \cdot \sin \gamma + 1, \quad (6.19)$$

де  $\gamma$  – кут нахилу відбійника,

$$\text{tg} \gamma = \frac{14}{79} = 0.1772,$$

$$\gamma = 10^\circ ,$$

$$\xi_{щ} = 1.8 \cdot \sin(10^\circ) + 1 = 1.313 ;$$

Критична глибина потоку:

$$h_{кр.} = 4.3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L_P}{P_{ПЕР.}}\right)^2 \cdot \frac{1}{g}}, \quad (6.20)$$

де  $P_{ПЕР.} = 1.02 \text{ м}$  – периметр переливу, рівний двом довжинам зливних карманів,

$g = 9.81 \text{ м}/\text{с}^2$  – прискорення вільного падіння,

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$h_{\text{вд.}} = 4.3 \sqrt[3]{\left(\frac{1.72}{1.02}\right)^2 \frac{1}{9.81}} = 2.85 \text{ мм};$$

Висота найбільш вузького перерізу кармана:

$$S_K = 1.34 \cdot h_{\text{кр.}}, \quad (6.21)$$

$$S_K = 1.34 \cdot 2.85 = 3.81 \text{ мм};$$

Рекомендовано  $S_K \geq 5 \text{ мм}$ , приймаємо  $S_K = 5 \text{ мм}$ .

Статичний рівень рідини на тарілці:

$$h = 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 5.48 \cdot i^{0.1} + 8 \cdot \sqrt{W_B \cdot \sqrt{\rho^H}} - 3.85 \right), \quad (6.22)$$

$$h = 0.7 \cdot 10^{-3} (5.48 \cdot 1.68^{0.1} + 8 \cdot \sqrt{0.091 \sqrt{27.35}} - 3.85) = 5.2 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Опір щілинного зазору незрошуваної тарілки:

$$\Delta P_{\text{щ}}^C = \xi_{\text{щ}} \cdot \frac{W_{\text{щ}}^2 \cdot \rho^H}{2}, \quad (6.23)$$

$$\Delta P_{\text{щ}}^C = 1.313 \cdot \frac{1.09^2 \cdot 27.35}{2} = 22 \text{ Па};$$

Опір щілинного зазору:

$$\Delta P_{\text{щ}} = 12.753 \cdot \left[ i^H \cdot (\sin \gamma + 1) + 2(\sin \gamma + 0.1) \right], \quad (6.24)$$

$$\Delta P_{\text{щ}} = 12.753 (1.68 (\sin 10^\circ + 1) + 2(\sin 10^\circ + 0.1)) = 33 \text{ Па};$$

Визначення площі отворів:

$$F_O = 0.91 \cdot \left( \frac{d_O}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot F_B^H; \quad (6.25)$$

$$\text{При } d_O = 0.9 \text{ мм } F_O^{0.9} = 0.91 \cdot \left( \frac{0.9 \cdot 10^{-3}}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0.2394 = 0.0167 \text{ м}^2;$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						36
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } F_o^{1.0} = 0.91 \cdot \left( \frac{1.0 \cdot 10^{-3}}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0.2394 = 0.0206 \text{ м}^2;$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } F_o^{1.1} = 0.91 \cdot \left( \frac{1.1 \cdot 10^{-3}}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0.2394 = 0.0250 \text{ м}^2;$$

Швидкість пара в отворах:

$$W_o = W_B \cdot \frac{F_B^{II}}{F_o} ; \quad (6.26)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } W_o^{0.9} = 0.091 \cdot \frac{0.2394}{0.0167} = 1.30 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } W_o^{1.0} = 0.091 \cdot \frac{0.2394}{0.0206} = 1.06 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } W_o^{1.1} = 0.091 \cdot \frac{0.2394}{0.0250} = 0.87 \text{ м/с};$$

Коефіцієнт опору отворів:

$$\xi_o = 1.4148 \cdot \left( \frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{d_o} \right)^{0.2} \cdot \left( 1 - \left( \frac{F_o}{F_B^{II}} \right) \right)^2 ; \quad (6.27)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \xi_o^{0.9} = 1.4148 \cdot \left( \frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{0.9 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.2} \cdot \left( 1 - \left( \frac{0.0167 \cdot 10^{-6}}{0.2394 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.82 ;$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \xi_o^{1.0} = 1.4148 \cdot \left( \frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{1.0 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.2} \cdot \left( 1 - \left( \frac{0.0206 \cdot 10^{-6}}{0.2394 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.78 ;$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \xi_o^{1.1} = 1.4148 \cdot \left( \frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{1.1 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.2} \cdot \left( 1 - \left( \frac{0.0250 \cdot 10^{-6}}{0.2394 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.74 ;$$

Мінімально допустима швидкість пара в отворах тарілки:

$$W_{II \text{ MIN}} = 0.0364 \cdot \xi_o^{-0.625} \cdot \left( \frac{h}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho^{\text{ж}}}{\rho^{\text{II}}}} ; \quad (6.28)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		37

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } W_{II \text{ MIN}}^{0.9} = 0.0364 \cdot 1.82^{-0.625} \left( \frac{5.2 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{683.7}{27.35}} = 1.01 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } W_{II \text{ MIN}}^{1.0} = 0.0364 \cdot 1.78^{-0.625} \left( \frac{5.2 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{683.7}{27.35}} = 1.02 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } W_{II \text{ MIN}}^{1.1} = 0.0364 \cdot 1.74^{-0.625} \left( \frac{5.2 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{683.7}{27.35}} = 0.96 \text{ м/с};$$

Кожен із варіантів перфорації забезпечує роботу тарілки повним перерізом без провалу рідини, так як для кожного випадку виконується умова  $W_{II \text{ MIN}} < W_o$ .

Опір незрошуваної тарілки:

$$\Delta P_C = \xi_o \cdot \frac{W_o^2 \cdot \rho^{\text{II}}}{2}; \quad (6.29)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_C^{0.9} = 1.82 \frac{1.3^2 \cdot 27.35}{2} = 42 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \Delta P_C^{1.0} = 1.78 \frac{1.06^2 \cdot 27.35}{2} = 28 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_C^{1.1} = 1.74 \frac{0.87^2 \cdot 27.35}{2} = 18 \text{ Па};$$

Визначення втрат напору від поверхневого натягу:

$$\text{Для } d_o \leq 1.0 \text{ мм}, \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{d_o}; \quad (6.30)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_\sigma^{0.9} = \frac{4 \cdot 4.545 \cdot 10^{-3}}{0.0009} = 20 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \Delta P_\sigma^{1.0} = \frac{4 \cdot 4.545 \cdot 10^{-3}}{0.001} = 18 \text{ Па};$$

$$\text{Для } d_o > 1.0 \text{ мм}, \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{1.3 \cdot d_o + 0.08 \cdot d_o^2}; \quad (6.31)$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_\sigma^{1.1} = \frac{4 \cdot 4.545 \cdot 10^{-3}}{1.3 \cdot 0.0011 + 0.08 \cdot 0.0011^2} = 13 \text{ Па};$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						38
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Повний опір тарілки:

$$\Delta P_T^II = \Delta P_{ш}^C + \Delta P_{ш} + \Delta P_C + \Delta P_\sigma + \rho^{ж} \cdot g \cdot h; \quad (6.32)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_T^II = 22 + 33 + 42 + 20 + 683.7 \cdot 9.81 \cdot 5.2 \cdot 10^{-3} = 152 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм}; \Delta P_T^II = 22 + 33 + 28 + 18 + 683.7 \cdot 9.81 \cdot 5.2 \cdot 10^{-3} = 136 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_T^II = 22 + 33 + 18 + 13 + 683.7 \cdot 9.81 \cdot 5.2 \cdot 10^{-3} = 121 \text{ Па};$$

Максимально допустимий опір тарілки:

$$\Delta P_{T \text{ MAX}} = 0.00826 \cdot \rho^{ж} \cdot \left( H_T + 15 - 1.195 \cdot S_K - 2.1 \cdot h_{KP} - 1.45 \cdot \frac{h_{KP}^3}{S_K^2} \right), \quad (6.33)$$

$$\Delta P_{T \text{ MAX}} = 0.00826 \cdot 683.7 \cdot \left( 50 + 15 + 1.195 \cdot 5 - 2.1 \cdot 2.85 - 1.45 \frac{2.85^3}{5^2} \right) = 360 \text{ Па};$$

Кожен із варіантів перфорації задовольняє умову  $\Delta P_T^II < \Delta P_{T \text{ MAX}}$ , отже колона працює стабільно без зависань.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## Розрахунок нижнього перерізу

Дані для розрахунку:

Тип тарілки – однозливна.

