

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



**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

На тему: «Проект установки розділення повітря для одержання 400 м³/год
технічного кисню під тиском»

Здобувача Андрющенко І.В.
(прізвище, ініціали)

2ск курсу ЕН-141 групи

Керівник доц. Грудка Б.Г.
(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 Бакалавр
Спеціальність 142 «Енергетичне машинобудування»
Освітня програма «Холодильні машини, установки і кондиціонування повітря»

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**

Андрющенко Івана Володимировича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Проект установки розділення повітря для одержання
400 м³/год технічного кисню під тиском

керівник роботи к.т.н., доц. Грудка Богдан Геннадійович
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 26 серпня 2022 року № 490-03

2. Термін здачі здобувачем закінченої роботи 01 червня 2023 року

3. Вихідні дані до роботи: Повітророздільна установка продуктивністю
400 м³/год технічного кисню, що складається з блоку розділення та блоку очищення

4. Перелік питань, які потрібно розробити:
Провести аналіз літературних джерел та вивчити існуючі схеми повітророздільних установок.
Технологічна схема установки. Виконати технологічний розрахунок циклу. Конструктивний
та гідравлічний розрахунки нижньої колони. Розрахунок переохолоджувача рідкого кисню.
Розрахунок конденсатора-випарника. Розрахунок теплообмінника-зріджувача. Розрахунок
турбодетандера. Аналіз одержаних результатів. Загальні висновки. Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу:
Презентація Power Point (10 слайдів)

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

7. Дата видачі завдання _____ 20.02.2023 _____

Керівник _____ доц. Грудка Б.Г.

Завдання прийняв до виконання _____ Андриющенко І.В.

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)

Андриющенко І.В.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Грудка Б.Г.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Спосіб отримання кисню із повітря методом глибокого охолодження зумовлений загальним прогресом розвитку криогенної техніки. Більше 50 % кисню виробляється і споживається в чорній металургії, в процесах різання та зварювання металів у машинобудуванні, металообробці та ін. Протягом останніх років кисень є особливо затребуваним для лікування важкохворих при COVID-19. Спроектована повітродоздільна установка для одержання газоподібного кисню. Визначено параметри у вузлових точках установки, параметри потоків на вході та виході з апаратів, турбодетандера, насоса, а також частки потоків. З енергобалансу нижньої колони визначено навантаження конденсатора-випарника. Визначено дійсне число тарілок ректифікації. При розрахунку переохолоджувача рідкого кисню визначено розрахункове число трубок у кожному шарі, довжини трубок у кожному шарі, гідравлічні втрати. Виконано термогазодинамічний розрахунок турбодетандера, а також розрахунок геометричних характеристик направляючого апарату. Повітродоздільна установка може бути використана як для потреб народного господарства, так і для постачання в райони з помірним та тропічним кліматом.

Ключові слова: повітродоздільна установка, технічний кисень, зрідження ректифікаційна колона, турбодетандер, абсорбція

ABSTRACT

The method of obtaining oxygen from the air by the method of deep cooling is due to the general progress in the development of cryogenic technology. More than 50% of oxygen is produced and consumed in ferrous metallurgy, in the processes of metal cutting and welding in mechanical engineering, metalworking, etc. In recent years, oxygen has been in particular demand for the treatment of critically ill patients with COVID-19. An air separation unit for obtaining gaseous oxygen is designed. The parameters at the key points of the unit, parameters of the flows at the entrance and exit from the devices, the turboexpander, the pump, as well as the fraction of the flows, were determined. The load of the condenser-evaporator is determined from the energy balance of the lower column. The valid number of rectification plates is determined. When calculating the liquid oxygen subcooler, the estimated number of tubes in each layer, the length of the tubes in each layer, and hydraulic losses are determined. The thermogas-dynamic calculation of the turboexpander was performed, as well as the calculation of the geometric characteristics of the guide apparatus. The air separation unit can be used as for needs the national economy as for supply to areas with a moderate and tropical climate.

