

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



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

На тему: «Дослідження повітророздільної установки для одержання рідкого кисню 400 кг/год та газоподібного азоту 1580 м³/год»

Здобувача Кушніров Д.О.
(прізвище, ініціали)

4 курсу ЕН-142 групи

Керівник Брюханова З.А.
(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 - 2026 рік

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інститут	Навчально-науковий інститут холоду, кріотехнології та екоенергетики ім. В.С. Мартиновського
Кафедра	Кріогенної техніки
Ступінь вищої освіти	бакалавр
Спеціальність	142 «Енергетичне машинобудування»
Освітня програма	«Холодильні машини, установки і кондиціонування повітря»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри КТ

д.т.н., проф. **Юрій СИМОНЕНКО**

«__» __ 2026 року

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

Кушнірова Данило Олександровича
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Дослідження повітророздільної установки для одержання рідкого кисню 400 кг/год та газоподібного азоту 1580 м3/год

Керівник роботи к.т.н., доц. Брюханова З.А.

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

Затверджені наказом ОНТУ від 31 жовтня 2025 року № 613-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 1 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи: Робочий тиск установки – 6.5 МПа

Паспортна продуктивність установки по газоподібному азоту - 1580 м3/год; Паспортна продуктивність установки по рідкого кисню - 400 кг/год

4. Перелік питань, які потрібно розробити:

Вступ. Огляд технічної інформації з питань, що досліджується. Технічна характеристика

Технологічний розрахунок. Розрахункова схема.

Перелік використаної літератури.

5. Перелік графічного матеріалу:

Презентація Power Point (7 слайдів)

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

7. Дата видачі завдання _____ 01.12.2025 _____

Керівник _____ доц.Зінаїда БРЮХАНОВА

Завдання прийняв до виконання _____ Данило КУШНІРОВ

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Вивчення технічного завдання	5 днів	
2	Огляд і вивчення літератури	14днів	
3	Розробка математичної моделі об'єкта	2 дні	
4	Вибір методу дослідження	20 днів	
5	Адаптація методів дослідження до практичного застосування	15 днів	
6	Розробка графічних моделей	2 дні	
7	Аналіз результатів досліджень	2 дні	
8	Оформлення пояснювальної записки	2 дні	
9	Обговорення та затвердження результатів роботи	2 дні	
10	Підготовка матеріалів роботи до захисту	2 дні	

Здобувач-дипломник _____
(підпис)

Данило КУШНІРОВ _____
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Зінаїда БРЮХАНОВА _____
(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 _____
Кушніров Д.О.
(ПІБ)

_____ (підпис)

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота магістра (пояснювальна записка) містить 57 сторінок, 16 рисунків, 15 таблиць, список джерел з 7-и найменувань.

Розроблено схемно-циклове рішення установки для одержання технічного кисню та газоподібного азоту. Надано огляд сучасного стану кріогенного обладнання на світовому ринку щодо установок для отримання технічного кисню та газоподібного азоту. Проведено розрахунки апаратів, енергетичний аналіз характеристик циклу отримання технічного кисню з урахуванням продуктивності установки.

Ключові слова: кріогенна установка, повітряний компресор, технічний кисень, енергетичний баланс, турбодетандер, газоподібний азот

ABSTRACT

The master's qualification work (explanatory note) contains 57 pages, 16 figures, 15 tables, a list of sources from 7 items.

A schematic and cycle solution of the installation for obtaining technical oxygen and gaseous nitrogen has been developed. An overview of the current state of cryogenic equipment on the world market for installations for obtaining technical oxygen and gaseous nitrogen has been provided. Calculations of the devices, an energy analysis of the characteristics of the cycle for obtaining technical oxygen, taking into account the performance of the installation, have been carried out.

Key words: cryogenic installation, air compressor, technical oxygen, energy balance, turboexpander, gaseous nitrogen

Зміст

1. Вступ.....	4
2. Технічна характеристика.....	5
3. Опис і обґрунтування схеми установки.....	6
4. Технологічний розрахунок.....	9
4.1. Розрахункова схема.....	10
4.2. Дані для розрахунку.....	11
4.3. Матеріальні залишки установки і апаратів	12
4.4. Розрахунок процесу ректифікації.....	15
5. Розрахунки апаратів.....	16
5.1 Розрахунок ректифікаційної колони.....	16
5.2 Розрахунок конденсатора-випарника.....	34
5.3.Визначення температурного натиску на стороні конденсації і кипіння...	36
6. Розрахунок переохолоджувача рідини кисню.....	37
7. Висновок.....	57
8. Перелік використаної літератури.....	58

					КРБ.КТ.613-03.1.10			
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата				
Розробив		Кушніров Д.О.			Лит.		Лист	Листов
Перевірив		Брюханова З.А					2	
Реценз.								
Н. Контр.								
Утвердил								

Вступ

На сучасному етапі науково-технічного прогресу зростає потреба в продуктах криогенної техніки. Розширюються області їх застосування в народному господарстві, і особливо зростає необхідність в продуктах поділу повітря: кисні, азоті, інертними газами. Щорічний приріст виробництва продуктів розділення повітря становить приблизно 12-15%. Основними споживачами кисню та азоту залишаються чорна та кольорова металургія, хімія, нафтопереробка, ракетна техніка.

У зв'язку з цим на сучасному рівні розвитку криогенної техніки проблеми зниження витрат на виробництво продуктів поділу повітря, енерговитрат і матеріаломісткості, а також підвищення надійності установок слід розглядати як комплексну міжгалузеву проблему.

Все більшого поширення отримав метод забезпечення споживачів промисловими газами, що доставляються в рідкому стані, тому стає актуальним питання збільшення частки продуктів поділу, видобутих у вигляді рідини, а також їх зберігання і транспортування.

Все інтенсивніше розвивається виробництво продуктів поділу повітря в стислому газоподібному стані при тиску 0,5-20 МПа. Отримання стислих газів дозволяє відмовитися від компресорів на стадії їх використання.

Великі зміни, що скоротили терміни проектування, відбулися за останні роки в практиці розробки ПРУ створені інформаційні системи на базі ЕВМ, розроблені уніфіковані вузли і апарати, впроваджені системи автоматизованого проектування.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						3
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2. Призначення і область застосування

Проектована повітророздільна установка призначена для одержання рідкого кисню 400 кг/год та газоподібного азоту 1580 м³/год.

Дана установка може використовуватися для заправки кисневих балонів та інших ємностей, а також у виробничих процесах, де є потреба у азота особливої частоти. наприклад, в нафтопереробній промисловості, в хімічній і металургійній промисловості. У нафтопереробній промисловості - в якості захисного середовища в різних процесах; для продувки систем. У хімічній промисловості - при виробництві аміаку, етилену, азотних добрив, пропілену, і т.д. У металургії - як захисне середовище в процесі безперервного рекристалізаційного відпалу холоднокатаної сталі в листопрокатних цільях.

Кисень застосовується в металургійній промисловості: при виплавці конверторної сталі, в мартенівському виробництві сталей, для виплавки спеціальних легованих сталей в електропечах, в прокатному виробництві (різка та вогнева зачистка), при газовій зварці і різанні кольорових металів. У хімічній промисловості - в виробництві азотної кислоти, аміаку, метилового спирту, ацетилену, сірчаної кислоти, також при газифікації низькосортного твердого та рідкого палива, конверсії вуглеводнів (процес переробки газової суміші при високій температурі з метою зміни її первісного складу). Кисень використовують також в гірничорудній промисловості, енергетиці, в ракетно-космічній техніці - як окислювач ракетного палива та інших областях.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						4
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

2. Технічна характеристика

1. Робочий тиск установки:

$$P=6,5\text{МПа};$$

2. Кількість повітря, що переробляється установкою:

$$V=3300\text{ м}^3/\text{Год};$$

3. Паспортна продуктивність установки по газоподібному азоту:

$$P_a=1580\text{ м}^3/\text{Год};$$

4. Паспортна продуктивність установки по рідкого кисню

$$P_k=400\text{ кг}/\text{Год};$$

5. Адіабатическій ККД турбодетандера:

$$\eta=0,72;$$

6. Споживана потужність установки:

$$N_{\text{общ}}=627\text{ кВт}.$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						5
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

3. Опис і обґрунтування схеми установки

Проектowana установка працює по циклу середнього тиску з турбодетандером. Початковий тиск 6,5 МПа. Даний цикл використовується для отримання азоту особливої чистоти і технічного рідкого кисню в установках середньої продуктивності.

Дана установка дозволяє поставляти споживачеві кисень в балонах, що дозволяє відмовитися від застосування компресорів на стадії його використання, розширити ринок збуту і підвищити економічну ефективність установки.

Установка переробляє 3300 м³ / год. повітря. Атмосферне повітря після фільтра, де він очищається від пилу і механічних домішок, надходить в поршневий компресор, так як застосування турбокомпресорів в установках середньої продуктивності неефективно. У компресорі повітря ізотермічні стискається до тиску 6,5 МПа.

Після компресора повітря потрапляє у вологодделитель, де видаляється крапельна волога. Потім потік повітря розділяється і проходить через фракційний і азотний теплообмінники-зріджувач. У них за рахунок теплообміну з зворотним потоком продукционного азоту і відкільної фракції, температура повітря знижується до 281 К.

Після видалення у вологовідділювачі залишків крапельної вологи, повітря надходить в блок очищення, який складається з змінно працюють адсорберов. В них повітря очищається від вуглекислоти, вуглеводнів і залишків вологи. Після блоку очищення повітря надходить на стабілізатор, який дозволяє згладжувати пікові навантаження, що виникають при перемиканні адсорберів блоку очистки.

При температурі 281 К повітря в кількості 0,47 надходить в азотний теплообмінник і в кількості 0,53 кмоль / кмоль в фракційний теплообмінник. Частина потоку з середини азотного теплообмінника в кількості 0,47 кмоль / кмоль і при температурі 150,4 К виходить з теплообмінника і змішується з

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						6
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

потоком з фракційного теплообмінника. Загальний потік в кількості 0,9 кмоль / кмоль і температурою 160 К надходить в турбодетандер на розширення. У турбодетандері відбувається адіабатичне розширення повітря до тиску 0,69 МПа. Решта повітря з азотного теплообмінника в кількості 0,1 кмоль / кмоль і температурою 152 К дроселюється до тиску 0,69 МПа в ВР1. Обидва потоки надходять в куб нижньої колони.

У нижній колоні повітря розділяється. Кубова рідина після переохолодження в переохолоджувач кубової рідини, за рахунок теплообміну з відкідної фракцією, при температурі 103,4 К дроселюється до тиску 0,161 МПа і надходить в переохолоджувач кисню. Кисень охолоджується

до 89,1 К, кубовая рідина надходить в середню частину верхньої колони.