Кількість пару і рідини визначаємо за ступенем сухості потоку повітря, яке входить у нижню колону:  $x = 0,92$ .

Кількість пару в перерізі  $G_2 = 0.607$  кмоль/кмоль;

Кількість рідини в перерізі  $g_2 = 0.41$  кмоль/кмоль;

Температурі кипіння чистих продуктів при  $P = 0.7$  МПа:

Кисню  $T_1 = 113.3$  К;;

Азоту  $T_2 = 98.1$  К;

Щільність кисню при нормальних умовах  $\rho_{НУ}^{O_2} = 1.354$  кг/м<sup>3</sup>;

Концентрації:

Пара  $y_2 = 82.0$  % об N<sub>2</sub>;

Рідини  $x_2 = 65.5$  % об N<sub>2</sub>;

Щільності чистих насичених рідких продуктів:

Кисню  $\rho^{Kж} = 1002,4$  кг/м<sup>3</sup>;

Азоту  $\rho^{Aж} = 682,1$  кг/м<sup>3</sup>;

Щільності чистих газоподібних продуктів:

Кисню  $\rho^K = 26,207$  кг/м<sup>3</sup>;

Азоту  $\rho^A = 27,751$  кг/м<sup>3</sup>;

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Щільність пару в нормальних умовах:

$$\rho_{HY}^{\Pi} = \rho_{HY}^A y_2 + \rho_{HY}^K (1 - y_2) x, \quad (6.34)$$

$$\rho_{HY}^{\Pi} = 1.167 \cdot 0.82 + 1.354(1 - 0.82) = 1.201 \text{ кг/м}^3;$$

Щільність рідини в нормальних умовах:

$$\rho_{HY}^{\mathcal{K}} = \rho_{HY}^A x_2 + \rho_{HY}^K (1 - x_2), \quad (6.35)$$

$$\rho_{HY}^{\mathcal{K}} = 1.167 \cdot 0.655 + 1.354(1 - 0.655) = 1.231 \text{ кг/м}^3;$$

Щільність суміші пару:

$$\rho_{\Pi} = \frac{\rho_{HY}^{\Pi}}{\frac{\rho_{HY}^A}{\rho^A} \cdot y_2 + \frac{\rho_{HY}^K}{\rho^K} \cdot (1 - y_2)} \quad (6.36)$$

$$\rho_{\Pi} = \frac{1.201}{\frac{1.167}{27.751} \cdot 0.82 + \frac{1.354}{26.207} (1 - 0.82)} = 27.43 \text{ кг/м}^3;$$

Щільність суміші рідини:

$$\rho_{\mathcal{K}} = \frac{\rho_{HY}^{\mathcal{K}}}{\frac{\rho_{HY}^A}{\rho^{A\mathcal{K}}} \cdot x_2 + \frac{\rho_{HY}^K}{\rho^{K\mathcal{K}}} \cdot (1 - x_2)} \quad (6.37)$$

$$\rho_{\mathcal{K}} = \frac{1.231}{\frac{1.167}{682.1} \cdot 0.655 + \frac{1.354}{1002.4} (1 - 0.655)} = 755.85 \text{ кг/м}^3;$$

Коефіцієнт поверхневого натягу:

Кисню:  $\sigma_1 = 0,0077417 \text{ Н/м};$

Азоту:  $\sigma_2 = 0,0046006 \text{ Н/м};$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

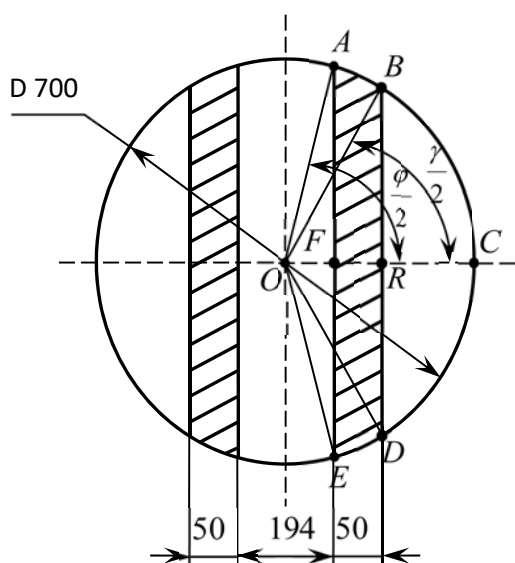
Поверхневий натяг суміші:

$$\sigma = \sigma_1 \cdot x_1 + \sigma_2 \cdot x_2, \quad (6.38)$$

$$\sigma = 0,0077417 \cdot 0.315 + 0,0046006 \cdot 0.685 = 5.6 \cdot 10^{-3} \text{ Па};$$

Визначення площі барботажу однозливної тарілки:

$$F_B^I = 2 \cdot F_{ABDE}; \quad (6.39)$$



Ширина не перфорованих полос 50 мм .

Ширина зливної кармана 195 мм .

Площа сектора  $OACE$  :

$$F_{OACE} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \varphi}{360}, \quad (6.40)$$

Мал. 6.3 – Схема  
однозливної тарілки

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \frac{OF}{OA}, \quad (6.41)$$

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \frac{0.097}{0.350} = 0.2771,$$

$$\frac{\varphi}{2} = 73.9^\circ,$$

$$\varphi = 147.8^\circ;$$

$$F_{OACE} = \frac{\pi \cdot 0.350^2 \cdot 147.8^\circ}{360} = 0.158 \text{ м}^2;$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

КРМ.КТ.2.631-03.1.19

Лист

42

Площа сектора  $OBCD$ :

$$F_{OBCD} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \gamma}{360}, \quad (6.42)$$

$$\cos \frac{\gamma}{2} = \frac{OR}{OB}, \quad (6.43)$$

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \frac{0.147}{0.350} = 0.42,$$

$$\frac{\varphi}{2} = 65.2^\circ,$$

$$\varphi = 130.4^\circ;$$

$$F_{OBCD} = \frac{\pi \cdot 0.350^2 \cdot 130.4^\circ}{360} = 0.1393 \text{ м}^2;$$

Площа трикутника  $OAE$ :

$$F_{\Delta OAE} = \frac{1}{2} \cdot OF \cdot AE, \quad (6.44)$$

$$AE = 2 \cdot \sqrt{OA^2 - OF^2}, \quad (6.45)$$

$$AE = 2 \cdot \sqrt{0.350^2 - 0.097^2} = 0.673 \text{ м},$$

$$F_{\Delta OAE} = \frac{1}{2} \cdot 0.097 \cdot 0.673 = 0.0326 \text{ м}^2;$$

Площа трикутника  $OBD$ :

$$F_{\Delta OBD} = \frac{1}{2} \cdot OR \cdot BD, \quad (6.46)$$

$$BD = 2 \cdot \sqrt{OB^2 - OR^2}, \quad (6.47)$$

$$BD = 2 \cdot \sqrt{0.350^2 - 0.147^2} = 0.6353 \text{ м},$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$F_{\Delta OBD} = \frac{1}{2} \cdot 0.147 \cdot 0.6353 = 0.0467 \text{ м}^2;$$

Площа сегмента  $BCD$ :

$$F_{BCD} = F_{OBCD} - F_{\Delta OBD}, \quad (6.48)$$

$$F_{BCD} = 0.1393 - 0.0467 = 0.0926 \text{ м}^2;$$

Площа однієї перфорованої полоси:

$$F_{ABDE} = F_{OACE} - F_{BCD} - F_{\Delta OAE}, \quad (6.49)$$

$$F_{ABDE} = 0.158 - 0.0926 - 0.0326 = 0.0328 \text{ м}^2;$$

Площа барботажу:

$$F_B^I = 2 \cdot 0.0328 = 0.0656 \text{ м}^2,$$

Витрата рідини в робочих умовах:

$$L_P = \frac{g_2 \cdot B \cdot \rho_{H.Y.}^{\text{ж}}}{\rho^{\text{ж}}}, \quad (6.50)$$

$$L_P = \frac{0.293 \cdot 2256 \cdot 1.167}{755.85} = 1.02 \text{ м}^3/\text{ч};$$

Витрата пару в робочих умовах:

$$G_P = \frac{G_2 \cdot B \cdot \rho_{H.Y.}^{\text{п}}}{\rho^{\text{п}}}, \quad (6.51)$$

$$G_P = \frac{0.707 \cdot 2256 \cdot 1.201}{27.43} = 69.84 \text{ м}^3/\text{ч};$$

Швидкість барботажу:

$$W_B^I = \frac{G_P}{3600 \cdot F_B^I}, \quad (6.52)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$W_A^2 = \frac{69.84}{3600 \cdot 0.0656} = 0.296 \text{ м/с};$$

Площа щілинного зазору:

$$F_{щ}^I = l_{щ}^I \cdot m, \quad (6.53)$$

де  $l_{щ}^I = 660 \text{ мм}$  – довжина щілини для однозливної тарілки.