Keywords: air separation unit, technical oxygen, liquefaction, rectification column, turboexpander, absorption

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА.....	8
1.1. Формування технологічної схеми повітророздільної установки	8
1.2. Основи експлуатації установки	11
2. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА.....	19
2.1. Технологічний розрахунок.....	19
2.2. Розрахунок процесу ректифікації нижньої колони.....	30
2.3. Гідравлічний розрахунок нижньої колони.....	33
2.4. Розрахунок переохолоджувача рідкого кисню	45
2.5. Розрахунок конденсатора-випарника.....	53
2.6. Розрахунок теплообмінника-зріджувача.....	58
2.7. Розрахунок турбодетандера.....	68
ВИСНОВКИ.....	81
ОХОРОНА ПРАЦІ.....	82
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	96

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15			
Змін.	Аркуш	№ документ.	Підпис	Дата	Проект установки розділення повітря для одержання 400 м ³ /год технічного кисню під тиском	Лім.	Аркуш	Листів
Розроб.		Андрющенко І.В.						
Перевір.		Грудка Б.Г.						
Рецензування								
Н. Контр.		Грудка Б.Г.				ЕН-141		
Затверджені								

ВСТУП

Актуальність теми. Початок промислового застосування криогенних систем відноситься до 20-х років минулого століття. За минулий період криогеніка розвинулася в самостійну галузь науки і промисловості, що дуже впливає на науково-технічну революцію. Особливо велика роль криогенної техніки у розвитку нових напрямів науки і техніки, причому одним із найперспективніших вважається застосування криогенної техніки в енергетиці. Такі найважливіші галузі, як чорна і кольорова металургія, хімія, газова промисловість, космічна і ракетна техніка, атомна промисловість різко збільшили застосування криогенних продуктів, установок і машин.

Технологія розділення повітря за допомогою криогенних температур на основні газові компоненти відома дуже давно. Принцип роботи криогенних установок заснований на зріджуванні повітря і подальшому його поділі на азот, кисень і аргон. Такий спосіб отримання газів називається розділенням повітря методом глибокого охолодження. Спочатку повітря стискається компресором, далі, після проходження теплообмінників, розширюється в детандері або дросельному вентилі, в результаті чого охолоджується до температури 93 К і перетворюється в рідину.

Подальший поділ рідкого повітря, що складається в основному з рідкого азоту і рідкого кисню, заснований на відмінності температури кипіння його компонентів: кисню – 90,18 °К, азоту – 77,36 °К. При поступовому випаровуванні рідкого повітря спочатку випаровується переважно азот, а рідина, що залишається, все більш збагачується киснем. Повторюючи подібний процес багаторазово на ректифікаційних тарілках повітророздільних колон, отримують рідкі кисень, азот і аргон потрібної чистоти.

Особливо розширилося застосування кисню. Кисень широко використовується в процесах різання та зварювання металів у машинобудуванні і металообробці. Разом з киснем широке застосування в різних галузях промисловості знаходить азот в газоподібному і рідкому виді.

										Лист
										6
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Більше 50% кисню робиться і споживається в чорній металургії. Застосування кисню в чорній металургії дозволяє інтенсифікувати металургійні процеси і поліпшити їх техніко-економічні показники. Кисень використовують також при виплавці кольорових металів - міді, нікелю, цинку і свинцю.

Для кріогеніки дуже характерне постійне розширення областей її застосування та поява нових типів кріогенних пристроїв та систем. Сфери застосування кріогеніки розширюються у бік усе більш низьких температур, аж до температур, близьких до абсолютного нуля. Нині безперервно ведуться роботи з удосконалення технологічних схем, апаратів і машин установок для розділення повітря.

Мета кваліфікаційної роботи – розробка установки розділення повітря для одержання 400 м³/год технічного кисню під тиском

Для досягнення мети необхідно вирішити **завдання**:

- провести аналіз літературних джерел та вивчити існуючі схеми повітророздільних установок для отримання кисню;
- розробити схемно-циклове рішення установки;
- провести теплові та конструктивні розрахунки елементів установки;
- за результатами розрахунків обрати допоміжне обладнання.