Азотна флегма з кишені колони проходить переохолоджувач азотної флегми, де за рахунок теплообміну з продукційним азотом, охолоджується до температури 88,1 К. Здроселірований потік азотної флегми надходить у верхню частину верхньої колони на зрошення. У верхній колоні відбувається остаточне розділення повітря на газоподібний азот особливої чистоти 0,0001% O₂, рідкий технічний кисень чистотою 99,7% від відкидну фракцію.

Рідкий продукційний кисень конденсатора-випарника в кількості 0,082 кмоль / кмоль після переохолодження в переохолоджувачі кисню надходить споживачеві.

Газоподібний продукційний азот після переохладителя азотної флегми, де він нагрівається до температури 94,3 К, надходить в азотний теплообмінник і теплообмінник-зріджувач, де нагрівається до температури 279 К і з тиском 0,13 МПа надходить споживачеві.

Отбросная фракція з середньої частини верхньої колони направляється в переохолоджувач кубової рідини, де нагрівається до 85 К. Після фракційного теплообмінника і теплообмінника-ожіжителя надходить в електричний обігрівач і використовується в процесі регенерації адсорберов, а потім викидається в атмосферу.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						7
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

На принциповій схемі установки (рис.1) зображені апарати і вузли, що входять до складу установки, а також вузлові точки, що позначають вхід і вихід потоків з апаратів.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						8
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4. Технологічний розрахунок

У технологічному розрахунку проводиться знаходження параметрів в вузлових точках установки. Визначаються параметри потоків на вході і виході з апаратів, а також частки потоків, що йдуть в основні теплообмінники і теплообмінники - зріджувач, на детандер і дросельний вентиль. З енергобалансу нижньої колони визначається навантаження конденсатора-випарника.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						9
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

4.2. Дані для розрахунку

Концентрація, O₂%

продукційного кисню	$X_1^k = 99,7$
продукційного азоту	$Y_1^A = 0,0001$
кубової рідини	$X_1^R = 33$
азотної флегми	$X_1^N = 0,0001$

Частки продуктів поділу, $\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль}}$

продукційного кисню	$K = 0,082$
---------------------	-------------

Температури і різниці температур, К

повітря перед зріджувач	$T_1 = T_2 = T_3 = 310$
повітря на вході в блок очистки	$T_6 = T_7 = 281$
повітря після блоку очищення	$T_8 = T_9 = T_{10} = 283$
повітря перед турбодетандером	$T_{15} = 160$
фракції після основного теплообмінника	$T_{33} = 275$
охолоджувача азотної флегми	$T_N = 10$
охолоджувач кубової рідини	$T_R = 2.2$
охолоджувач кисню	$T_K = 6$
теплової натиск в конденсаторі	$\Delta T_{K-и} = 3,2$

Тиск, Мпа

продукційного азоту	$P_{30} = 0,125$
продукційного кисню	$P_{26} = 0,160$
фракції з колони	$P_{31} = 0,154$
в кубе нижньої колони	$P = 0,69$
у верхній колоні	$P = 0,145$

Опір, Мпа

фракційного оживдзувач	$\Delta P = 0,005$
азотного оживдзувач	$\Delta P = 0,005$

										Лист
										11
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КРБ.КТ.613-03.1.10					

блоку комплексної очистки	$\Delta P=0,02$
фракційного теплообмінника	$\Delta P=0,01$
азотного теплообмінника	$\Delta P=0,01$
нижньої колони	$\Delta P=0,01$
верхньої колони	$\Delta P=0,02$
охолоджувач	$\Delta P=0,005$
<u>теплопритоки</u> , $\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$	
в блок поділу через ізоляцію	$q_{б.р}=150$
до верхньої колони	$q_{в.к}=60$
до нижньої колони	$q_{н.к}=30$
до конденсатору-випарника	$q_{к-и}=30$
до охолоджувачів	$q_{охл}=5$
до теплообмінників	$q_{т-о}=25$
до зріджувач	$q_{ож}=5$
до блоку очищення	$q_{б.о}=60$
<u>Адіабатний ККД турбодетандера</u>	$\eta = 0,72$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						12
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Тиск в колонах

Тиск газоподібного азоту на виході з установки

$$P=0,125 \text{ , МПа.}$$

Загальний опір на лінії виходить азоту

$$\Delta P=0,02 \text{ , МПа.}$$

Тиск газоподібного азоту на виході з верхньої колони

$$P=0,145 \text{ , МПа.}$$

Тиск в кубі верхньої колони

$$P = 0,145 + 0,02 = 0,165 \text{ МПа.}$$

При тиску 0,165 МПа температура кипіння рідкого кисню $T = 95,103\text{K}$.

Знаючи температурний напір в конденсаторі-випарнику

$T = 3,2 \text{ K}$, знаходимо температуру конденсації азоту

$$T = 95,13 + 3,2 = 98,123 \text{ K.}$$

Знаходимо тиск конденсації азоту в конденсаторі-випарнику

$$P=0,68 \text{ МПа.}$$

Тиск в кубі нижньої колони

$$P = 0,68 + 0,01 = 0,69 \text{ МПа.}$$

Опором на лінії надходження повітря в нижню колону нехтуємо.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						13
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Визначення кількості повітря та частки продуктів розділення

Мінімальна кількість повітря, переробляється:

$$V_{\min}^1 = \frac{P_k / \rho_{O_2}}{K} \quad (5.1)$$

где :

$$P_k = 300 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}$$

P_k – паспортні характеристики на кисень;

ρ_{O_2} – щільність кисню при температурі 293К и давлении 760мм.рт.ст.

$$\rho_{O_2} = 1,314 \text{ кг/м}^3$$

K – Частка виробництва кисню;

$$K = 0,082 \text{ кмоль/кмоль}$$

$$V_{\min}^1 = \frac{300 / 1,314}{0,082} = 2780 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Орієнтовна кількість переробленої повітря з урахуванням 5% втрат у зв'язку, чисток та 5% втрати на коливання продуктивності компресора:

$$V = \frac{V_{\min}^1}{0,9} \quad (5.2)$$

$$V = \frac{2780}{0,9} = 3089 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}$$

Для забезпечення необхідної продуктивності в компресор типу 4ВМ10-55/71, продуктивність компресора 3300 м³/год. Мінімальна кількість вторинного повітря з урахуванням його втрати в комінох, чисток і коливаннях у виконанні компресора, приймається дорівнює 90% від номінальної суми:

$$V' = 0,9 \cdot 3300 = 2970 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Максимальні показники рідкого кисню:

$$K_L = 0,082 \cdot 2970 \cdot 1,314 = 320 \text{ кг/ч.}$$

Відсоток виробництва азоту при розрахунковому обсязі повітря обробляється:

$$A = \frac{P_a}{V'} \quad (5.3)$$

где:

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						14
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$P_a = 1470$ – паспортні характеристики на азот;

$V' = 2970$ – Мінімальна кількість вторинного повітря з урахуванням втрат;

$$A = \frac{1470}{2970} = 0,4949 \text{ кмоль/кмоль .}$$

Доля фракции

$$V = \Phi + K + A;$$

$$\Phi = V - K - A;$$

$$\Phi = 1 - 0,082 - 0,5 = 0,4231 \text{ кмоль/кмоль .}$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						15
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5. РОЗРАХУНКИ АПАРАТІВ

Дані технічного завдання

Робоча рідина	повітря;
Тиск газу на вході у турбодетандері	$P_5 = 7.06 \text{ МПа}$;
Тиск на виході з турбодетандеру	$P_6 = 0.675 \text{ МПа}$;
Масова витрата газу	$G = 0.2789 \text{ кг/с}$;
Об'ємна витрата газу	$V = 843 \text{ м}^3 / \text{ч}$;
Температура газу на вході у турбодетандер	$T_5 = 185 \text{ К}$;
Температура газу на виході з турбодетандеру	$T_6 = 102 \text{ К}$;

5.1 Розрахунок ректифікаційної колони

Основна ціль розрахунку – визначення конструктивних й технологічних параметрів ректифікаційної колони.

Ректифікаційна колона проектованої установки представляє собою циліндричну посудину з внутрішнім діаметром 700 мм у якій встановлено 24 алюмінієвих поперечно-точних тарілок з сепарацією фаз. Відстань між тарілками $H_T = 50 \text{ мм}$. По висоті колони поперемінно встановлені тарілки з двома й з одним зливними карманами, тим самим забезпечує поперемінний приплив рідини.

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

ΔP_T – опір тарілки.

Виробляємо гідравлічний розрахунок тарілки, який перевіряє нормальну працездатність колони й підберемо найбільш оптимальний діаметр перфорації тарілок.

Середній опір тарілки визначимо із розрахунку верхнього та нижнього січення колони

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						16
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Розрахунок верхнього січення колони

Дані для розрахунку:

Тип тарілки – духзливна.

Кількість пару у січенні

$$G_1 = 0.773 \text{ кмоль / кмоль ;}$$

Кількість рідини у січенні

$$g_1 = 0.384 \text{ кмоль / кмоль ;}$$

Концентрація пару та рідини

$$y_1 = x_1 = 98\% \text{ об. } N_2 ;$$

Щільність пара

$$\rho^{\text{II}} = 26.941 \text{ кг / м}^3 ;$$

Щільність рідини

$$\rho^{\text{Ж}} = 685.165 \text{ кг / м}^3 ;$$

Щільність азоту при нормальних умовах

$$\rho_{\text{Н.У.}}^{N_2} = 1.167 \text{ кг / м}^3 ;$$

Тиск у січенні

$$P_B = 0.66 \text{ МПа ;}$$

Температура

$$T_B = 97.7 \text{ К ;}$$

Коефіцієнт поверхносного натягу:

$$\sigma = [25.16 - 0.211 \cdot T_B] \cdot 10^{-3} ,$$

(6.1)

$$\sigma = [25.16 - 0.211 \cdot 97.7] \cdot 10^{-3} = 4.545 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м ;}$$