$m = 19.5 \text{ мм}$  – ширина щілини,

$$F_{щ}^I = 2 \cdot 0.660 \cdot 0.0195 = 0.0257 \text{ м}^2; \quad (6.54)$$

Швидкість пара в щілинному зазорі:

$$W_{щ} = \frac{G_p}{3600 \cdot F_{щ}^I}, \quad (6.55)$$

$$W_{щ} = \frac{69.84}{3600 \cdot 0.0257} = 0.754 \text{ м/с};$$

Щільність зрошування:

$$i^I = \frac{L_p}{P_{с.п}^I}, \quad (6.56)$$

де  $P_{с.п}^I$  – периметр зливних перегородок,

$$P_{с.п}^I = 2 \cdot l_{с.п}^II, \quad (6.57)$$

$l_{с.п}^II = 0.655 \text{ м}$  – довжина зливної перегородки,

$$P_{с.п}^I = 2 \cdot 0.655 = 1.31 \text{ м},$$

$$i^I = \frac{1.02}{1.31} = 0.779 \text{ м}^2/\text{ч};$$

Критична глибина потоку:

$$h_{кр.} = 4.3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L_p}{P_{пер.}}\right)^2 \cdot \frac{1}{g}}, \quad (6.58)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

де  $P_{пер.} = 1.305 м$  – периметр переливу, рівний двом довжинам зливних карманів,

$g = 9.81 м/с^2$  – прискорення вільного падіння,

$$h_{кр.} = 4.3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{1.02}{1.305}\right)^2 \cdot \frac{1}{9.81}} = 1.7 \text{ мм};$$

Висота найбільш вузького перерізу кармана:

$$S_K = 1.34 \cdot h_{кр.}, \quad (6.59)$$

$$S_K = 1.34 \cdot 1.7 = 2.28;$$

Рекомендовано  $S_K \geq 5 мм$ , приймаємо  $S_K = 5 мм$ .

Статичний рівень рідини на тарілці:

$$h = 0.7 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 5.48 \cdot i^{0.1} + 8 \cdot \sqrt{W_B} \cdot \sqrt{\rho^H} - 3.85 \right), \quad (6.60)$$

$$h = 0.7 \cdot 10^{-3} (5.48 \cdot 0.779^{0.1} + 8 \cdot \sqrt{0.296} \cdot \sqrt{27.43} - 3.85) = 8.01 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Опір щілинного зазору незрошуваної тарілки:

$$\Delta P_{щ}^C = \xi_{щ} \cdot \frac{W_{щ}^2 \cdot \rho^H}{2}, \quad (6.61)$$

$$\Delta P_{щ}^C = 1.313 \cdot \frac{0.754^2 \cdot 27.43}{2} = 11 \text{ Па};$$

Опір щілинного зазору:

$$\Delta P_{щ} = 12.753 \cdot \left[ i^l \cdot (\sin \gamma + 1) + 2(\sin \gamma + 0.1) \right], \quad (6.62)$$

$$\Delta P_{щ} = 12.753 (0.779 (\sin 10^\circ + 1) + 2(\sin 10^\circ + 0.1)) = 19 \text{ Па};$$

Визначення площі отворів:

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$F_o = 0.91 \cdot \left( \frac{d_o}{3.25} \right)^2 \cdot F_B^I, \quad (6.63)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } F_o^{0.9} = 0.91 \cdot \left( \frac{0.9 \cdot 10^{-3}}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0.0656 = 0.0046 \text{ м}^2;$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } F_o^{1.0} = 0.91 \cdot \left( \frac{1.0 \cdot 10^{-3}}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0.0656 = 0.0057 \text{ м}^2;$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } F_o^{1.1} = 0.91 \cdot \left( \frac{1.1 \cdot 10^{-3}}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0.0656 = 0.0068 \text{ м}^2;$$

Швидкість пара в отворах:

$$W_o = W_B \cdot \frac{F_B^I}{F_o^I}; \quad (6.64)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } W_o^{0.9} = 0.296 \cdot \frac{0.0656}{0.0046} = 4.22 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } W_o^{1.0} = 0.296 \cdot \frac{0.0656}{0.0057} = 3.4 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } W_o^{1.1} = 0.296 \cdot \frac{0.0656}{0.0068} = 2.86 \text{ м/с};$$

Коефіцієнт опору отворів:

$$\xi_o = 1.4148 \cdot \left( \frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{d_o} \right)^{0.2} \cdot \left( 1 - \left( \frac{F_o}{F_B^I} \right) \right)^2; \quad (6.65)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \xi_o^{0.9} = 1.4148 \cdot \left( \frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{0.9 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{0.0046 \cdot 10^{-6}}{0.0656 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.82;$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \xi_o^{1.0} = 1.4148 \cdot \left( \frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{1.0 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{0.0057 \cdot 10^{-6}}{0.0656 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.78;$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		47

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \xi_o^{1.1} = 1.4148 \cdot \left( \frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{1.1 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \left( 1 - \left( \frac{0.0068 \cdot 10^{-6}}{0.0656 \cdot 10^{-6}} \right)^2 \right) = 1.74;$$

Мінімально допустима швидкість пара в отворах тарілки:

$$W_{II \text{ MIN}} = 0.0364 \cdot \xi_o^{-0.625} \cdot \left( \frac{h}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho^{\text{ж}}}{\rho^{\text{п}}}}; \quad (6.66)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } W_{II \text{ MIN}}^{0.9} = 0.0364 \cdot 1.82^{-0.625} \left( \frac{8.01 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{755.85}{27.43}} = 1.5 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } W_{II \text{ MIN}}^{1.0} = 0.0364 \cdot 1.78^{-0.625} \left( \frac{8.01 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{755.85}{27.43}} = 1.52 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } W_{II \text{ MIN}}^{1.1} = 0.0364 \cdot 1.74^{-0.625} \left( \frac{8.01 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{755.85}{27.43}} = 1.54 \text{ м/с};$$

Умова  $W_{II \text{ MIN}} < W_o$ , виконується для всіх варіантів перфорації, тарілка працює повним перерізом без провалу рідини.