Об'єкт дослідження: повітророздільна установка.

Предмет дослідження: енергетичні та конструктивні характеристики елементів повітророздільної установки.

Методи дослідження: огляд літератури, математичне та чисельне моделювання процесів, обговорення результатів дослідження, порівняння отриманих результатів із даними інших авторів.

Структура роботи. Робота складається з вступу, теоретичної частини, аналітичної частини, висновків, списку використаної літератури. Робота викладена на 96 сторінках, містить 13 рисунків, 5 таблиць, список використаної літератури із 12 найменувань.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		7

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

1.1. Формування технологічної схеми повітророздільної установки

Проектована повітророздільна установка є установкою, призначеною для виробництва газоподібного технічного продукційного кисню з концентрацією $O_2 = 99.7\%$

Установки такого типу можуть бути використані для таких потреб:

- металургія: доменне, мартенівське, конверторне, електросталеплавильне та прокатне виробництво, різання, вогнева зачистка, газополум'яна обробка металу та ін.;
- хімічна та нафтова промисловість: виробництво азотної кислоти, газифікація вугілля та торфу, окислювальні процеси у хімічному виробництві тощо;
- газове зварювання та різання чорних та кольорових металів;
- ракетно – космічна техніка;
- мікробіологія та медицина;
- аерація та освітлення промислових та стічних вод;
- енергетика та ін.

Повітророздільна установка так само може бути використана для потреб народного господарства і для постачання в райони з помірним та тропічним кліматом.

Обладнання установки, що розміщується поза будівлею (блок поділу, блок очищення) використовується у кліматичному виконанні «У» та «Т» категорії 1, решта обладнання у виконанні «У» та «Т» категорії 3 за ГОСТ 15150-36.

Конструкція обладнання, що розміщується поза будівлею, допускає його експлуатацію в умовах відповідних IV району снігового навантаження, і V району вітрового навантаження по СНиП 2.01.07-85.

Установку допускається експлуатувати в районах із сейсмічності до 8 балів включно ГОСТ 6249-52.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		8