Витрата рідини у робочих умовах:

$$L_p = \frac{g_1 \cdot B \cdot \rho_{\text{Н.У.}}^{N_2}}{\rho^{\text{Ж}}} ,$$

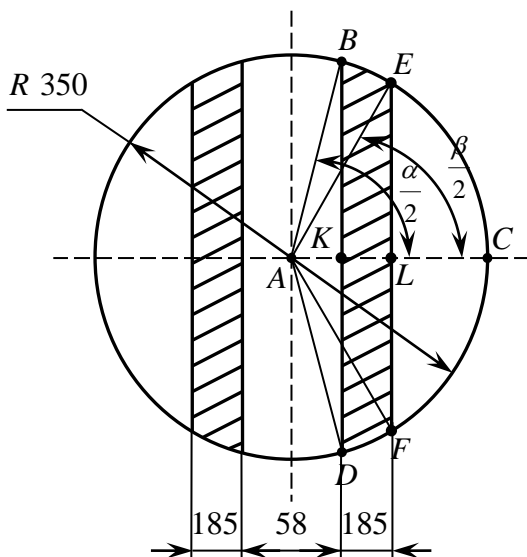
(6.2)

$$L_p = \frac{0.384 \cdot 3000 \cdot 1.167}{685.165} = 1.962 \text{ м}^3 / \text{ч ;}$$

Витрата пару у робочих умовах:

$$G_p = \frac{G_1 \cdot B \cdot \rho_{\text{Н.У.}}^{N_2}}{\rho^{\text{II}}} ,$$

(6.3)



Малюнок 6.1 – Схема двухзливной тарілки

$$G_p = \frac{0.773 \cdot 3000 \cdot 1.167}{26.941} = 100.452 \text{ м}^3 / \text{ч ;}$$

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата	КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист 17
------	------	----------	---------	------	--------------------	------------

Ширина перфораційної полоси – 185мм ;

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

Ширина приймального карману – 58мм ;

Площа барботажу

$$F_B = 2F_{BEFD} \quad (6.4)$$

Площа сектору $ABCD$:

$$F_{ABCD} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \alpha}{360} \quad (6.5)$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{AK}{AB} \quad (6.6)$$

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

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

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

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

Площа трикутника ABD :

$$F_{\Delta ABD} = AK \cdot BK, \quad (6.7)$$

$$BK = \sqrt{R^2 - AK^2}, \quad (6.8)$$

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

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

Площа сектору $AECF$:

$$F_{AECF} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \beta}{360}, \quad (6.9)$$

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{AL}{AE}, \quad (6.10)$$

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

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

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						18
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$W_B = \frac{G_P}{3600 \cdot F_B''}, \quad (6.16)$$

$$W_B = \frac{100.452}{3600 \cdot 0.2394} = 0.117 \text{ м/с};$$

Швидкість пару у щілинному проміжку:

$$W_{щ} = \frac{G_P}{3600 \cdot F_{щ}''}, \quad (6.17)$$

$$W_{щ} = \frac{100.452}{3600 \cdot 0.020} = 1.395 \text{ м/с};$$

Щільність зрошення:

$$i'' = \frac{L_P}{P_{с.п}''}, \quad (6.18)$$

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

$$P_{с.п}^I = 2 \cdot l_{с.п.}'' , \quad (6.19)$$

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

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

$$i'' = \frac{1.962}{1.024} = 1.916 \text{ м}^2 / \text{ч};$$

Коефіцієнт опіру щілинного проміжку:

$$\xi_{щ} = 1.8 \cdot \sin \gamma + 1, \quad (6.20)$$

де γ – 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:

$$h_{кр.} = 4.3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L_P}{P_{пер.}}\right)^2 \cdot \frac{1}{g}}, \quad (6.21)$$

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

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						20
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\Delta P_C = \xi_o \cdot \frac{W_o^2 \cdot \rho''}{2}; \quad (6.30)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_C^{0.9} = 1.82 \cdot \frac{1.68^2 \cdot 26.941}{2} = 69 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \Delta P_C^{1.0} = 1.78 \cdot \frac{1.36^2 \cdot 26.941}{2} = 44 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_C^{1.1} = 1.74 \cdot \frac{1.12^2 \cdot 26.941}{2} = 29 \text{ Па};$$

Визначення втрат натиску від поверхневого натягу:

$$\text{Для } d_o \leq 1.0 \text{ мм}, \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{d_o}; \quad (6.31)$$

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

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

$$\text{Для } d_o > 1.0 \text{ мм}, \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{1.3 \cdot d_o + 0.08 \cdot d_o^2}; \quad (6.32)$$

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

Повний опір тарілки:

$$\Delta P_T'' = \Delta P_{\text{Щ}}^C + \Delta P_{\text{Щ}} + \Delta P_C + \Delta P_\sigma + \rho^{\text{ж}} \cdot g \cdot h; \quad (6.33)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_T'' = 33 + 36 + 69 + 20 + 685.165 \cdot 9.81 \cdot 5.9 \cdot 10^{-3} = 198 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \Delta P_T'' = 33 + 36 + 44 + 18 + 685.165 \cdot 9.81 \cdot 5.9 \cdot 10^{-3} = 171 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_T'' = 33 + 36 + 29 + 13 + 685.165 \cdot 9.81 \cdot 5.9 \cdot 10^{-3} = 151 \text{ Па};$$

Максимально допустимий опір тарілки:

$$\Delta P_{T \text{ MAX}} = 0.00826 \cdot \rho^{\text{ж}} \cdot \left(H_T + 15 - 1.195 \cdot S_K - 2.1 \cdot h_{\text{КР}} - 1.45 \cdot \frac{h_{\text{КР}}^3}{S_K^2} \right), \quad (6.34)$$

$$\Delta P_{T \text{ MAX}} = 0.00826 \cdot 685.165 \cdot \left(50 + 15 - 1.195 \cdot 5 - 2.1 \cdot 3.1 - 1.45 \cdot \frac{3.1^3}{5^2} \right) = 294 \text{ Па};$$

										Лист
										23
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата						

Кожний з варіантів перфорації задовольняє умові $\Delta P_T^H < \Delta P_{T \text{ MAX}}$, отже колона працює стабільно без зависання.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						24
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Розрахунок нижнього січення колони

Дані для розрахунку:

Тип тарілки – однозливна.

Кількість пару у січенні

$$G_2 = 0.342 \text{ кмоль / кмоль ;}$$

Кількість рідини у січенні

$$g_2 = 0.672 \text{ кмоль / кмоль ;}$$

Температури кипіння чистих продуктів при

$$P = 0.67 \text{ МПа :}$$

Кисню

$$T_1 = 113.1 \text{ К ;}$$

Азоту

$$T_2 = 97.9 \text{ К ;}$$

Концентрації:

Пару

$$y_1 = 76.9\% \text{ об. } N_2 ;$$

Рідини

$$x_1 = 67\% \text{ об. } N_2 ;$$

Щільність чистих насичених рідин продуктів:

Кисню

$$\rho^{Кжс} = 1004.141 \text{ кг / м}^3 ;$$

Азоту

$$\rho^{Ажс} = 683.651 \text{ кг / м}^3 ;$$

Щільність чистих газоподібних продуктів:

Кисню

$$\rho^K = 25.837 \text{ кг / м}^3 ;$$

Азоту

$$\rho^A = 27.346 \text{ кг / м}^3 ;$$

Щільність пару при нормальних умовах:

$$\rho_{Н.У.}^П = \rho_{Н.У.}^A \cdot y_1 + \rho_{Н.У.}^K \cdot (1 - y_1), \quad (6.35)$$

$$\rho_{Н.У.}^П = 1.167 \cdot 0.769 + 1.334 \cdot (1 - 0.769) = 1.206 \text{ кг / м}^3 ;$$

Щільність рідини при нормальних умовах:

$$\rho_{Н.У.}^Ж = \rho_{Н.У.}^A \cdot x_1 + \rho_{Н.У.}^K \cdot (1 - x_1), \quad (6.36)$$

$$\rho_{Н.У.}^Ж = 1.167 \cdot 0.67 + 1.334 \cdot (1 - 0.67) = 1.222 \text{ кг / м}^3 ;$$

Щільність суміші пару:

$$\rho_{П} = \frac{\rho_{Н.У.}^П}{\frac{\rho_{Н.У.}^A}{\rho^A} \cdot y_1 + \frac{\rho_{Н.У.}^K}{\rho^K} \cdot (1 - y_1)}, \quad (6.37)$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист 25
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\rho_{II} = \frac{1.206}{\frac{1.167}{27.346} \cdot 0.769 + \frac{1.334}{25.837} \cdot (1 - 0.769)} = 26.953 \text{ кг} / \text{ м}^3 ;$$

Щільність суміші рідини:

$$\rho_{ж} = \frac{\rho_{H.Y.}^{\text{ж}}}{\frac{\rho_{H.Y.}^A}{\rho_{Aж}} \cdot x_1 + \frac{\rho_{H.Y.}^K}{\rho_{Kж}} \cdot (1 - x_1)}, \quad (6.38)$$

$$\rho_{ж} = \frac{1.222}{\frac{1.167}{683.651} \cdot 0.67 + \frac{1.334}{1004.141} \cdot (1 - 0.67)} = 772.390 \text{ кг} / \text{ м}^3 ;$$

Коефіцієнт поверхневого натягу:

Кисню:

$$\sigma_1 = (36.36 - 0.255 \cdot T_1) \cdot 10^{-3}, \quad (6.39)$$

$$\sigma_1 = (36.36 - 0.255 \cdot 113.1) \cdot 10^{-3} = 7.52 \cdot 10^{-3} \text{ Н} / \text{ м} ;$$

Азоту:

$$\sigma_2 = (25.16 - 0.211 \cdot T_2) \cdot 10^{-3}, \quad (6.40)$$

$$\sigma_2 = (25.16 - 0.211 \cdot 97.9) \cdot 10^{-3} = 4.503 \cdot 10^{-3} \text{ Н} / \text{ м} ;$$

Поверхневий натяг суміші:

$$\sigma = \sigma \cdot x_1 + \sigma \cdot x_2, \quad (6.41)$$

$$\sigma = 7.52 \cdot 10^{-3} \cdot 0.33 + 4.503 \cdot 10^{-3} \cdot 0.67 = 5.5 \cdot 10^{-3} \text{ Па} ;$$

Визначення площі барботажу однозливної тарілки:

$$F_B^I = 2 \cdot F_{ABDE}; \quad (6.42)$$

Ширина не перфорованих смуг 50мм .

Ширина зливного карману 195мм .