Опір незрошуваної тарілки:

$$\Delta P_C = \xi_o \cdot \frac{W_o^2 \cdot \rho^{\text{п}}}{2}; \quad (6.67)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_C^{0.9} = 1.82 \frac{4.22^2 \cdot 27.43}{2} = 445 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \Delta P_C^{1.0} = 1.78 \frac{3.40^2 \cdot 27.43}{2} = 283 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_C^{1.1} = 1.74 \frac{2.86^2 \cdot 27.43}{2} = 196 \text{ Па};$$

Визначення втрат напору від поверхневого натягу:

$$\text{Для } d_o \leq 1.0 \text{ мм}, \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{d_o}; \quad (6.68)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		48

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_\sigma^{0.9} = \frac{4 \cdot 5.6 \cdot 10^{-3}}{0.0009} = 25 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \Delta P_\sigma^{1.0} = \frac{4 \cdot 5.6 \cdot 10^{-3}}{0.001} = 23 \text{ Па};$$

$$\text{Для } d_o > 1.0 \text{ мм } \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{1.3 \cdot d_o + 0.08 \cdot d_o^2}; \quad (6.69)$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_\sigma^{1.1} = \frac{4 \cdot 5.6 \cdot 10^{-3}}{1.3 \cdot 0.0011 + 0.08 \cdot 0.0011^2} = 16 \text{ Па};$$

Повний опір тарілки:

$$\Delta P_T^I = \Delta P_{\text{щ}}^C + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_C + \Delta P_\sigma + \rho^{\text{ж}} \cdot g \cdot h; \quad (6.70)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_T^I = 11 + 19 + 445 + 25 + 755.85 \cdot 9.81 \cdot 8.01 \cdot 10^{-3} = 560 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \Delta P_T^I = 11 + 19 + 283 + 23 + 755.85 \cdot 9.81 \cdot 8.01 \cdot 10^{-3} = 396 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_T^I = 11 + 19 + 196 + 16 + 755.85 \cdot 9.81 \cdot 8.01 \cdot 10^{-3} = 302 \text{ Па};$$

Максимально допустимий опір тарілки:

$$\Delta P_{T \text{ MAX}} = 0.00826 \cdot \rho^{\text{ж}} \cdot \left( H_T + 15 - 1.195 \cdot S_K - 2.1 \cdot h_{\text{кр.}} - 1.45 \cdot \frac{h_{\text{кр.}}^3}{S_K^2} \right), \quad (6.71)$$

$$\Delta P_{T \text{ MAX}} = 0.00826 \cdot 755.85 \cdot \left( 50 + 15 + 1.195 \cdot 5 - 2.1 \cdot 1.7 - 1.45 \cdot \frac{1.7^3}{5^2} \right) = 419;$$

Тарілка з перфорацією рівною  $d_o = 0.9 \text{ мм}$  умову  $\Delta P_T^I < \Delta P_{T \text{ MAX}}$  не задовольняє.

Для проектованої установки обираємо діаметр перфорації  $d_o = 1.1 \text{ мм}$ , так як їй відповідає менший опір тарілки, а колона при цьому працює стабільно без зависань.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Середній опір тарілки:

$$\Delta P_T = \frac{\Delta P_T'' + \Delta P_T'}{2}, \quad (6.72)$$

$$\Delta P_T = \frac{121 + 302}{2} = 211.5 \text{ Па};$$

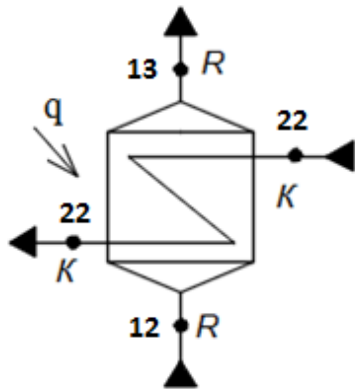
Загальний опір колони:

$$\Delta P_K = 211.5 \cdot 20 = 4230 \text{ Па};$$

Отриманий опір не перевищує прийнятого у початкових даних завдання. Таким чином, діаметр колони і перфорації, відстань між тарілками повністю задовольняє та забезпечує нормальну роботу нижньої колони.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 10. Розрахунок переохолоджувача рідкого кисню



Мета: Визначити поверхню теплообміну, діаметр труб і довжину навивки, кількість шарів, скласти таблицю навивки теплообмінника. Розрахувати гідравлічний опір теплообмінника і перевірити на міцність днище і обічайку корпусу апарату.

Початкові дані:

Розрахункова кількість повітря, що перероблюється(див.10ст.)

$$V = 0.035 \text{ кмоль/с.}$$

Мольні долі потоків:

Продукційного кисню  $K = 0.16 \text{ кмоль/кмоль};$

Кубової рідини  $R = 0.605 \text{ кмоль/кмоль};$

Тиск:

Кисню  $P^K = 0.160 \text{ МПа};$

Кубової рідини  $P^R = 0.160 \text{ МПа};$

Температура:

Кисню на вході у теплообмінник  $T_{22} = 93.7 \text{ К};$

Кубової рідини на вході у теплообмінник  $T_{12} = 114 \text{ К};$

Кисню на виході із теплообмінника  $T_{23} = 84,7 \text{ К};$

Теплоприливи до переохолоджувача

$$q_{\text{ПО}}^K = 3 \text{ кДж/кмоль};$$

Розрахунок масових витрат прямого та зворотного потоків

Визначаємо мольні витрати потоків кисню і кубової рідини:

$$M^K = B \cdot K, \quad (6.73)$$

$$M^K = (2700 \cdot 0.035 \cdot 0.16) / 3600 = 0.0049 \text{ кмоль/с};$$

$$M^R = B \cdot R, \quad (6.74)$$

$$M^R = (2700 \cdot 0.035 \cdot 0.605) / 3600 = 0.0166 \text{ кмоль/с};$$

Визначаємо масові витрати прямого і зворотного потоків:

$$G^K = M^K \cdot \mu^K \cdot 3600, \quad (6.75)$$

де  $\mu^K = 32 \text{ кг/кмоль}$  – мольна маса кисню,

$$G^K = 0.0049 \cdot 32 \cdot 3600 = 564.5 \text{ кг/ч},$$

$$G^R = M^R \cdot \mu^R \cdot 3600, \quad (6.76)$$

$$\mu^R = \mu^K \cdot x^R + \mu^A \cdot (1 - x^R) \quad (6.77)$$

– мольна маса кубової рідини,

$$\mu_R = 32 \cdot 0.315 + 28.02 \cdot (1 - 0.315) = 29.27 \text{ кг/кмоль};$$

$$G^R = 0.0166 \cdot 29.27 \cdot 3600 = 1749.4 \text{ кг/ч};$$

Визначення теплофізичних властивостей кисню і кубової рідини.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Параметри прямого і зворотного потоків визначаємо за їх середніми температурами. При цьому враховуємо, що температура кубової рідини при кипінні у міжтрубному просторі змінюється не суттєво і її можна прийняти постійною.

Середня температура прямого потоку:

$$T_{\text{ср}}^{\text{пр}} = \frac{T_{22} + T_{23}}{2} \quad (6.78)$$

$$T_{\text{ср}}^{\text{пр}} = \frac{93,7 + 94,7}{2} = 94,2$$

Середню температуру зворотного потоку приймаємо:

$$T_{\text{ср}}^{\text{об.}} = 84,2 \text{ K};$$

Теплофізичні властивості кубової рідини будемо визначати за рівнянням змішування. Тому спершу визначимо властивості азоту і кисню при  $P = 0,135$  МПа и  $T = 84,2$  К.

Таблиця 5.1 – Теплофізичні параметри речовин.

Речовина	$P, \text{МПа}$	$T, \text{К}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$C_p, \text{кДж/кг}\cdot\text{К}$	$\lambda, \text{Вт/м}\cdot\text{К}$	$\nu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$
Кисень	0,16	84,7	1181,36	1,714	0,15950	275,9
Азот	0,16	84,7	6,967	1,099	0,0085	5,6

За рівнянням змішення:

$$C_p^R = C_p^K \cdot x^R + C_p^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.79)$$

$$\rho^R = \rho^K \cdot x^R + \rho^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.80)$$

$$\lambda^R = \lambda^K \cdot x^R + \lambda^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.81)$$

де  $x^R$  – концентрація кисню у кубовій рідині,  $x^R = 31.5 \% \text{ об. } O_2$ .