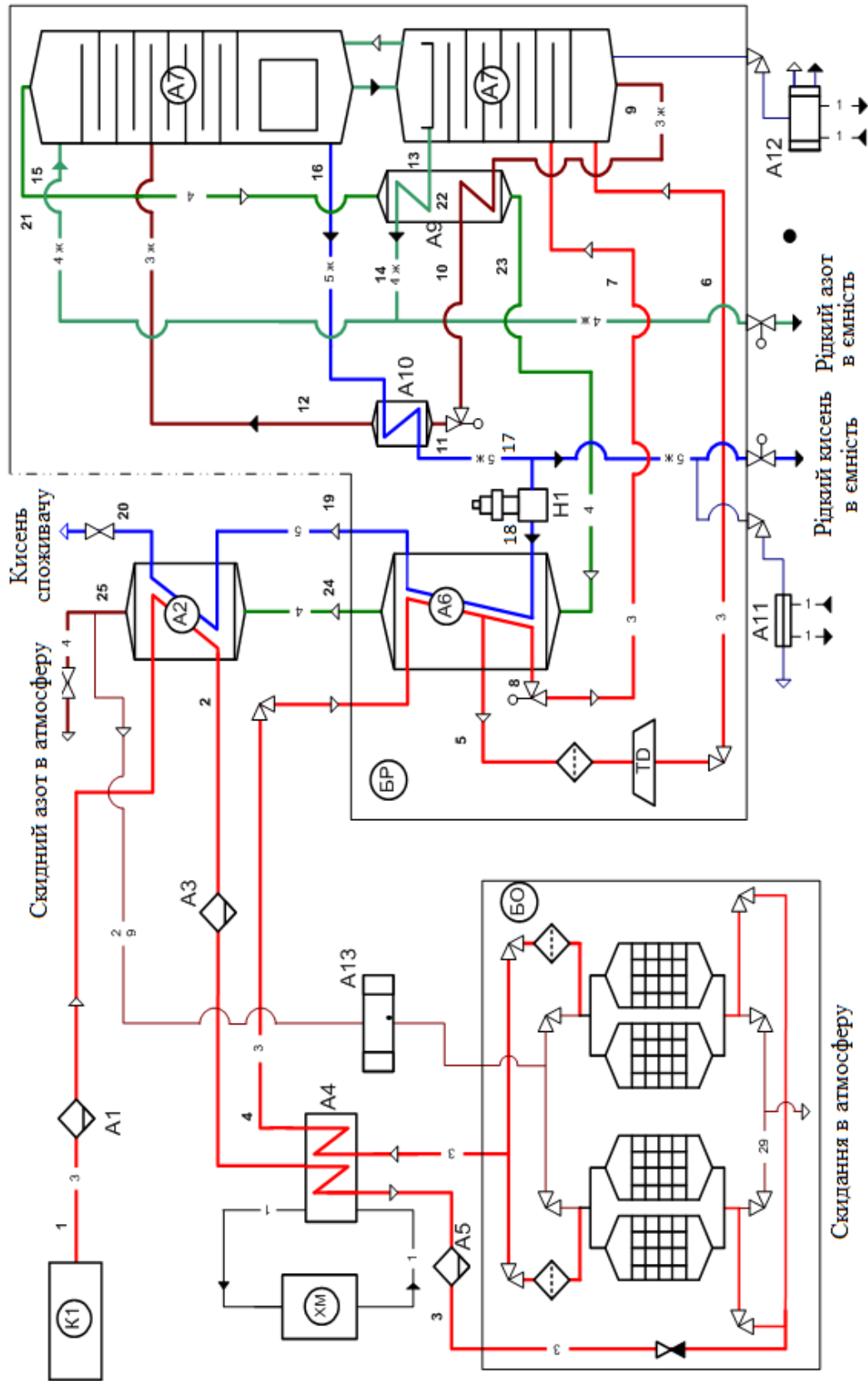


Рис. 1.1 – Схема повітряроздільної установки:

A1, A3, A5 – вологовідокремлювач; A2 – теплообмінник-зріджувач; A4 – вузол стабілізації температури; A6, A9, A11, A12 – теплообмінники; A7 – верхня та нижня колони; A10 – переохолоджувач рідкого кисню;

Кубова рідина при температурі близько 101 К відбирається з куба нижньої колони А7 і охолоджується у відповідній секції теплообмінника А9 на 3...3,5 К нижче за температуру насичення, дроселюється в міжтрубний простір переохолоджувача рідкого кисню А10 і надходить на верхню колону.

Потік азотної флегми, що відбирається з нижньої колони, проходить відповідну секцію теплообмінника А9, охолоджуючись на 11...12 К нижче температури насичення, а потім дроселюється до тиску 0,14 МПа і надходить на зрошення у верхню колону.

У верхній колоні відбувається остаточний поділ суміші на відкидний азот із вмістом кисню 2% O₂ і рідкий кисень концентрацією 99,7% O₂.

Відкидний азот з верхньої колони надходить у теплообмінник А10, де охолоджує азотну флегму та кубову рідину. Потім, проходячи послідовно міжтрубні простори основного теплообмінника А6 і теплообмінника-зріджувача А2, підігрівається до температури 303...308 К(30...35 °С). Після цього необхідна кількість відкидного азоту через клапан відбирається для регенерації та охолодження адсорберів блоку комплексного очищення, а решта скидається в атмосферу через клапан .

Рідкий кисень з куба верхньої колони надходить у трубний простір теплообмінника А10, де охолоджується до температури 87,5 К і надходить у рідинний насос – Н1, який нагнітає рідкий кисень у трубки кисневої секції основного теплообмінника А6. В основному теплообміннику кисень газифікується і підігрівається до 267...270 К, далі догрівається в теплообміннику-зріджувачі А2 і при температурі 300...303 К видається споживачеві в кількості 400 м³/год. Максимальний тиск кисню на виході – 19,6 МПа (200 кгс/см²).