Площа сектору OACE :

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

(6.43)

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						26
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

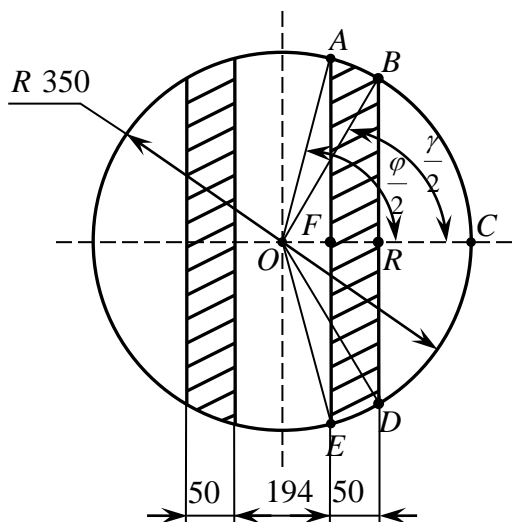


Рисунок 6.3 – Схема односливной тарелки

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \frac{OF}{OA}, \quad (6.44)$$

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

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

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

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

Площа сектору $OBCD$:

$$F_{OBCD} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \gamma}{360}, \quad (6.45)$$

$$\cos \frac{\gamma}{2} = \frac{OR}{OB}, \quad (6.46)$$

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

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

$$\gamma = 130.4^\circ;$$

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

Площа трикутника OAE :

$$F_{\Delta OAE} = \frac{1}{2} \cdot OF \cdot AE, \quad (6.47)$$

$$AE = 2 \cdot \sqrt{OA^2 - OF^2}, \quad (6.48)$$

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

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

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						27
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Площа трикутника OBD :

$$F_{OBCD} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \gamma}{360}, \quad (6.45)$$

$$\cos \frac{\gamma}{2} = \frac{OR}{OB}, \quad (6.46)$$

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

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

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

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

Площа трикутника OAE :

$$F_{\Delta OAE} = \frac{1}{2} \cdot OF \cdot AE, \quad (6.47)$$

$$AE = 2 \cdot \sqrt{OA^2 - OF^2}, \quad (6.48)$$

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

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

Площа трикутника OBD :

$$F_{\Delta OBD} = \frac{1}{2} \cdot OR \cdot BD, \quad (6.49)$$

$$BD = 2 \cdot \sqrt{OB^2 - OR^2}, \quad (6.50)$$

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

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

Площа сегменту BCD :

$$F_{BCD} = F_{OBCD} - F_{\Delta OBD}, \quad (6.51)$$

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

Площа однієї перфорованої полоси:

$$F_{ABDE} = F_{OACE} - F_{BCD} - F_{\Delta OAE}, \quad (6.52)$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						28
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

Площа барботажу:

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

Витрата рідини у робочих умовах:

$$L_P = \frac{g_2 \cdot B \cdot \rho_{H.V.}^{\text{ж}}}{\rho^{\text{ж}}}, \quad (6.53)$$

$$L_P = \frac{0.672 \cdot 3000 \cdot 1.222}{772.390} = 3.19 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

Витрата пару у робочих умовах:

$$G_P = \frac{G_2 \cdot B \cdot \rho_{H.V.}^{\text{п}}}{\rho^{\text{п}}}, \quad (6.54)$$

$$G_P = \frac{0.342 \cdot 3000 \cdot 1.206}{26.953} = 45.908 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

Швидкість барботажу:

$$W_B^I = \frac{G_P}{3600 \cdot F_B^I}, \quad (6.55)$$

$$W_B^I = \frac{45.908}{3600 \cdot 0.0656} = 0.1944 \text{ м} / \text{с};$$

Площа щілинного проміжку:

$$F_{\text{щ}}^I = l_{\text{щ}}^I \cdot m, \quad (6.56)$$

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

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

$$F_{\text{щ}}^I = 2 \cdot 0.660 \cdot 0.0195 = 0.0257 \text{ м}^2; \quad (6.57)$$

Швидкість пару у щілинному проміжку:

$$W_{\text{щ}} = \frac{G_P}{3600 \cdot F_{\text{щ}}^I}, \quad (6.58)$$

$$W_{\text{щ}} = \frac{45.908}{3600 \cdot 0.0257} = 0.496 \text{ м} / \text{с};$$

Щільність зрошення:

$$i^I = \frac{L_P}{P_{C.п}^I}, \quad (6.59)$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						29
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

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

Мінімально допустима швидкість пару у отворах тарілки:

$$W_{II \text{ MIN}} = 0.0364 \cdot \xi_o^{-0.625} \cdot \left(\frac{h}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho^{\text{ж}}}{\rho^{\text{п}}}}; \quad (6.69)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } W_{II \text{ MIN}}^{0.9} = 0.0364 \cdot 1.82^{-0.625} \cdot \left(\frac{7.3 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{772.390}{26.953}} = 1.40 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } W_{II \text{ MIN}}^{1.0} = 0.0364 \cdot 1.78^{-0.625} \cdot \left(\frac{7.3 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{772.390}{26.953}} = 1.42 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } W_{II \text{ MIN}}^{1.1} = 0.0364 \cdot 1.74^{-0.625} \cdot \left(\frac{7.3 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{772.390}{26.953}} = 1.44 \text{ м/с};$$

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

Опір не зрошуваної тарілки:

$$\Delta P_c = \xi_o \cdot \frac{W_o^2 \cdot \rho^{\text{п}}}{2}; \quad (6.70)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_c = 1.82 \cdot \frac{2.77^2 \cdot 26.953}{2} = 188 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \Delta P_c = 1.78 \cdot \frac{2.24^2 \cdot 26.953}{2} = 120 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_c = 1.74 \cdot \frac{1.88^2 \cdot 26.953}{2} = 83 \text{ Па};$$

Визначення втрат натиску від поверхневого натягу:

$$\text{Для } d_o \leq 1.0 \text{ мм}, \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{d_o}; \quad (6.71)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot 5.5 \cdot 10^{-3}}{0.0009} = 24 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot 5.5 \cdot 10^{-3}}{0.001} = 22 \text{ Па};$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						32
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\text{Для } d_o > 1.0 \text{ мм } \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{1.3 \cdot d_o + 0.08 \cdot d_o^2}; \quad (6.72)$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_\sigma^{1.1} = \frac{4 \cdot 5.5 \cdot 10^{-3}}{1.3 \cdot 0.0011 + 0.08 \cdot 0.0011^2} = 15 \text{ Па};$$

Повний опір тарілки:

$$\Delta P_T^I = \Delta P_{\text{щ}}^C + \Delta P_{\text{щ}} + \Delta P_C + \Delta P_\sigma + \rho^{\text{ж}} \cdot g \cdot h; \quad (6.73)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм } \Delta P_T^I = 33 + 43 + 188 + 24 + 772.39 \cdot 9.81 \cdot 7.3 \cdot 10^{-3} = 343 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм } \Delta P_T^I = 33 + 43 + 120 + 22 + 772.39 \cdot 9.81 \cdot 7.3 \cdot 10^{-3} = 273 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм } \Delta P_T^I = 33 + 43 + 83 + 15 + 772.39 \cdot 9.81 \cdot 7.3 \cdot 10^{-3} = 229 \text{ Па};$$

Максимально допустимий опір тарілки:

$$\Delta P_{T \text{ MAX}} = 0.00826 \cdot \rho^{\text{ж}} \cdot \left(H_T + 15 - 1.195 \cdot S_K - 2.1 \cdot h_{\text{кр}} - 1.45 \cdot \frac{h_{\text{кр}}^3}{S_K^2} \right), \quad (6.74)$$

$$\Delta P_{T \text{ MAX}} = 0.00826 \cdot 772.39 \cdot \left(50 + 15 - 1.195 \cdot 5 - 2.1 \cdot 3.6 - 1.45 \cdot \frac{3.6^3}{5^2} \right) = 311 \text{ Па};$$

Тарілка з перфорацією рівній $d_o = 0.9 \text{ мм}$ умова $\Delta P_T^{II} < \Delta P_{T \text{ MAX}}$ не виконується.

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.

Середній опір тарілки:

$$\Delta P_T = \frac{\Delta P_T^{II} + \Delta P_T^I}{2}, \quad (6.75)$$

$$\Delta P_T = \frac{151 + 229}{2} = 190 \text{ Па};$$

Загальний опір колони:

$$\Delta P_K = 42 \cdot 190 = 7980 \text{ Па};$$

Отриманий опір не перевищує прийнятого у початкових даних завдання. Таким чином, діаметр колони й перфорації, відстань між тарілками повністю задовольняють й забезпечують нормальну працю нижньої колони.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						33
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.2 Розрахунок конденсатора-випарника

Конденсатор-випарник (КВ) спроектованої установки являє собою пластинчато-ребристий пакет, який укладено в окремій корпус. Апарат розташований над ректифікаційною колоною. У цьому апараті відбувається конденсація азотної флегми за рахунок кипіння фракції, збагаченої киснем.

Вибір припав на пластинчато-ребристий конденсатор тому, що він виконаний зі сплавів на основі алюмінію, за рахунок чого досягається висока ефективність теплообміну. Завдяки високій компактності пластинчато-ребристих теплообмінників, апарат менше за габаритами, легше і дешевше трубчастих конденсаторів-випарників при такому самому тепловому навантаженні. Експериментально доведено, що пластинчато-ребристі конденсатори-випарники надійно працюють в умовах досить інтенсивної циркуляції киплячого кисню і при досить малих температурних напорах, які дорівнюють 1,6-1,8 К.

Пластинчато-ребристі КВ забезпечуючи більш високі значення коефіцієнта теплопередачі в порівнянні з апаратами інших типів. Експериментально доведено, що пластинчато-ребристий КВ забезпечує зниження питомої витрати енергії і зменшення собівартості готового продукту. Тому з огляду на техніко-економічні показники пластинчато-ребристого КВ, вибір припав саме на нього.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						34
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Вихідні дані

Теплове навантаження апарату

$$Q_K = 3873,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}} = 127,3 \text{кВт}$$

Тиск; МПа

кипіння фракції

$$P_{\text{кип}} = 0,375$$

конденсація азоту

$$P_{\text{конд}} = 0,665.$$

Концентрація киплячої суміші:

$$x_{\phi 1} = 27,25\% O_2,$$

$$x_{\phi 3} = 72,75\% N_2.$$

Температура киплячої середи в верхньому перерізі КВ $T_{\text{кип}} = 95,5\text{К}$.

температура конденсації азоту

$$T_{\text{конд}} = 97,7\text{К}.$$

швидкість циркуляції

$$W_0 = 0,05 \text{ м/с}$$

довжина пакету

$$l = 1000 \text{ мм} = 1 \text{ м};$$

ширина пакету

$$b_1 = 300 \text{ мм} = 0,3 \text{ м};$$

висота пакету

$$b_2 = 500 \text{ мм} = 0,5 \text{ м};$$

ширина проставочної смуги

$$b_3 = 0,018 \text{ м};$$

висота насадки

$$l_1 = l_2 = 0,006 \text{ м};$$

шаг оребріння

$$S_1 = S_2 = 0,002 \text{ м};$$

товщина насадки

$$\delta_1 = \delta_2 = 0,0002 \text{ м};$$

товщина стінок каналів

$$\delta = 0,001 \text{ м};$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						35
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

5.3. Визначення температурного натиску на стороні конденсації і кипіння

Формули для розрахунку різниці температур стінки і середовища при конденсації і кипінні

$$\Delta T_{\text{конд}} = \frac{q_{\text{конд}} * l}{\lambda} * \left(\frac{q_{\text{конд}} * l}{b_m} * \frac{1}{a_m * l^3} \right)^{1/3} \quad (6.4)$$

$$\Delta T_{\text{кип}} = 2.16 * q_{\text{кип}}^{0.3} * \left(\frac{l}{d} \right)^{-0.45} * H^{0.185}$$

Всі дані заносимо до Excel, в таблицю 6.1.