При цьому значення необхідно перевести у мольні одиниці, а потім здійснити зворотній переведення:

// Методичні вказівки до розрахунку теплообмінних апаратів. – Цветковська Л.Н.//

$$Cp^K = Cp^{K'} \cdot \mu^K, \quad (6.82)$$

$$Cp^A = Cp^{A'} \cdot \mu^A, \quad (6.83)$$

$$\rho^K = \rho^{K'} / \mu^K, \quad (6.84)$$

$$\rho^A = \rho^{A'} / \mu^A, \quad (6.85)$$

$$\rho^R = [(\rho^{K'} / \mu^K) \cdot x^R + (\rho^{A'} / \mu^A) \cdot (1 - x^R)] \cdot \mu^R, \quad (6.86)$$

$$\rho^R = \left[ \left( \frac{1181.3}{32} \right) \cdot 0.315 + \left( \frac{6.967}{28} \right) \cdot 0.685 \right] \cdot 29.27 = 345.4 \text{ кг/м}^3,$$

$$Cp^R = [(Cp^{K'} \cdot \mu) \cdot x^R + (Cp^{A'} \cdot \mu^A) \cdot (1 - x^R)] / \mu^R, \quad (6.87)$$

$$Cp^R = [(1.714 \cdot 32) \cdot 0.315 + (1.099 \cdot 28) \cdot 0.685] / 29.27 = 1.31 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)},$$

$$\lambda^R = \lambda^K \cdot x^R + \lambda^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.88)$$

$$\lambda^R = 0.1595 \cdot 0.315 + 0.0085 \cdot 0.685 = 0.05607 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)},$$

$$\nu^R = \nu^K \cdot x^R + \nu^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.89)$$

$$\nu^R = 275.9 \cdot 10^{-6} \cdot 0.315 + 5.6 \cdot 10^{-6} \cdot 0.685 = 90.46 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

Результати розрахунку теплофізичних властивостей речовин зведено до таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Теплофізичні властивості потоків кисню і кубової рідини.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Речовина	$P, \text{МПа}$	$T, \text{К}$	$\rho, \text{кг} / \text{м}^3$	$C_p, \text{кДж} / \text{кг} \cdot \text{К}$	$\lambda, \text{Вт} / \text{м} \cdot \text{К}$	$\nu \cdot 10^6, \text{Па} \cdot \text{с}$
Кисень	0.17	93,7	1120,18	1,78	0,13980	197,2
Кубова рідина	0.165	84.7	345.4	1.31	0.05607	90.46

### Визначення коефіцієнтів тепловіддачі

Для навивки теплообмінника обираємо мідну трубку  $10 \times 1 \text{мм}$  (тобто внутрішній діаметр трубки  $d_1 = 8 \text{мм}$ , а зовнішній  $d_2 = 10 \text{мм}$ ), з міркувань безпеки так як у трубках тече рідкий кисень. Приймаємо масову швидкість кисню у трубках  $\omega_1 \cdot \rho_1 = 600 \text{кг} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$ , масову швидкість кубової рідини у міжтрубному просторі  $\omega_2 \cdot \rho_2 = 90 \text{кг} / \text{м}^2 \cdot \text{с}$ .

Для визначення режиму плин трубною (кисневою) потоку знайдемо величину критерія Рейнольдса:

$$\text{Re}^{TP} = \frac{\omega_1 \cdot \rho_1 \cdot d_1}{\nu^{TP}}, \quad (6.90)$$

$$\text{Re}^{TP} = \frac{600 \cdot 0.008}{197.2 \cdot 10^{-6}} = 24341$$

Критичне значення числа Рейнольдса для трубного простору:

$$\text{Re}_{KP}^{TP} = 2300 \cdot \left[ 1 + 8.6 \cdot \left( \frac{d_1}{D_{CP}} \right)^{0.45} \right], \quad (6.91)$$

Приймаючи  $D_{CP} = 200 \text{мм}$ , отримаємо:

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\text{Re}_{\text{KP}}^{\text{TP.}} = 2300 \cdot \left[ 1 + 8.6 \cdot \left( \frac{8}{200} \right)^{0.45} \right] = 6947,$$

Так як  $\text{Re}^{\text{TP.}} \gg \text{Re}_{\text{KP}}^{\text{TP.}}$ , то у між трубному просторі встановлюється розвинений турбулентний плин.

У цьому випадку критерій Нуссельта визначається наступним виразом:

$$\text{Nu}^{\text{TP.}} = 0.021 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.43} \cdot \varepsilon, \quad (6.92)$$

де критерій Прандтля:

$$\text{Pr}^{\text{TP.}} = \frac{\nu^K \cdot C_p^K}{\lambda^K}, \quad (6.93)$$

$$\text{Pr}^{\text{TP.}} = \frac{197.2 \cdot 10^{-6} \cdot 1.78 \cdot 10^3}{0.1398} = 2.51,$$

$\varepsilon$  – коефіцієнт, який враховує кривизну трубок:

$$\varepsilon = 1 + 3.54 \cdot \frac{d_1}{D_{\text{CP}}}, \quad (6.94)$$

$$\varepsilon = 1 + 3.54 \cdot \frac{8}{200} = 1.1416;$$

Підставляючи значення  $\text{Pr}^{\text{TP.}}$  і  $\varepsilon$  у формулу критерія Нуссельта отримаємо:

$$\text{Nu}^{\text{TP.}} = 0.021 \cdot 24341^{0.8} \cdot 2.51^{0.43} \cdot 1.1416 = 114.99$$

Коефіцієнт тепловіддачі від кисню до трубки:

$$\alpha^{\text{TP.}} = \text{Nu}^{\text{TP.}} \cdot \frac{\lambda^K}{d_1}, \quad (6.95)$$

$$\alpha^{\text{TP.}} = 114.99 \cdot \frac{0.1398}{0.008} = 2009.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

Визначимо величину критерія Рейнольдса у міжтрубному просторі:

$$\text{Re}^{\text{M.}} = \frac{\omega_2 \cdot \rho_2 \cdot d_2}{\nu^{\text{M.}}}, \quad (6.96)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\text{Re}^{M.} = \frac{90 \cdot 0.01}{90.46 \cdot 10^{-6}} = 9949;$$

У цьому випадку може бути застосована разряженна навивка трубок з відносним шагом трубок  $\sigma_1 = 1.4$  и  $\sigma_2 = 1.4$ .

Критерій Нуссельта у міжтрубному просторі визначається по залежності:

$$\text{Nu} = 0.0418 \cdot (\text{Re}^{M.})^{0.8508}, \quad (6.97)$$

$$\text{Nu} = 0.0418 \cdot 9949^{0.8508} = 105.3;$$

Коефіцієнт теплопередачі від стінки трубки до кубової рідини:

$$\alpha^{M.} = \text{Nu}^{M.} \cdot \frac{\lambda^R}{d_2}, \quad (6.98)$$

$$\alpha^{M.} = 105.3 \cdot \frac{0.05607}{0.01} = 590.5 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

Коефіцієнт теплопередачі віднесений до зовнішньої поверхні трубок:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha^{TP.}} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha^{M.}}}, \quad (6.99)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{2009.5} \cdot \frac{0.01}{0.008} + \frac{1}{590.5}} = 431.9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К});$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## Визначення середньої різниці температур

Визначаємо різницю температур

Так як потоки протікають при низькому тиску, то теплоємності потоків по висоті теплообмінника практично не змінюються. Перевіряємо відношення:

$$\frac{\Delta T_{T.}}{\Delta T_{X.}} = \frac{T_{13} - T_{12}}{T_{14} - T_{11}}, \quad (6.100)$$

$$\frac{\Delta T_{T.}}{\Delta T_{X.}} = \frac{95.42 - 84.2}{87.42 - 84.2} = 3.4 > 1.78;$$

Отже середню різницю температур варто визначати як середньологарифмічну:

$$\Delta T_{cp.} = \frac{\Delta T_{T.} - \Delta T_{X.}}{\ln \frac{\Delta T_{T.}}{\Delta T_{X.}}} = \frac{(T_{13} - T_{12}) - (T_{14} - T_{11})}{\ln \frac{(T_{13} - T_{12})}{T_{14} - T_{11}}}, \quad (6.101)$$

$$\Delta T_{cp.} = \frac{(95.42 - 84.2) - (87.42 - 84.2)}{\ln \frac{95.42 - 84.2}{87.42 - 84.2}} = 6.4K;$$

## Визначення поверхні теплообміну

Теплове навантаження теплообмінника:

$$Q = G^R \cdot (i_{12} - i_{11}) / M^R, \quad (6.102)$$

Де

$$G^R = 1749.4 \text{ кг/год (див. 47 ст.)}, \quad M^R = 29.27 \text{ кг/кмоль (див. 47 ст.)}$$

$$Q = 1749.4 \cdot (-2686.1 - (-2823.0)) / 29.27 = 8182 \text{ кДж/ч};$$

Приймаючи величину запасу поверхні теплообміну рівною 75%, так як теплообмінник рідкістний. Визначення поверхні теплообміну:

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$F = \frac{1.75 \cdot Q}{K \cdot \Delta T_{CP}}, \quad (6.103)$$

$$F = \frac{1.75 \cdot 8182 \cdot 10^3}{431.9 \cdot 6.4 \cdot 3600} = 1.438 \text{ м}^2;$$

### Конструктивний розрахунок теплообмінника

Діаметр сердечника приймаємо із умови:

$$D_{СЕРД.} = 13 \cdot d_2, \quad (6.104)$$

$$D_{СЕРД.} = 13 \cdot 0.01 = 0.13 \text{ м};$$

Приймаємо число шарів навивки  $n_{СЛ.} = 3$

Площа перерізу міжтрубного простору:

$$f^{M.} = \frac{G^R}{\omega_2 \cdot \rho_2}, \quad (6.105)$$

$$f^{M.} = \frac{1749.4}{90 \cdot 3600} = 0.0054 \text{ м}^2;$$

Приймаємо товщину прокладки  $\delta = 4 \text{ мм}$ ,

тоді:

$$D_{CP.} = D_{СЕРД.} + n_{СЛ.} \cdot (d_2 + \delta), \quad (6.106)$$

$$D_{CP.} = 0.13 + 3 \cdot (0.01 + 0.004) = 0.172 \approx 0.175 \text{ м};$$

Визначаємо розрахункову товщину прокладки:

$$\delta = \frac{f^{M.}}{\pi \cdot D_{CP.} \cdot n_{СЛ.}}, \quad (6.107)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						59
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\delta = \frac{0.0054}{3.14 \cdot 0.175 \cdot 3} = 0.0033 \text{ м.}$$

Так як прийняте значення  $\delta$  не суттєво відрізняється від розрахункового, фактичний прохідний переріз змінюється також не суттєво, отже нема необхідності уточнювати прийняте значення масової швидкості  $\omega_2 \cdot \rho_2$  і перераховувати значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha_2$ .

Зовнішній діаметр намотки:

$$D_{\text{НАР.}} = D_{\text{СЕРД.}} + 2 \cdot n_{\text{СЛ.}} \cdot (d_2 + \delta), \quad (6.108)$$

$$D_{\text{НАР.}} = 0.13 + 2 \cdot 3 \cdot (0.01 + 0.004) = 0.198 \text{ м;}$$

Число трубок теплообмінника:

$$n_{\text{ТР.}} = \frac{4 \cdot G^{\text{ПР.}}}{\omega_1 \cdot \rho_1 \cdot \pi \cdot d_1^2}, \quad (6.109)$$

$$n_{\text{ТР.}} = \frac{4 \cdot 564.5}{600 \cdot 3.14 \cdot 0.008^2 \cdot 3600} = 5.3;$$

Приймаємо  $n_{\text{ТР.}} = 6 \text{ шт.}$  При цьому масова швидкість  $\omega_1 \cdot \rho_1$  не змінюється, і уточнювати коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_1$  нема необхідності.

Середня довжина однієї трубки теплообмінника:

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d_2 \cdot n_{\text{ТР.}}}, \quad (6.110)$$

$$L = \frac{1.438}{3.14 \cdot 0.01 \cdot 6} = 7.63 \text{ м;}$$

Теоретична довжина намотки:

$$H = \frac{n_{\text{ТР.}} \cdot L \cdot t_2}{\pi \cdot D_{\text{СР.}} \cdot n_{\text{СЛ.}}}, \quad (6.111)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						60
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$t_2 = \sigma_2 \cdot d_2, \quad (6.112)$$

$$t_2 = 1.4 \cdot 0.01 = 0.014 \text{ м},$$

$$H = \frac{6 \cdot 7.63 \cdot 0.014}{3.14 \cdot 0.175 \cdot 3} = 0.389 \text{ м};$$

Складемо таблицю навивки теплообмінника, розраховуючи наступні величини:

Середній діаметр шару:

$$D_{\text{СЛ.}}^i = D_{\text{СЕРД.}} + 2 \cdot i \cdot t_1, \quad (6.113)$$

$$t_1 = \sigma_1 \cdot d_2, \quad (6.114)$$

$$t_1 = 1.4 \cdot 0.01 = 0.014 \text{ м},$$

$$D_{\text{СЛ.}}^1 = 0.13 + 2 \cdot 1 \cdot 0.014 = 0.158 \text{ м},$$

$$D_{\text{СЛ.}}^2 = 0.13 + 2 \cdot 2 \cdot 0.014 = 0.186 \text{ м},$$

$$D_{\text{СЛ.}}^3 = 0.13 + 2 \cdot 3 \cdot 0.014 = 0.214 \text{ м};$$

Число заходів у шарі:

$$n_3^i = \frac{n_{\text{ТР.}} \cdot D_{\text{СЛ.}}^i}{n_{\text{СЛ.}} \cdot D_{\text{СР.}}}, \quad (6.115)$$

$$n_3^1 = \frac{6 \cdot 0.158}{3 \cdot 0.175} = 1.8 \approx 2$$

$$n_3^2 = \frac{6 \cdot 0.186}{3 \cdot 0.175} = 2.1 \approx 2$$

$$n_3^3 = \frac{6 \cdot 0.214}{3 \cdot 0.175} = 2.4 \approx 2$$

Число витків трубки у шарі:

$$n_B^i = \frac{H}{n_3^i \cdot t_2}, \quad (6.116)$$

$$n_B^1 = \frac{0.389}{2 \cdot 0.014} = 13.9,$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						61
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$n_B^2 = \frac{0.389}{2 \cdot 0.014} = 13.9$$

$$n_B^3 = \frac{0.389}{3 \cdot 0.014} = 9.26$$

Довжина трубки у шарі:

$$L^i = \pi \cdot D_{сл.}^i \cdot n_B^i, \quad (6.117)$$

$$L^1 = 3.14 \cdot 0.158 \cdot 13.9 = 6.896 \text{ м};$$

$$L^2 = 3.14 \cdot 0.186 \cdot 13.9 = 8.118 \text{ м};$$

$$L^3 = 3.14 \cdot 0.214 \cdot 9.26 = 6.222 \text{ м};$$

З урахуванням додаткової довжини трубок у колекторі отримаємо:

$$L^1 = 8.5 \text{ м},$$

$$L^2 = 10.0 \text{ м},$$

$$L^3 = 7.7 \text{ м}$$

Таблиця 6 – Таблиця навивки теплообмінника.

№ шару	Діаметр шару, $D_{сл.}^i, \text{м}$	Число заходів, $n_3^i$	Число витків, $n_B^i$	Довжина трубки, $L^i, \text{м}$	Товщина прокладки, $\delta, \text{мм}$
1	0.158	2	13.9	8.5	4.0
2	0.186	2	13.9	10.0	4.0
3	0.214	3	9.3	7.7	4.0

## Гідравлічний розрахунок теплообмінника

Визначимо опір трубного простору:

$$\Delta P^{TP.} = \xi \cdot \frac{(\rho_1 \cdot \omega_1)^2 \cdot L}{2 \cdot \rho^K \cdot d_1}, \quad (6.118)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт тертя при  $10^4 < Re < 10^8$ , який визначається формулою:

$$\xi = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}, \quad (6.119)$$

$$\xi = \frac{0.3164}{24341^{0.25}} = 0.025,$$

Тоді втрати тиску у трубному просторі складатимуть:

$$\Delta P^{TP.} = 0.026 \cdot \frac{600^2 \cdot 7.63}{2 \cdot 1181.36 \cdot 0.008} = 3778.3 \text{ Па} = 0.0038 \text{ МПа};$$

Визначимо гідравлічний опір у міжтрубному просторі:

$$\Delta P^{M.} = m \cdot \frac{Eu}{m} \cdot \frac{(\rho_2 \cdot \omega_2)}{\rho^R}, \quad (6.120)$$

$$\frac{Eu}{m} = 0.53 \cdot (Re^{M.})^{-0.122}, \quad (6.121)$$

$$m = \frac{H^{M.}}{\sigma_2 \cdot d_2 \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \beta}}, \quad (6.122)$$