1.2. Основи експлуатації установки

Експлуатацію установок розділення повітря слід проводити відповідно до вимог існуючих правил та нормативно-технічних документів.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		11

Підготовка до пуску повітророздільної установки

Пуск є найбільш складною операцією при експлуатації повітророздільних установок. Перший запуск проводиться представниками заводу виробника. Підготовка до пуску проводиться у наступній послідовності:

1. Відігрів, продування та опресування всього обладнання.
2. Зовнішній огляд установки. Усунення всіх виявлених дефектів.
3. Пробний пуск машин.
4. Перевірка дії та налагодження всіх запобіжних пристроїв.
5. Перевірка та приведення в робочий стан всіх приладів КВП.
6. Підготовка до роботи запірної арматури.
7. Забезпечення установки технологічною схемою, інструментами для обслуговування та ремонту.
8. Закриття усієї арматури на блоці поділу. Відкриття всіх вентилів на приладах КВП.
9. За регламентом відкриття вентилів на виході потоків із апаратів.
10. Відкриття вентиля виходу повітря із детандера.
11. Відкриття вентиля подачі азотної флегми у верхню колону.
12. Відкриття продування насоса.
13. Відкриття вентиля скидання повітря після компресора в атмосферу.
14. Плавне відкриття входу повітря в теплообмінник-зріджувач. Потім відкриття 2-3 рази продувального вентиля вологовідокремлювача.
15. Включення в роботу блоку очищення, дотримуючись необхідної швидкості підйому тиску.

Пуск повітророздільної установки.

Пуск включає три основні етапи:

1. Охолодження комунікацій та апаратів (поява рідини в кубі колони);
2. Накопичення рідини в апаратах та комунікаціях (досягнення розрахункового рівня в конденсаторі-випарнику);

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12

3. Налагодження процесу ректифікації (завершується під час досягнення паспортних показників установки).

Перший етап пуску повітророздільної установки

Для його проведення мають бути повністю відкриті вентилі виходу відкидного газу в атмосферу, виходу продукційного газу в атмосферу, виходу повітря з турбодетандеру.

Необхідно попередити машиніста компресорної установки про прийом повітря в блок поділу. Прийняти повітря в адсорбер блоку очищення відповідно до інструкції з експлуатації (дотримуючись заданого темпу зростання тиску та температури вхідного повітря). Відкрити вентиль після адсорбера, подавши повітря у вузол основного теплообмінника.

Відкрити вентиль на вході повітря в турбодетандер, попередньо забезпечивши роботу системи масляних насосів.

Відкрити регулюючий вентиль між основним теплообмінником і колоною. З його допомогою тиск у період пуску має бути максимальним.

1. Запустити компресор і, прикриваючи продування, підняти тиск до робочого – 6,1 МПа.

2. Перевести подачу повітря в установку, відкриваючи вхід у колектор та прикриваючи вентиль скидання повітря в атмосферу.

3. Відкрити подачу повітря в підключений адсорбер, підвищити тиск до робочого, потім відкрити вентиль подачі повітря в основний теплообмінник.

4. Відкрити дросельний вентиль перед детандером, попередньо пустивши маслосистему.

5. Навантаження детандера проводять виходячи з того, щоб тиск у нижній колоні був приблизно 0,6 МПа, в верхній – 0,07 МПа.

6. Після досягнення температури прямого потоку 6-8 °С перед блоком очищення повільно почати відкривати дросельний вентиль на прямому потоці повітря.

здійснити скидання кисню в атмосферу, щоб забезпечити нормальну роботу конденсатора-випарника. Після досягнення концентрації кисню 99,7 % необхідно перевести роботу установки на рампу або на злив рідкого кисню. Розрахункова продуктивність установки регулюється прикриттям вентилів відкидного газу. Після встановлення та налагодження процесу ректифікації в нижній колоні, слід приступити до налагодження процесу у верхній колоні. Для цього слід встановити необхідний баланс між дроселем і детандером, тобто необхідно розподіляти ці потоки до тих пір, поки не будуть досягнуті необхідні параметри продуктів. Зі збільшенням кількості холоду знижується чистота рідкого кисню і збільшується чистота скидного з верхньої колони азоту. Третій етап вважається завершеним, якщо стабілізуються всі параметри установки.