За допомогою температурних натисків $\Delta T_{\text{конд}}$ і $\Delta T_{\text{кип}}$ знаходимо щільність теплового потоку, $q \approx 1500 \text{ Вт/м}^2$.

Таблиця 6.1 - Тепловий потік крізь стінку КВ

q	DT _{кип}	DT _{конд}	DT
0	0	0	0
100	0,67	0,018097	0,689099
200	0,83	0,045591	0,871692
300	0,93	0,078273	1,011227
400	1,02	0,114857	1,131906
500	1,09	0,154645	1,242109
600	1,15	0,19719	1,345792
700	1,20	0,242173	1,445139
800	1,25	0,289354	1,541488
900	1,30	0,338544	1,635713
1000	1,34	0,389592	1,728417
1100	1,38	0,442371	1,82003
1200	1,41	0,496774	1,910868
1300	1,45	0,552709	2,00117
1400	1,48	0,610097	2,091121
1500	1,51	0,668867	2,180865
1600	1,54	0,728957	2,270515
1700	1,57	0,790312	2,360163
1800	1,60	0,852881	2,449883
1900	1,62	0,916618	2,539736
2000	1,65	0,981484	2,629771

6. Розрахунок переохолоджувача рідини кисню

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі й теплопередачі, середню різницю температур між потоками рідкого кисню, низького тиску і кубової рідиною низького тиску у двухпоточному витому гладкотрубному теплообміннику. Визначити поверхню теплообміну, діаметр труб та довжину навивки, кількість шарів, скласти таблицю навивки теплообмінника. Розрахувати гідравлічний опір теплообміннику й перевірити на міцність днище та обечайку корпусу апарату.

Початкові дані:

Розрахункова кількість переробляемого повітря $V = 0.0342 \text{ кмоль/с}$;

Мольні частки потоків:

Продукційного кисню $K = 0.194 \text{ кмоль/кмоль}$;

Кубової рідини $R = 0.611 \text{ кмоль/кмоль}$;

Тиск:

Кисню $P^K = 0.154 \text{ МПа}$;

Кубової рідини $P^R = 0.164 \text{ МПа}$;

Температура:

Кисню на вході до теплообміннику $T_{16} = 94.4 \text{ К}$;

Кубової рідини на вході до теплообміннику $T_{11} = 82.8 \text{ К}$;

Кисню на виході з теплообміннику $T_{17} = 87.5 \text{ К}$;

Теплопритоки до переохолоджувачу $q_{по.}^K = 5 / 3 \text{ кДж/кмоль}$;

Розрахунок масових витрат прямого та зворотнього потоків

Визначасмо мольні витрати потоків кисню й кубової рідини:

$$M^K = V \cdot K, \quad (6.78)$$

$$M^K = 0.0342 \cdot 0.194 = 0.0066 \text{ кмоль/с};$$

$$M^R = V \cdot R, \quad (6.79)$$

$$M^R = 0.0342 \cdot 0.611 = 0.0209 \text{ кмоль/с};$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						37
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Визначаємо масові витрати прямого та зворотнього потоків:

$$G^K = M^K \cdot \mu^K \cdot 3600, \quad (6.80)$$

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

$$G^K = 0.0066 \cdot 32 \cdot 3600 = 760.3 \text{ кг/ч},$$

$$G^R = M^R \cdot \mu^R \cdot 3600, \quad (6.81)$$

$$\mu^R = \mu^K \cdot x^R + \mu^A \cdot (1 - x^R) \quad (6.82)$$

– мольна маса кубової рідини,

$$\mu^R = 32 \cdot 0.33 + 28.02 \cdot (1 - 0.33) = 29.33 \text{ кг/кмоль},$$

$$G^R = 0.0209 \cdot 29.33 \cdot 3600 = 2206.8 \text{ кг/ч};$$

Визначення теплофізичних властивостей кисню та кубової рідини.

Параметри прямого та зворотнього потоків визначаємо по їх середнім температурам. При цьому враховуємо, що температура кубової рідини при кипінні у межтрубовому просторі змінюється не значно та її можна прийняти постійною.

Середня температура прямого потоку:

$$T_{CP}^{пр.} = \frac{T_{16} + T_{17}}{2}, \quad (6.83)$$

$$T_{CP}^{пр.} = \frac{94.4 + 87.5}{2} = 90.95 \text{ K};$$

Середню температуру зворотнього потоку приймаємо:

$$T_{CP}^{об.} = T_{11} = 82.8 \text{ K};$$

Теплофізичні властивості кубової рідини будемо визначати по рівнянню зміщення. Тому спочатку визначимо властивості азоту та кисню при $P = 0.164 \text{ МПа}$ и $T = 82.8 \text{ K}$.

Таблиця 4 – Теплофізичні параметри речовин.

Речовин	$P, \text{ МПа}$	$T, \text{ K}$	$\rho, \text{ кг/м}^3$	$C_p, \text{ кДж/кг} \cdot \text{ K}$	$\lambda, \text{ Вт/м} \cdot \text{ K}$	$\nu \cdot 10^6, \text{ Па} \cdot \text{ с}$
Кисень	0.164	82.8	188.418	1.708	0.16198	287.6
Азот	0.164	82.8	7.058	1.102	0.00832	5.5

По рівнянню зміщення:

$$Cp^R = Cp^K \cdot x^R + Cp^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.84)$$

$$\rho^R = \rho^K \cdot x^R + \rho^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.85)$$

$$\lambda^R = \lambda^K \cdot x^R + \lambda^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.86)$$

$$\mu^R = \mu^K \cdot x^R + \mu^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.87)$$

де x^R – концентрація кисню у кубовій рідині, $x^R = 33\%$ об. O_2 .

При цьому значенні й необхідно перевести у мольні одиниці, а потім здійснити зворотній переказ:

$$Cp^K = Cp^{K'} \cdot \mu^K, \quad (6.88)$$

$$Cp^A = Cp^{A'} \cdot \mu^A, \quad (6.89)$$

$$\rho^K = \rho^{K'} / \mu^K, \quad (6.90)$$

$$\rho^A = \rho^{A'} / \mu^A, \quad (6.91)$$

$$\mu^R = \mu^K \cdot x^R + \mu^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.92)$$

$$\mu^R = 32 \cdot 0.33 + 28.02 \cdot (1 - 0.33) = 29.33 \text{ кг / кмоль},$$

де μ^K и μ^A – молярні маси кисню та азоту,

μ^R – молярна маса кубової рідини

$$\rho^R = [(\rho^{K'} / \mu^K) \cdot x^R + (\rho^{A'} / \mu^A) \cdot (1 - x^R)] \cdot \mu^R, \quad (6.93)$$

$$\rho^R = [(1188.418 / 32) \cdot 0.33 + (7.058 / 28.02) \cdot (1 - 0.33)] \cdot 29.33 = 364.41 \text{ кг / м}^3,$$

$$Cp^R = [(Cp^{K'} \cdot \mu) \cdot x^R + (Cp^{A'} \cdot \mu^A) \cdot (1 - x^R)] / \mu^R, \quad (6.94)$$

$$Cp^R = [(1.708 \cdot 32) \cdot 0.33 + (1.102 \cdot 28.02) \cdot (1 - 0.33)] / 29.33 = 1.320 \text{ кДж / кг} \cdot \text{K},$$

$$\lambda^R = \lambda^K \cdot x^R + \lambda^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.95)$$

$$\lambda^R = 0.16198 \cdot 0.33 + 0.00832 \cdot (1 - 0.33) = 0.05903 \text{ Вт / м} \cdot \text{K},$$

$$\nu^R = \nu^K \cdot x^R + \nu^A \cdot (1 - x^R), \quad (6.96)$$

$$\nu^R = 287.6 \cdot 10^{-6} \cdot 0.33 + 5.5 \cdot 10^{-6} \cdot (1 - 0.33) = 98.59 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

Результати розрахунку теплофізичних властивостей речовин зведемо у таблицю 5.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						39
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Таблиця 5 – Теплофізичні властивості потоків кисню та кубової рідини.

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	0.154	90.95	1145.57	1.747	0.14759	225.4
Кубова рідина	0.164	82.8	364.41	1.320	0.05903	98.59

Енергетичний баланс теплообміннику

Енергетичний баланс апарату був розрахован у технологічному розрахунку схеми установки(п. 4.4.3.). Повторювати його у данному розрахунку немає необхідності.

Визначимо коефіцієнт тепловіддачі

Для навивки теплообміннику обираємо мідну трубку $10 \times 1 \text{мм}$ (т.е. 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 течії трубного (кисневого) потоку знайдемо величину критерії Рейнольдса:

$$\text{Re}^{TP} = \frac{\omega_1 \cdot \rho_1 \cdot d_1}{\nu^{TP}}, \quad (6.97)$$

$$\text{Re}^{TP} = \frac{600 \cdot 0.008}{225.4 \cdot 10^{-6}} = 21295$$

Критичне значення числа Рейнольдса для трубного простору :

$$\text{Re}_{KP}^{TP} = 2300 \cdot \left[1 + 8.6 \cdot \left(\frac{d_1}{D_{CP}} \right)^{0.45} \right], \quad (6.98)$$

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

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

						Лист
						40
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Так як $Re^{TP.} \gg Re_{KP.}^{TP.}$, то у міжтрубному просторі встановлюється розвинутий турбулентний плин.