де

$$\text{tg} \beta = \frac{\sigma_2 \cdot d_2 \cdot n_{TP.}}{\pi \cdot n_{СЛ.} \cdot (D_{СЕРД.} + n_{СЛ.} \cdot \sigma_1 \cdot d_2)} \quad (6.123)$$

$$\text{tg} \beta = \frac{1.4 \cdot 0.01 \cdot 6}{3.14 \cdot 3 \cdot (0.13 + 3 \cdot 1.4 \cdot 0.01)} = 0.052,$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		63

тоді:

$$H^{M.} = \left( \frac{L}{\sqrt{1 + 1/\operatorname{tg}^2 \beta}} \right), \quad (6.124)$$

$$H^{M.} = \left( \frac{7.63}{\sqrt{1 + \frac{1}{0.052^2}}} \right) = 0.396 \text{ м,}$$

Підставляючи у формулу знайденні значення  $\operatorname{tg} \beta$  и  $H^{M.}$ , отримаємо:

$$m = \frac{0.396}{1.4 \cdot 0.01 \cdot \sqrt{1 + 0.052^2}} = 28.24 \approx 28.$$

тоді:

$$\Delta P^{M.} = 28 \cdot 0.53 \cdot (9949)^{-0.122} \frac{90}{345.4} = 1.26 \text{ Па} ;$$

Так як отримане значення  $\Delta P_{TP.} = 0.0038 \text{ МПа} < [\Delta P_{TP.}] = 0.005 \text{ МПа}$ , то вважаємо теплообмінник вартим для використання.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		64

## 11. Обґрунтування обраних матеріалів

Матеріали, які застосовуються у криогенних установках повинні зберігати свої механічні властивості при низьких температурах. Основними такими властивостями є міцність та ударна в'язкість.

Найбільш поширеними матеріалами, які зберігають в'язкі властивості при криогенних температурах з достатніми міцностними характеристиками є леговані хромонікелеві сталі, алюміній та його сплави, мідь та її сплави.

Для корпусних деталей (обичайки, днища) апаратів працюючих при внутрішньому надлишковому тиску застосовують сталь 12Х18Н10Т, яка має найкращу міцність із названих вище матеріалів, вона зберігає свої властивості в усьому інтервалі температур (290К-90К), а також має низьку теплопровідність  $\lambda_{T_{70K}}=7,5 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ . Крім цього, ця сталь не піддається корозії та добре зварюється.

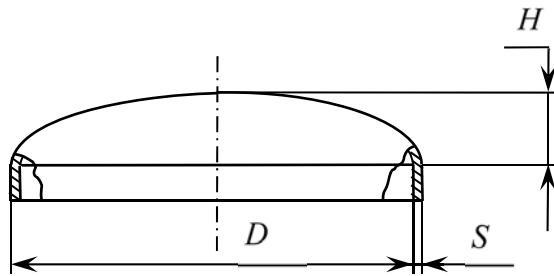
Для навивки теплообмінників застосовують мідні трубки марки МЗ-М, які добре зварюються, мають малу питому вагу та високу теплопровідність.

Матеріал трубопроводів залежить від матеріала судів, які вони з'єднують, вартістю та дефіцитністю того чи іншого металу.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						65
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 12. Перевірка міцності основних деталей та вузлів

### 12.1. Перевірка міцності днища нижньої ректифікаційної колони



Матеріал – сталь 12Х18Н10Т;

$[\sigma] = 160 \text{ МПа}$  – гранична напруга при температурі  $T = 20^\circ\text{C}$ ;

$\sigma_T = 240 \text{ МПа}$  м – межа плинності

Мал. 12.1 – Схема днища

днища при температурі  $T = 20^\circ\text{C}$ ;

$D = 0.70 \text{ м}$  – діаметр днища;

$$H = 0.25 \cdot D \quad (8.1)$$

– висота днища;

$$H = 0.25 \cdot 0.70 = 0.175 \text{ м}.$$

Визначимо товщину стінки днища:

$$S_R = \frac{P \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0.5 \cdot P}, \quad (8.2)$$

$$S \geq S_R + C, \quad (8.3)$$

где  $P = 0.68 \text{ МПа}$  – тиск у колоні;

$\varphi = 1$  – коефіцієнт міцності продольного зварного шва;

$R = D = 0.7 \text{ м}$  – радіус кривизни у вершині еліптичного днища с

$$H = 0.25 \cdot D; \quad (8.4)$$

$C = C_1 + C_2$  – сума прибавок до розрахункової товщини;

$C_1 = 0 \text{ м}$  – прибавка для компенсації корозії металу,

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		66

$C_2 = 0.0005_m$  – максимальна прибавка на компенсацію мінусового допуску на товщину листа;

$$C = 0 + 0.0005 = 0.0005_m;$$

$$S_R = \frac{0.68 \cdot 0.7}{2 \cdot 1.160 - 0.5 \cdot 0.68} = 0.0015_m;$$

$$S = S_R + C, \quad (8.5)$$

$$S = 0.0015 + 0.0005 = 0.002_m;$$

Приймаємо  $S = 0.004_m$ ;

Приведені вище формули застосовуються при умові:

$$0.002 \leq \frac{S-C}{D} \leq 0.1, \quad (8.6)$$

$$0.2 \leq \frac{H}{D} \leq 0.5, \quad (8.7)$$

$$\frac{S-C}{D} = \frac{0.004 - 0.0005}{0.7} = 0.005,$$

$$0.002 \leq 0.005 \leq 0.1,$$

$$\frac{H}{D} = \frac{0.175}{0.7} = 0.25,$$

$$0.2 \leq 0.25 \leq 0.5;$$

Умова виконується.

Визначаємо тиск випробування:

$$P_{II} = 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{ю}}{\sigma_T}, \quad (8.8)$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		67

Але не менш

$$P_H = 1.25 \cdot P, \quad (8.9)$$

$$\frac{\sigma_{Ю}}{\sigma_T} = \frac{240}{240} = 1,$$

$$P_H = 1.25 \cdot 0.68 \cdot 1 = 0.85 \text{ МПа};$$

Приймаємо тиск випробовування рівним  $P_H = 0.85 \text{ МПа}$ ;

Визначимо напругу, яка з'являється під час випробовування:

$$\sigma_H = \frac{P_H \cdot [R + 0.5 \cdot (S - C)]}{2 \cdot \varphi \cdot (S - C)}, \quad (8.10)$$

$$\sigma_H = \frac{0.85 \cdot [0.7 + 0.5 \cdot (0.004 - 0.0005)]}{2 \cdot 1 \cdot (0.004 - 0.0005)} = 85.2 \text{ МПа};$$

При пневмовипробовуваннях повинна виконуватися умова:

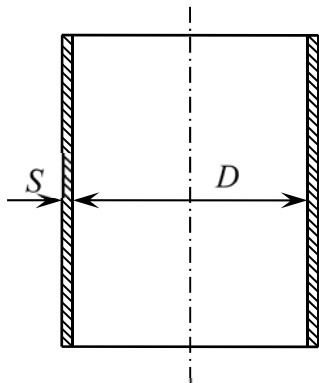
$$\frac{\sigma_T}{1.2} > \sigma_H, \quad (8.11)$$

$$\frac{\sigma_T}{1.2} = \frac{240}{1.2} = 200 \text{ МПа} > \sigma_H = 85.2 \text{ МПа};$$

Умова міцності виконується.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						68
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 12.2. Перевірка міцності обичайки нижньої ректифікаційної колони



Мал. 12.2 – Схема обичайки

Матеріал – сталь 12Х18Н10Т;

$[\sigma] = 160 \text{ МПа}$  – гранична напруга при температурі  $T = 20^\circ\text{C}$  ;

$\sigma_T = 240 \text{ МПа}$  м – межа плинності матеріала днища при температурі  $T = 20^\circ\text{C}$  ;

$D = 0.705 \text{ м}$  – діаметр обичайки;

Визначимо товщину стінки обичайки:

$$S_R = \frac{P \cdot R}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0.5 \cdot P}, \quad (8.12)$$

$$S \geq S_R + C, \quad (8.13)$$

де  $P = 0.68 \text{ І } \dot{\text{а}}$  – тиск у колоні;

$\varphi = 0.9$  – коефіцієнт міцності продольного зварного шва обичайки;

$$C = C_1 + C_2 \text{ – сума прибавок до розрахункової товщини;} \quad (8.14)$$

$C_1 = 0 \text{ м}$  – прибавка для компенсації корозії металу,

$C_2 = 0.00015 \text{ м}$  – максимальна прибавка на компенсацію мінусового допуску на товщину листа;

$$C = 0 + 0.00015 = 0.00015 \text{ м};$$

$$S_R = \frac{0.68 \cdot 0.705}{2 \cdot 1 \cdot 160 - 0.5 \cdot 0.68} = 0.0015 \text{ м};$$

$$S = S_R + C, \quad (8.15)$$

$$S = 0.0015 + 0.00015 = 0.0017 \text{ м};$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						69
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Приймаємо  $S = 0.002м$ ;

Приведені вище формули застосовуються при умові:

$$\frac{S-C}{D} \leq 0.1, \quad (8.16)$$

$$\frac{S-C}{D} = \frac{0.002-0.0005}{0.705} = 0.0021,$$

$$0.0021 \leq 0.1,$$

Умова виконується.