Підтримка нормального технологічного режиму повітророзподільної установки

Нормальний технологічний режим характеризується забезпеченням розрахункових параметрів роботи установки за мінімальних енерговитрат. Забезпечення нормальної експлуатації установки спрямоване на підтримку нормального функціонування вузла поділу та забезпечення заданої холодопродуктивності. При цьому потрібне забезпечення підтримки безпечних параметрів роботи установки.

1. Кількість повітря, що переробляється, не регулюється, а визначається потужністю компресора.
2. Тиск у верхній колоні можна регулювати арматурою на відкидних потоках (фракція верхньої колони).
3. Різниця температури на теплих кінцях основного теплообмінника регулюється відбором повітря на детандер. При збільшенні цієї частки різниця зростатиме.
4. Тиск у нижній колоні не регулюється, а визначається роботою конденсатора-випарника.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		15

5. Температура повітря перед детандером вибирається таким чином, щоб кількість рідини була мінімальною (12-15%).

6. Довготривалі підвищення тиску в нижній колоні можуть стати наслідком накопичення неоногелієвої суміші під кришкою конденсатора-випарника або переповнення міжтрубного простору рідким киснем.

7. Тривале зниження тиску в нижній колоні може спричинити зниження концентрації азоту в нижній колоні або кисню у верхній колоні.

8. У період перемикання адсорберів відбувається надходження значної кількості тепла до блоку поділу, яке необхідно компенсувати використанням теплообмінника-стабілізатора або збільшенням холодопродуктивності.

9. Склади азотної флегми та кубової рідини в нижній колоні регулюються дроселем на потоці азотної флегми. Прикриття цього вентиля призводить до збільшення концентрації азоту в азотній флегмі та кубовій рідині.

10. В установці холодопродуктивність регулюється виходячи з рівня рідини в конденсаторі- випарнику. Холодопродуктивність можна збільшити шляхом збільшення кількості обертів детандера або підвищенням тиску в циклі.

11. У разі зниження температури перед блоком очищення нижче 5-6 К необхідно відкрити байпасний вентиль повз зріджувача.

12. Низький опір колон може стати наслідком недостатньої кількості рідини або обриву тарілок. Занадто високий опір - забивання перфорації тарілок.

13. Завантаження детандера має бути максимальним у режимі виробництва рідких продуктів та в період пуску.

14. Зменшення рівня рідини у конденсаторі призводить до збільшення концентрації кисню.

15. Допускається робота установки без детандера за рахунок спрацьовування рівня рідини у конденсаторі-випарнику. Він не повинен бути менше 20 см.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		16

16. Регулювання установки відрізняється значною інертністю і зміну в кількостях і концентраціях продуктів можна побачити лише через кілька годин.

Зупинка повітророздільної установки

Короткочасна зупинка:

1. Закрити вентилі подачі повітря у турбодетандер;
2. Вимкнути підігрівач блоку очищення;
3. Зупинити насос подачі олії на охолодження турбодетандера та припинити подачу води на охолодження олії;
4. Закрити вентиль на подачу повітря у блок поділу та відкрити вентиль скидання повітря в атмосферу;
5. Через продувальні вентилі скинути тиск з адсорбера блоку очищення та теплообмінників;
6. Записати в журнал причину та час зупинки.

Раптова зупинка

Може бути викликана, відключенням електроенергії, припиненням подачі охолоджуючої води в цех, зупинкою компресора, аварією.

Необхідно:

1. Закрити вентилі подачі повітря у турбодетандер;
2. Дати сигнал машиністу компресора про аварійну зупинку;
3. Вимкнути підігрівач блоку очищення;
4. Вимкнути систему масляного гальмування детандерів та подачу охолоджувальної води в масляний холодильник;
5. Вимкнути подачу повітря в блок розподілу;
6. Зробити запис у журналі експлуатації.