У цьому випадку критерії Нуссельта визначається по наступній залежності :

$$Nu^{TP.} = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \varepsilon, \quad (6.99)$$

де критерій Прандля:

$$Pr^{TP.} = \frac{\nu^K \cdot Cp^K}{\lambda^K}, \quad (6.100)$$

$$Pr^{TP.} = \frac{225.4 \cdot 10^{-6} \cdot 1.747 \cdot 10^3}{0.14759} = 2.668,$$

ε – коефіцієнт враховуючий кривизну трубок:

$$\varepsilon = 1 + 3.54 \cdot \frac{d_1}{D_{CP.}}, \quad (6.101)$$

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

Підставляючи значення $Pr^{TP.}$ и ε у формулу критерію Нуссельта отримаємо:

$$Nu^{TP.} = 0.021 \cdot 21295^{0.8} \cdot 2.668^{0.43} \cdot 1.1416 = 106.1$$

Коефіцієнт тепловіддачі від кисню до трубки:

$$\alpha^{TP.} = Nu^{TP.} \cdot \frac{\lambda^K}{d_1}, \quad (6.102)$$

$$\alpha^{TP.} = 106.1 \cdot \frac{0.14759}{0.008} = 1957.41 \text{ Вт} / \text{м}^2 \cdot \text{К};$$

Визначимо величину критерію Рейнольдса у міжтрубному просторі:

$$Re^{M.} = \frac{\omega_2 \cdot \rho_2 \cdot d_2}{\nu^{M.}}, \quad (6.103)$$

$$Re^{M.} = \frac{90 \cdot 0.01}{98.59 \cdot 10^{-6}} = 9129;$$

У цьому випадку може бути застосована розряджена навивка трубок. З відносним кроком трубок $\sigma_1 = 1.4$ и $\sigma_2 = 1.4$.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						41
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Критерій Нуссельта у міжтрубному просторі визначається по залежності :

$$Nu = 0.0418 \cdot (Re^{M.})^{0.8508}, \quad (6.104)$$

$$Nu = 0.0418 \cdot 9129^{0.8508} = 97.88;$$

Коефіцієнт теплопередачі від стінки трубки до кубової рідини:

$$\alpha^{M.} = Nu^{M.} \cdot \frac{\lambda^R}{d_2}, \quad (6.105)$$

$$\alpha^{M.} = 97.88 \cdot \frac{0.05903}{0.01} = 577.79 \text{ Bm} / \text{m}^2 \cdot \text{K}$$

Коефіцієнт теплопередачі віднесений до зовнішньої поверхні трубок:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha^{TP.}} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha^{M.}}}, \quad (6.106)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{1957.41} \cdot \frac{0.01}{0.008} + \frac{1}{577.79}} = 422.06 \text{ Bm} / \text{m}^2 \cdot \text{K};$$

Визначення середньої різниці температур

Визначаємо середню чи середньоінтегральну різницю температур

Так як потоки протікають при низькому тиску, то теплоємності потоків по висоті теплообміннику практично незмінюються. Перевіряємо відношення:

$$\frac{\Delta T_{T.}}{\Delta T_{X.}} = \frac{T_{16} - T_{12}}{T_{17} - T_{11}}, \quad (6.107)$$

$$\frac{\Delta T_{T.}}{\Delta T_{X.}} = \frac{94.4 - 82.8}{87.5 - 82.8} = 2.47 > 1.7;$$

Отже середню різницю температур слід визначати як середньологарифметичну:

$$\Delta T_{CP.} = \frac{\Delta T_{T.} - \Delta T_{X.}}{\ln \frac{\Delta T_{T.}}{\Delta T_{X.}}} = \frac{(T_{16} - T_{12}) - (T_{17} - T_{11})}{\ln \frac{(T_{16} - T_{12})}{(T_{17} - T_{11})}}, \quad (6.108)$$

$$\Delta T_{CP.} = \frac{(94.4 - 82.8) - (87.5 - 82.8)}{\ln 2.47} = 7.63 \text{ K};$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						42
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Визначення поверхні теплообміну

Теплове навантаження теплообміннику:

$$Q = G^{OB} \cdot (i_{12} - i_{11}) = G^{OB} \cdot (I_{12} - I_{11}) / M^R, \quad (6.109)$$

$$Q = 2206.8 \cdot (-2591.7 - (-2716.4)) / 29.33 = 9382.5 \text{ кДж / ч};$$

Приймаючи величину запасу поверхні теплообміну рівній 75%, так як теплообмінник рідинний. Визначимо поверхню теплообміну:

$$F = \frac{1.75 \cdot Q}{K \cdot \Delta T_{CP}}, \quad (6.110)$$

$$F = \frac{1.75 \cdot 9382.5 \cdot 10^3}{422.05 \cdot 7.63 \cdot 3600} = 1.416 \text{ м}^2;$$

Конструктивний розрахунок теплообміннику

Діаметр серцевика приймаємо з умови:

$$D_{СЕРД.} = 13 \cdot d_2, \quad (6.111)$$

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

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

Площа січення міжтрубного простору:

$$f^{M.} = \frac{G^R}{\omega_2 \cdot \rho_2}, \quad (6.112)$$

$$f^{M.} = \frac{2206.8}{90 \cdot 3600} = 0.00681 \text{ м}^2;$$

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

тоді:

$$D_{CP.} = D_{СЕРД.} + n_{СЛ.} \cdot (d_2 + \delta), \quad (6.113)$$

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

Визначаємо розрахункову товщину прокладки:

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						43
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\delta = \frac{f^M}{\pi \cdot D_{CP} \cdot n_{CL}}, \quad (6.114)$$

$$\delta = \frac{0.00681}{\pi \cdot 0.175 \cdot 3} = 0.0041 \text{ м}$$

Так як прийняте значення δ незначно відрізняється від розрахункового, фактичне прохідне січення змінюється також незначно, отже немає необхідності уточнювати прийняте значення масової швидкості $\omega_2 \cdot \rho_2$ й перераховувати значення коефіцієнта тепловіддачі α_2 .

Зовнішній діаметр намотки:

$$D_{НАР.} = D_{СЕРД.} + 2 \cdot n_{CL} \cdot (d_2 + \delta), \quad (6.115)$$

$$D_{НАР.} = 0.13 + 2 \cdot 3 \cdot (0.01 + 0.004) = 0.214 \text{ м};$$

Число трубок теплообміннику:

$$n_{ТР.} = \frac{4 \cdot G^{ПП.}}{\omega_1 \cdot \rho_1 \cdot \pi \cdot d_1^2}, \quad (6.116)$$

$$n_{ТР.} = \frac{4 \cdot 760.3}{600 \cdot \pi \cdot 0.008^2 \cdot 3600} = 7.0;$$

Приймаємо $n_{ТР.} = 7$. При цьому масова швидкість $\omega_1 \cdot \rho_1$ не змінюється, й уточнювати коефіцієнт тепловіддачі α_1 немає необхідності.

Середня довжина однієї трубки теплообміннику:

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d_2 \cdot n_{ТР.}}, \quad (6.117)$$

$$L = \frac{1.416}{\pi \cdot 0.01 \cdot 7} = 6.439 \text{ м};$$

Теоретична довжина обмотки:

$$H = \frac{n_{ТР.} \cdot L \cdot t_2}{\pi \cdot D_{CP} \cdot n_{CL}}, \quad (6.118)$$

$$t_2 = \sigma_2 \cdot d_2, \quad (6.119)$$

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

$$H = \frac{7 \cdot 6.439 \cdot 0.014}{\pi \cdot 0.175 \cdot 3} = 0.383 \text{ м};$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						44
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Складемо таблицю обмотки теплообміннику, розраховуючи наступні величини:

Середній діаметр шару:

$$D_{СЛ.}^i = D_{СЕРД.} + 2 \cdot i \cdot t_1, \quad (6.120)$$

$$t_1 = \sigma_1 \cdot d_2, \quad (6.121)$$

$$t_1 = 1.4 \cdot 0.01 = 0.014 м,$$

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

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

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

Число заходів у шарі:

$$n_{3.}^i = \frac{n_{ТР.} \cdot D_{СЛ.}^i}{n_{СЛ.} \cdot D_{СР.}}, \quad (6.122)$$

$$n_{3.}^1 = \frac{7 \cdot 0.158}{3 \cdot 0.175} = 2.11 \approx 2$$

$$n_{3.}^2 = \frac{6 \cdot 0.186}{3 \cdot 0.175} = 2.48 \approx 2$$

$$n_{3.}^3 = \frac{7 \cdot 0.214}{3 \cdot 0.175} = 2.85 \approx 3;$$

Число витків трубки у шарі:

$$n_{B.}^i = \frac{H}{n_{3.}^i \cdot t_2}, \quad (6.123)$$

$$n_{B.}^1 = \frac{0.383}{2 \cdot 0.014} = 13.7,$$

$$n_{B.}^2 = \frac{0.383}{2 \cdot 0.014} = 13.7,$$

$$n_{B.}^3 = \frac{0.383}{3 \cdot 0.014} = 9.1;$$

Довжина трубки у шарі:

$$L^i = \pi \cdot D_{СЛ.}^i \cdot n_{B.}^i, \quad (6.124)$$

$$L^1 = \pi \cdot 0.158 \cdot 13.7 = 6.80 м,$$

$$L^2 = \pi \cdot 0.186 \cdot 13.7 = 8.01 м,$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						45
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$L^3 = \pi \cdot 0.214 \cdot 9.1 = 6.12 \text{ м};$$

З урахуванням додаткової довжини трубок у колекторі отримуємо:

$$L^1 = 8.5 \text{ м},$$

$$L^2 = 10.0 \text{ м},$$

$$L^3 = 7.7 \text{ м}$$

Таблиця 6 – Таблиця обмотки теплообміннику.

№ 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	13.7	8.5	4.0
2	0.186	2	13.7	10.0	4.0
3	0.214	3	9.1	7.7	4.0

Гідравлічний розрахунок теплообміннику

Визначимо опір трубного простору:

$$\Delta P^{TP} = \xi \cdot \frac{(\rho_1 \cdot \omega_1)^2 \cdot L}{2 \cdot \rho^K \cdot d_1}, \quad (6.125)$$

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

$$\xi = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}, \quad (6.126)$$

$$\xi = \frac{0.3164}{21295^{0.25}} = 0.026,$$

$\rho^K = 1145.57 \text{ (кг/м}^3\text{)}$ – щільність рідкого кисню при $P = 0.154 \text{ МПа}$.