Визначаємо тиск випробовування:

$$P_H = 1.25 \cdot P \cdot \frac{\sigma_{Ю}}{\sigma_T}, \text{ але не менш } P_H = 1.25 \cdot P,$$

$$\frac{\sigma_{Ю}}{\sigma_T} = \frac{240}{240} = 1,$$

$$P_H = 1.25 \cdot 0.68 \cdot 1 = 0.85 \text{ МПа};$$

Визначимо навантаження при ипробовуванні:

$$\sigma_H = \frac{P_H \cdot [R + 0.5 \cdot (S - C)]}{2 \cdot \varphi \cdot (S - C)}, \quad (8.17)$$

$$\sigma_H = \frac{0.85 \cdot [0.705 + 0.5 \cdot (0.002 - 0.00015)]}{2 \cdot 0.9 \cdot (0.002 - 0.00015)} = 180.2 \text{ МПа};$$

При пневмовипробовуваннях повинна виконуватися умова:

$$\frac{\sigma_T}{1.2} > \sigma_H, \quad (8.18)$$

$$\frac{\sigma_T}{1.2} = \frac{240}{1.2} = 200 \text{ МПа} > \sigma_H = 180.2 \text{ МПа}; \text{ Умова міцності виконується.}$$

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						70
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

### 13. Техніка безпеки при роботі з рідким киснем

Рідкий кисень нетоксичний, не горючий і не вибухонебезпечний, однак, будучи сильним окиснювачем, різко збільшує здатність інших матеріалів до горіння. Ряд матеріалів (дерево, папір, асфальт, вугілля та ін.), просочених рідким киснем, здатні детонувати. Тому для роботи в контакті з киснем можуть використовуватися тільки дозволені для цього матеріали.

Рідкий кисень при попаданні на відкриті ділянки шкіри викликає обмороження, а також вражає слизову оболонку очей. Відбір проб рідкого кисню необхідно проводити в захисних окулярах і брезентових рукавицях.

Технологія роботи з рідким киснем повинна виключати можливість неконтрольованого накопичення в ньому органічних і інших горючих речовин.

Злив рідкого кисню повинен проводитися в спеціально відведених місцях, що мають покриття, що не містять органічних матеріалів. У місцях можливих витоків або проток рідкого кисню також не повинно бути покриття, які мають органічні матеріали.

Об'ємна частка кисню в повітрі робочої зони не повинна перевищувати 23%. При протоках або витоках рідкого кисню можлива поява зон з підвищеним вмістом кисню, що створює небезпеку виникнення пожеж. Ці зони повинні бути позначені спеціальним попереджувальним знаком, в них має бути обмежено перебування людей і не повинні знаходитися легкозаймисті матеріали. Якщо ці зони знаходяться в закритих приміщеннях, вони повинні бути обладнані засобами контролю повітряного середовища і автоматично включається вентиляцією для провітрювання.

Перед проведенням ремонтних робіт або оглядом колишньої в експлуатації транспортної або стаціонарної ємності рідкого кисню її необхідно відігріти до температури навколишнього середовища і продути повітрям. Дозволяється починати роботи після зниження об'ємної частки кисню всередині ємності до 23%.

Після перебування в середовищі, збагаченої киснем, що не дозволяється курити, використовувати відкритий вогонь і наближатися до вогню. Одяг повинен бути провітрена протягом 30 хв.

Цистерни, наповнені киснем, при перевезенні повинні бути закріплені так, щоб вони не переміщувалися і не піддавалися ударам; криогенні посудини повинні транспортуватися в вертикальному положенні.

Транспортні пристрої, що використовуються для перевезень цистерн і криогенних посудин, повинні бути чистими і безпечними в пожежному відношенні. Забороняється перевозити наповнені киснем цистерни і криогенні посудини разом з жировими речовинами.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						71
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 14.Висновок

В результаті розробки проекту були знайдені технічні характеристики установки:

-робочий тиск  $P = 6,7$  МПа

-кількість повітря переробляється установкою  $V = 3000$  м<sup>3</sup>/ч

У технологічному розрахунку були знайдені параметри в вузлових точках установки. Знайдено параметри потоків на вході і виході з апаратів, а також частини потоків, які йдуть в основний теплообмінник і теплообмінник-зріджувач, на детандер і дросельний вентиль.

У проекті описані: основи експлуатації установки, вибір і пояснення схеми, умови безпеки при експлуатації і роботі з газоподібним та рідким киснем.

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						72
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

## 15. Заключение

### Таблица параметров расчетных точек схемы ПРУ

№	T, К	P, МПа	i, кДж/кмоль	Поток	Стан, х
1	313	0,1	9088	В	0
2	313	6,7	8300	В	0
3	281	6,7	7680	В	0
4	283	6,7	7746	В	0
5	215	6,7	4760	В-Д	0
6	102	0,7	2372.8	В-Д	0
7	155	6,7	2282	В-Д	0
8	125	6,7	2282	В-Д	0
9	101.7	0,7	2822	В	0
10	113	0,7	-2481	Р	1
11	95	0,7	-2690	Р	1
12	114	0,16	-2690	Р	1
13	104	0,16	-2528	Р	0,83
14	97.9	0,7	-2203	Н	1
15	86.9	0,7	-2909	Н	1
16	86,9	0,7	-2909	Н	0,94
17	81.4	0,16	2275	А	0
18	92.8	0,16	2622,8	А	0
19	98.3	0,16	2781.7	А	0
20	250	0,16	7267	А	0
21	294	0,16	8573	А	0
22	93.7	0,16	-4208	К	1
23	84.7	0,16	-4690	К	1
9'	92	6.7	-1034	Д	0
20'	107	0.16	3040	А	0
4'	283	6.7	7746	В	0

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		73

## 16. Список літератури

1. Архаров А.М., Мікуліна Є.І., Марфініна І.В. Кріогенні системи в 2-х томах:

т.1-Основи теорії розрахунку. –М.: Машинобудування, 1996.

т.2-Основы проектування апаратів, установок и систем, - М.:  
Машинобудування, 1999.

2. Глізманенко Д.Л. Одержання кисню. – М.: Хімія, 1975.

3. Єпіфанова В. І. Аксельрод Л.С. Поділ повітря методом глибокого охолодження . У 2-х томах:

т.1-Термодинамічні основи поділу повітря, схеми та апарати повітророзподільних установок. - М.: Машинобудування, 1973.

т.2-Промислові установки, машинне та допоміжне обладнання. - М.:  
Машинобудування, 1973.

4. Цветковська Л.Н., Поберезкін А.Є.- Установки для поділу повітря. 2008

5. Лашинский Л.А., Толчинский А.Р. Основи конструювання та розрахунку хімічної апаратури. – Л.: Машгіз, 1970.

6. Малков М.П. Довідник з фізико-технічних основ кріогеніки. – М.: 1985.

7. Поберезкін А.Е. Повітророзподільні установки. Конспект лекцій для студентів спеціальності 8.09.05.07 «Кріогенна техніка та технологія». – О.: ОДАХ, 2003.

8. <https://www.lhz.com.ua/catalog/gazy-v-balonah/kysen-tehnichnyj>

<http://bilar.com.ua>

<http://prom.alviline.com.ua/application.html>

					КРМ.КТ.2.631-03.1.19	Лист
						74
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		