Планова зупинка:

1. Перевести видачу продуктів із колекторів в атмосферу;
2. Закрити вхід повітря у турбодетандер;
3. Вимкнути підігрівач блоку очищення;

4. Вимкнути систему масляного гальмування детандера та відключити подачу охолоджувальної води в масляний холодильник;
5. Закрити вхід повітря в блок поділу та відкрити його скидання в атмосферу;
6. Закрити регулювальний вентиль перед колоною;
7. Через продувні вентиля скинути тиск в основному теплообміннику та блоці очищення;
8. Зробити запис у журналі експлуатації.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		18

РОЗДІЛ 2. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

2.1. Технологічний розрахунок

У технологічному розрахунку установки визначаються частки та кількості продуктів поділу, холодопродуктивність установки, частка детандерного потоку, теплові навантаження апаратів, розраховується процес ректифікації, визначається питома витрата енергії.

2.1.1. Дані для розрахунку

Кількість перероблюваного повітря $V = 2060 \text{ м}^3$;
Кількість продукційного кисню $П^K = 400 \text{ м}^3/\text{год}$;

Концентрації:

Кисень продукційний $y^K = 0,3 \text{ \% об. N}_2$;
Повітря $y^П = 79 \text{ \% об. N}_2$;
Кубова рідина $x^R = 67 \text{ \% об. N}_2$;
Азотна флегма $x^D = 98 \text{ \% об. N}_2$;
Азот відкидний $y^A = 98 \text{ \% об. N}_2$

Температури та різниці температур:

повітря після компресора $T_1 = 313 \text{ К}$;
повітря після теплообмінника-зріджувача $T_2 = 281 \text{ К}$;
повітря на вході до основного теплообмінника $T_4 = 283 \text{ К}$;
повітря перед турбодетандером $T_5 = 185 \text{ К}$;
кисень перед насосом $T_{17} = 87,5 \text{ К}$;
кисень газоподібний на виході з основного теплообмінника $T_{19} = 269 \text{ К}$;
переохолодження азотної флегми $\Delta T^D = 11 \text{ К}$;
переохолодження кубової рідини $\Delta T^R = 3,5 \text{ К}$;
недорекуперація між повітрям та киснем на теплому кінці зріджувача $T_{1-20} = 10 \text{ К}$;
недорекуперація між повітрям та відкидним азотом на теплому кінці основного теплообмінника $T_{4-24} = 15 \text{ К}$

Тиски

повітря після компресора

$$P_1 = 6,1 \text{ МПа};$$

кисень перед насосом

$$P_{17} = 0,15 \text{ МПа};$$

середній тиск кисню газоподібного після насоса

$$P_{18} = 16,5 \text{ МПа};$$

у кубі нижньої колони

$$P_{\text{к.нк}} = 0,67 \text{ МПа};$$

у кубі верхньої колони

$$P_{\text{в.нк}} = 0,154 \text{ МПа};$$

Гідравлічні опори

Теплообмінник-зріджувач

$$\Delta P_{\text{зр}} = 0,004 \text{ МПа};$$

блок комплексного очищення

$$\Delta P_{\text{бо}} = 0,02 \text{ МПа};$$

теплообмінник основний

$$\Delta P_{\text{осн.т}} = 0,013 \text{ МПа};$$

нижня колона

$$\Delta P_{\text{нк}} = 0,01 \text{ МПа};$$

верхня колона

$$\Delta P_{\text{вк}} = 0,018 \text{ МПа};$$

кожного переохолоджувача

$$\Delta P_{\text{по}} = 0,004 \text{ МПа};$$

Теплоприпливи

переохолоджувачі

$$q_{\text{по}} = 5 \text{ кДж/кмоль};$$

конденсатор-випарник

$$q_{\text{к-в}} = 40 \text{ кДж/кмоль};$$

верхня ректифікаційна колона

$$q_{\text{вк}} = 70 \text{ кДж/кмоль};$$

нижня ректифікаційна колона

$$q_{\text{нк}} = 40 \text{ кДж/кмоль};$$

теплообмінник основний

$$q_{\text{о.т}} = 30 \text{ кДж/кмоль};$$

теплообмінник-зріджувач

$$q_{\text{т-зр}} = 5 \text{ кДж/кмоль};$$

насос рідкого кисню

$$q_{\text{н}} = 50 \text{ кДж/кмоль};$$

блок поділу

$$q_{\text{бп}} = 185 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\eta_{\text{ад}} = 0,7$$

Адіабатний ККД турбодетандера

2.1.2. Матеріальні баланси установки та апаратів

Загальний матеріальний баланс повітродозподільної установки.