Тоді втрати тиску у трубному просторі становлять:

$$\Delta P^{TP} = 0.026 \cdot \frac{(600)^2 \cdot 6.439}{2 \cdot 1145.57 \cdot 0.008} = 3288.2 \text{ Па} = 0.0033 \text{ МПа};$$

Визначимо гідравлічний опір у міжтрубовому просторі:

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						46
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\Delta P^{M.} = m \cdot \frac{Eu}{m} \cdot \frac{(\rho_2 \cdot \omega_2)}{\rho^R}, \quad (6.127)$$

$$\frac{Eu}{m} = 0.53 \cdot (\text{Re}^{M.})^{-0.122}, \quad (6.128)$$

$\rho^R = 364.41 \text{ кг/м}^3$ – щільність кубової рідини при $P = 0.164 \text{ МПа}$ и $T = 82.8 \text{ К}$,

$$m = \frac{H^{M.}}{\sigma_2 \cdot d_2 \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \beta}}, \quad (6.129)$$

де

$$\text{tg} \beta = \frac{\sigma_2 \cdot d_2 \cdot n_{TP.}}{\pi \cdot n_{СЛ.} \cdot (D_{СЕРД.} + n_{СЛ.} \cdot \sigma_1 \cdot d_2)} \quad (6.130)$$

$$\text{tg} \beta = \frac{1.4 \cdot 0.01 \cdot 7}{\pi \cdot 3 \cdot (0.13 + 3 \cdot 1.4 \cdot 0.01)} = 0.060,$$

тоді:

$$H^{M.} = \left(\frac{L}{\sqrt{1 + 1/\text{tg}^2 \beta}} \right), \quad (6.131)$$

$$H^{M.} = \left(\frac{6.439}{\sqrt{1 + 1/0.060^2}} \right) = 0.386,$$

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

$$m = \frac{0.386}{1.4 \cdot 0.01 \cdot \sqrt{1 + 0.060^2}} = 27.5 \approx 28,$$

тоді:

$$\Delta P^{M.} = 28 \cdot 0.53 \cdot (9129)^{-0.122} \cdot \frac{90}{364.41} = 1.2 \text{ Па};$$

Так як отримані значення $\Delta P_{TP.} = 0.0033 \text{ МПа} < [\Delta P_{TP.}] = 0.004 \text{ МПа}$, то рахуємо теплообмінник гідним для використання.

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

Загальна характеристика - кручений теплообмінник з труб,
оребрених дротом

Середа трубного простору

Воздух

Середа міжтрубному простору

Азот

Тиск трубного простору

$P_T = 6,5 \text{ МПа}$

Тиск міжтрубному простору

$P_M = 0,14 \text{ МПа}$

матеріал труб

медь

Температура трубного потоку:

вхід

$T_{T_{вх}} = 283 \text{ К}$

вихід

$T_{T_{вых}} = 152,426 \text{ К}$

Температура межтрубного потоку:

вхід

$T_{M_{вх}} = 96,33 \text{ К}$

вихід

$T_{M_{вых}} = 279 \text{ К}$

Діаметр сердечника

$D_C = 0,17 \text{ м}$

Зовнішній діаметр трубок

$d_H = 12 \text{ мм} = 0,012 \text{ м}$

Внутрішній діаметр трубок

$d_{BH} = 10 \text{ мм} = 0,01 \text{ м}$

Діаметр оребрюющей дроту

$d_{DP} = 1.5 \text{ мм} = 0,0015 \text{ м}$

крок навивки

$t = 5 \text{ мм}$

Теплофізичні властивості потоків визначаємо за середніми температур і
давленіям потоків.

$$T_{T_{cp}} = \frac{283 + 152,426}{2} = 217,713 \text{ К};$$

$$T_{M_{cp}} = \frac{279 + 96,33}{2} = 187,665 \text{ К};$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						48
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Вещество	Плотность ρ , кг/м ³	Теплоемкость Ср, кДж/кг·К	Вязкость μ , Па·с	Теплопроводность λ , Вт/м·К
Воздух	113,818	1,304	$16,1 \cdot 10^{-6}$	0,0254
Азот	2,523	1,047	$12,2 \cdot 10^{-6}$	0,0177

I. Визначення коефіцієнта тепловіддачі трубного простору

Живе перетин трубки

$$f_T = \frac{\pi}{4} \cdot (d_{ВН})^2 = \frac{3,14}{4} \cdot (0,01)^2 = 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Приймаємо число труб: $n = 82$ штуки.

Масова швидкість потоку в трубному просторі:

$$W_T = \frac{B}{n \cdot f_1} = \frac{0,495}{82 \cdot 7,85 \cdot 10^{-5}} = 76,899 \frac{\text{кг м}^2}{\text{с}}$$

Критерій Рейнольдса:

$$Re_T = \frac{W_T \cdot d_{ВН}}{\mu_T} = \frac{76,899 \cdot 0,01}{16,1 \cdot 10^{-6}} = 47763,354$$

Критерій Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu_T \cdot C_{pT}}{\lambda_T} = \frac{16,1 \cdot 10^{-6} \cdot 1,3 \cdot 10^3}{0,0254} = 0,824$$

Критерій Нуссельта :

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} = 0,023 \cdot 47763,354^{0,8} \cdot 0,824^{0,4} = 117,862$$

Довжина обрешіткової дроти:

$$l_{пр} = \sqrt{(\pi \cdot (d_H + d_{пр}))^2 + t^2} = \sqrt{(3,14 \cdot (0,012 + 0,0015))^2 + 0,005^2} = 0,043 \text{ м}$$

Питомий вільний простір намотування:

$$f_{уд} = 1 - \frac{\pi \cdot (d_H^2 + d_{пр}^2 \cdot \frac{l_{пр}}{t})}{4 \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot d_H^2} = 1 - \frac{3,14 \cdot (0,012^2 + 0,0015^2 \cdot \frac{0,043}{0,005})}{4 \cdot 1,106 \cdot 1,263 \cdot 0,012^2} = 0,363$$

Приймаємо швидкість потоку $W_M = 5$ м/с

$$\text{Тогда: } f = \frac{A}{W_M \cdot \rho_M} = \frac{0,5}{5 \cdot 2,523} = 0,04$$

Зовнішній діаметр обмотки:

$$D_H = \sqrt{D_C^2 + \frac{4f}{\pi \cdot f_{уд}}} = \sqrt{0,17^2 + \frac{4 \cdot 0,04}{3,14 \cdot 0,363}} = 0,411 \text{ м}$$

Число слоев намотки:

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						49
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$z = \frac{D_H - D_C}{2\tau_1} = \frac{0,411 - 0,17}{2 \cdot 0,013} = 9,269$$

$$\tau_1 = d_H \cdot \sigma_1 = 0,012 \cdot 1,106 = 0,013$$

Приймаємо $z = 10$;

Зовнішній діаметр обмотки при $z = 10$:

$$D_H = D_C + 2(\tau_1 \cdot (z-1) + (d_H + 2d_{\text{ПР}})) = 0,17 + 2(0,013 \cdot (10-1) + (0,012 + 2 \cdot 0,0015)) = 0,434$$

М

Поправка на кривизну труб:

$$\varepsilon_R = 1 + 7,08 \cdot \frac{d_{\text{ВН}}}{D_C + D_H} = 1 + 7,08 \cdot \frac{0,01}{0,17 + 0,434} = 1,117$$

Коефіцієнт тепловіддачі трубного потоку:

$$\alpha_T = \varepsilon_R \cdot \text{Nu} \cdot \frac{\lambda_T}{d_{\text{ВН}}} = 1,117 \cdot 117,862 \cdot \frac{0,0254}{0,01} = 334,396 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

II. Визначення коефіцієнта тепловіддачі міжтрубному простору.

Уточнена площа міжтрубного вільного простору:

$$f_M = \frac{\Pi}{4} \cdot (D_H^2 - D_C^2) \cdot f_{\text{уд}} = \frac{3,14}{4} \cdot (0,434^2 - 0,17^2) \cdot 0,363 = 0,045 \text{ м}^2$$

Масова швидкість потоку в міжтрубному просторі:

$$W_M = \frac{A}{f_M} = \frac{0,5}{0,045} = 11,111 \frac{\text{кг м}^2}{\text{с}}$$

Критерій Рейнольдса:

$$\text{Re}_M = \frac{W_M \cdot d_3}{\mu_M} = \frac{11,111 \cdot 0,00368}{12,2 \cdot 10^{-6}} = 3351,515$$

$$d_3 = \frac{4 \cdot d_H \cdot \sigma_1 \cdot \sigma_2 \cdot f_{\text{уд}}}{\Pi \cdot \varphi} = \frac{4 \cdot 0,012 \cdot 1,106 \cdot 1,263 \cdot 0,363}{3,14 \cdot 2,109} = 0,00368 \text{ м}$$

$$\varphi = \frac{d_H + \left(d_{\text{ПР}} + \frac{\delta}{\Pi}\right) \cdot \frac{l_{\text{ПР}}}{\tau}}{d_H} = \frac{0,012 + \left(0,0015 + \frac{0,00015}{3,14}\right) \cdot \frac{0,043}{0,005}}{0,012} = 2,109$$

$$\delta = 0,00015 \text{ м}$$

$$\sigma_1 = 1,106$$

$$\sigma_2 = 1,263$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						50
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Критерій Прандтля:

$$Pr = \frac{\mu_M \cdot C_{pM}}{\lambda_M} = \frac{12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 1,047 \cdot 10^3}{0,0177} = 0,722$$

Коефіцієнт тепловіддачі межтрубного потоку:

$$\alpha_M = 0,168 \cdot Re_M^{-0,3} \cdot W_M \cdot C_{pM} \cdot Pr_M^{-\frac{2}{3}}$$

$$\alpha_M = 0,168 \cdot 3351,515^{0,3} \cdot 11,111 \cdot 1,047 \cdot 10^3 \cdot 0,722^{-\frac{2}{3}} = 212,689 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}$$

Коефіцієнт теплопередачі трубного і міжтрубному простору віднесений до зовнішньої поверхні зовнішньої поверхні вихідної трубки

$$k_{TM} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_T} \cdot \frac{d_H}{d_{BH}} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_M} \cdot \eta_P}$$

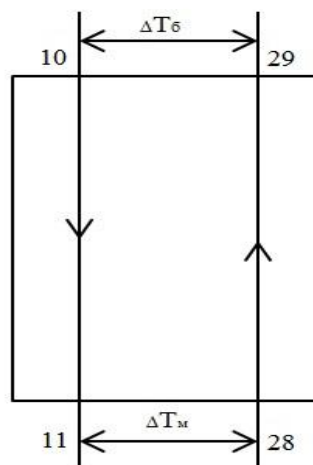
λ – коефіцієнт теплопровідності міді $380 \frac{Вт}{мК}$;

η_P – КПД оребрення 0,95;

$$k_{TM} = \frac{1}{\frac{1}{334,396} \cdot \frac{0,012}{0,01} + \frac{0,00015}{380} + \frac{1}{212,689} \cdot 0,95} = 124,138$$

III. Визначення поверхні теплообміну і параметрів insware: середньо-температурний тиск:

$$\Delta T_{нап} =$$



$$\Delta T_6 = 283 - 279 = 4 \text{ K};$$

$$\Delta T_m = 152,426 - 96,33 = 56,096 \text{ K};$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		51

$$\Delta T_{\text{нап}} = \frac{4 - 56,096}{\ln \frac{4}{56,096}} = 19,723 \text{ К};$$

Необхідна поверхня теплообміну на зовнішній поверхні не-орбрена труб:

$$F_H = \frac{Q}{k_{\text{ТМ}} \cdot \Delta T_{\text{нап}}}$$

$$Q = (i_{29} - i_{28}) \cdot A = (289,7 - 97,8) \cdot 0,5 = 95,95 \frac{\text{КДж}}{\text{кг}}$$

$$F_H = \frac{95,95}{124,138 \cdot 19,723 \cdot 10^{-3}} = 39,189 \text{ м}^2$$

Необхідна загальна довжина труб без урахування запасу:

$$L_H = \frac{F_H}{\pi \cdot d_H}$$

$$L_H = \frac{39,189}{3,14 \cdot 0,012} = 1040,048 \text{ м}$$

Тангенс угла навивки:

$$\text{tg } \beta = \frac{n \cdot \tau_2}{\pi \cdot z \cdot D_{\text{ср}}}$$

$$\text{tg } \beta = \frac{82 \cdot 0,015}{3,14 \cdot 10 \cdot 0,302} = 0,13$$

$$\tau_2 = d_H \cdot \sigma_2 = 0,012 \cdot 1,263 = 0,015$$

Середній діаметр обмотки

$$D_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (D_c + D_H)$$

$$D_{\text{ср}} = 0,5 \cdot (0,17 + 0,434) = 0,302 \text{ м}$$

$$\text{arctg } \beta = 7^\circ 23'$$

$$\text{Cos } \beta = 0,992$$

Необхідна висота намотування:

$$H_H = \frac{L_H \cdot \tau_2 \cdot \text{Cos } \beta}{\pi \cdot D_{\text{ср}} \cdot z}$$

$$H_H = \frac{1040,048 \cdot 0,015 \cdot 0,992}{3,14 \cdot 0,302 \cdot 10} = 1,632 \text{ м}$$

Фактична поверхня теплообміну з урахуванням запасу:

$$F_{\text{дейст}} = F_H \cdot k$$

$$k = 1,3$$

$$F_{\text{дейст}} = 39,189 \cdot 1,3 = 50,946 \text{ м}^2$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						52
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$\zeta = \frac{0,3164}{Re_T^{0,25}} = \frac{0,3164}{47763,354^{0,25}} = 0,021$$

Середня довжина труб

$$l_{cp} = \frac{F_H}{n \cdot \Pi \cdot d_H} = \frac{39,189}{82 \cdot 3,14 \cdot 0,01} = 15,22 \text{ м}$$

$$\varphi = 1 + 0,075 \cdot Re^{0,25} \cdot \left(\frac{d_{вн}}{D} \right)$$

$$\varphi = 1 + 0,075 \cdot 47763,354^{0,25} \cdot \left(\frac{0,01}{0,24} \right) = 1,046$$

$$D = 2 \cdot R = 2 \cdot 10 \cdot d_H = 2 \cdot 10 \cdot 0,012 = 0,24 \text{ м}$$

Відносна втрата тиску

$$\delta P_T = \frac{\Delta P_{np}}{P_{Tp}} = \frac{868,492}{6,5 \cdot 10^6} = 0,00013$$

Гідравлічний опір міжтрубному потоку

$$\Delta P_M = n_b \cdot \left(\frac{Eu}{m} \right) \cdot \rho_M \cdot W_M^2$$

$$\Delta P_M = 108,8 \cdot 1,314 \cdot 2,523 \cdot (11,111 / 1,314)^2 = 25790 \text{ Па}$$

$$\frac{Eu}{m} = 10 \cdot Re_M^{-0,27} = 10 \cdot 3351,515^{-0,27} = 1,314$$

$$n_b = \frac{H_H}{\tau_2} = \frac{1,632}{0,015} = 108,8$$

Відносна втрата тиску

$$\delta P_T = \frac{\Delta P_M}{P_M} = \frac{25790}{0,14 \cdot 10^6} = 0,18$$

Тепловий розрахунок:

$$Q = B \cdot (I_{10} - I_{11}) + q_{TO}/2 = A \cdot (I_{29} - I_{28})$$

$$Q = 0,47 \cdot (7759,6 - 2125,37) + 12,5 = 0,4949 \cdot (8065,39 - 2739,89) = 2635,1$$

$$\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$\Delta Q = 266,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

Визначаємо середню інтегральну температуру, побудуємо Q-T діаграму:

$$\text{Кисень: } Q = B \cdot (i_{10} - i_{11})$$

$$i_i = i_{11} + \frac{\Delta Q - q_{TO}/2}{B};$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						54
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$i_1 = 2125,37 + \frac{266,1-12,5}{0,47} = 2664,944 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_2 = 2125,37 + \frac{532,2-12,5}{0,47} = 3231,115 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_3 = 2125,37 + \frac{798,3-12,5}{0,47} = 3797,285 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_4 = 2125,37 + \frac{1064,4-12,5}{0,47} = 4363,455 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_5 = 2125,37 + \frac{1330,5-12,5}{0,47} = 4929,625 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_6 = 2125,37 + \frac{1596,6-12,5}{0,47} = 5495,796 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_7 = 2125,37 + \frac{1862,7-12,5}{0,47} = 6060,689 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_8 = 2125,37 + \frac{2128,8-12,5}{0,47} = 6628,136 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_9 = 2125,37 + \frac{2394,9-12,5}{0,47} = 7194,306 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_{10} = 2125,37 + \frac{2635,1-12,5}{0,47} = 7759,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

Знайдемо відповідні температури

$$T_0 = 152,426 \text{ K}$$

$$T_1 = 158,664 \text{ K}$$

$$T_2 = 167,194 \text{ K}$$

$$T_3 = 177,71 \text{ K}$$

$$T_4 = 189,911 \text{ K}$$

$$T_5 = 203,456 \text{ K}$$

$$T_6 = 218,048 \text{ K}$$

$$T_7 = 233,421 \text{ K}$$

$$T_8 = 249,506 \text{ K}$$

$$T_9 = 266,063 \text{ K}$$

Расчет для азота: :

$$Q = A \cdot (i_{29} - i_{28})$$

$$i_i = i_{28} + \frac{\Delta Q}{A};$$

$$i_1 = 2739,89 + \frac{266,1}{0,4949} = 3272,523 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_2 = 2739,89 + \frac{532,2}{0,4949} = 3805,156 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_3 = 2739,89 + \frac{798,3}{0,4949} = 4337,789 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_4 = 2739,89 + \frac{1064,4}{0,4949} = 4870,421 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_5 = 2739,89 + \frac{1330,5}{0,4949} = 5403,054 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						55
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

$$i_6 = 2739,89 + \frac{1596,6}{0,4949} = 5935,687 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_7 = 2739,89 + \frac{1862,7}{0,4949} = 6468,319 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_8 = 2739,89 + \frac{2128,8}{0,4949} = 7000,953 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_9 = 2739,89 + \frac{2394,9}{0,4949} = 7533,586 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

$$i_{10} = 2739,89 + \frac{2635,1}{0,4949} = 8065,39 \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$$

Знайдемо відповідні температури:

$$T_0 = 96,33 \text{ K}$$

$$T_1 = 114,062 \text{ K}$$

$$T_2 = 132,015 \text{ K}$$

$$T_3 = 150,057 \text{ K}$$

$$T_4 = 168,158 \text{ K}$$

$$T_5 = 186,3 \text{ K}$$

$$T_6 = 204,47 \text{ K}$$

$$T_7 = 222,662 \text{ K}$$

$$T_8 = 240,869 \text{ K}$$

$$T_9 = 259,087 \text{ K}$$

З графіка визначаємо середню інтегральну температуру в перетинах

$$\Delta T_{\text{инт}} = \frac{N}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{\Delta T}} = 59,384$$

Будуємо діаграму Q-T для визначення середньої інтегральної температури у фракційному теплообміннику:

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						56
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

Висновок

Цей проект розробив схему розділення повітря для виробництва рідкого кисню і азоту. У дизайні взяли до уваги сучасні вимоги до спорудження кріогенного обладнання. Схема монтажу заснована на циклі середнього тиску з безпосереднім розширенням потоку в турботитандері. Помірний холод використовується для попереднього охолодження повітря. Вузол ректифікації складається з двох складок. Дана схема дозволяє отримати рідкий кисень охолодженим до 89 К азоту.

У технологічному обчисленні параметри знаходяться в точках вузла установки. Визначено параметри потоків при вході і виході приладів, а також частка потоків, що йдуть в пристрої. З енергетичного балансу нижнього стовпчика було визначено навантаження конденсатора випарника. Було розраховано процес виправлення Мак-Кеба та Тиле, що було визначено в сумі 64 шт. Визначається кількість питомого енергоспоживання. Здійснено розрахунок азотного теплообмінника, встановлено гідравлічні втрати.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						57
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Aguado, R., Vera, D., Jurado, F. et al. An integrated gasification plant for electric power generation. Biomass Conv. Bioref. (2022).
2. Stephan Heberlein, Wei Ping Chan, Andrei Veksha, Apostolos Giannidis, Leena Nupa, Grzegorz Lisak. High temperature slagging gasification of municipal solid waste with biomass charcoal as a greener auxiliary fuel, Journal of Hazardous Materials, Volume 423, Part A (2022)
3. Бронштейн І.М., Семендяєв К.А. Довідник з математики для інженерів та учнів втузів.: Наука, 1986, - 344 с.
4. Дем'яненко Ю.І., Охорона праці під час роботи на установках розділення повітря. Навчальний посібник. 2006.
5. Грудка Б. Г., Басов А.М. Газифікаційні установки : конспект лекцій [Електронний ресурс] : для здобувачів освіти галузі знань 14 "Електрична інженерія", спец. 142 "Енергетичне машинобудування", СВО "магістр"; Каф. кріогенної техніки. — Одеса : ОНАХТ, 2022.
6. Грудка Б. Г., Басов А.М. Газифікаційні установки : метод. вказівки до практичних занять та самост. роботи [Електронний ресурс] : для здобувачів освіти галузі знань 14 "Електрична інженерія", спец. 142 "Енергетичне машинобудування", СВО "магістр" / Б. Г. Грудка, А. М. Басов ; Каф. кріогенної техніки. — Одеса : ОНАХТ, 2022.
7. Троценко О. В. Моделювання процесів кріогенної техніки : метод. вказівки до виконання лабораторних робіт [Електронний ресурс] : для здобувачів освіти галузі знань 14 "Електрична інженерія", спец. 142 "Енергетичне машинобудування", СВО "бакалавр" та "магістр"; Каф. кріогенної техніки. — Одеса : ОНАХТ, 2022.

					КРБ.КТ.613-03.1.10	Лист
						58
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		