Визначаються частки продукційного кисню та відкидного азоту.

Розрахунок ведеться на 1 кмоль повітря, що переробляється. $V = 1 \text{ кмоль}$.

Рівняння матеріального балансу:

$$B = A + K, \quad (2.1)$$

$$A = I - K. \quad (2.2)$$

Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.КТ.1.490-03.2.15

Лист

20

Рівняння матеріального балансу за киснем

$$B \cdot y^B = A \cdot y^A + K \cdot y^K, \quad (2.3)$$

$$B \cdot y^B = (1 - K) \cdot y^A + K \cdot y^K, \quad (2.4)$$

$$K = \frac{B \cdot y^B - y^A}{y^K - y^A}, \quad (2.5)$$

$$K = \frac{y^B - y^A}{y^K - y^A}, \quad (2.6)$$

$$K = \frac{20.95 - 2}{99.7 - 2} = 0.194 \text{ кмоль / кмоль}$$

$$A = 1 - 0.194 = 0.806 \text{ кмоль / кмоль}$$

Матеріальний баланс нижньої колони

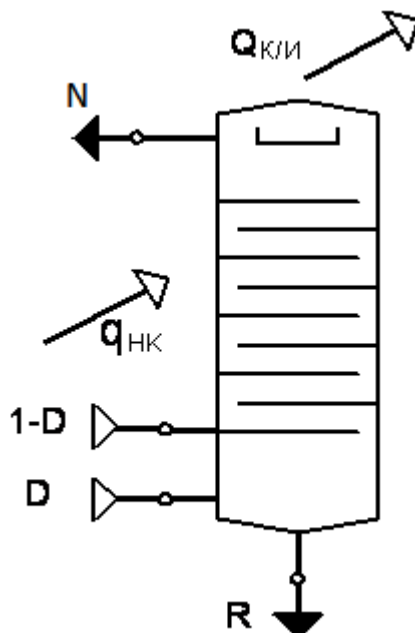


Рис.2.1 – Схема нижньої колони

Визначення часток потоків кубової рідини та азотної флегми.

$$B = R + N ; \quad (2.7)$$

$$N = 1 - R ; \quad (2.8)$$

$$B \cdot y^B = R \cdot x^R + N \cdot x^N \quad (2.9)$$

$$R = B \frac{y^B - x^N}{x^R - x^N} \quad (2.10)$$

$$R = 1 \frac{20.95 - 1.995}{33 - 1.995} = 0.611 \text{ кмоль / кмоль}$$

$$N = 1 - 0.611 = 0.389 \text{ Кмоль/кмоль}$$

Кількість повітря, що переробляється

Розрахункова кількість повітря приймається рівною номінальній продуктивності компресора при $T = 293\text{K}$ і тиску $P = 760\text{мм.рт.ст.}$

$$V = 2180\text{м}^3/\text{год};$$

Мінімальна кількість повітря визначається з урахуванням втрат в компресорі

$$V_{\min} = 0.95 \cdot V, \quad (2.12)$$

$$V_{\min} = 0.95 \cdot 2180 = 2071\text{м}^3/\text{ч};$$

Коефіцієнт 0,95 враховує втрати повітря на продування, при перемиканнях адсорберів блоку очищення, на нещільності та мінусовий допуск компресорів

Продуктивність установки по кисню з урахуванням втрат компресора

$$K' = K \cdot V_{\min}, \quad (2.13)$$

де $K = 0.194$ кмоль/кмоль – частка вилучення кисню.

$$K' = 0.194 \cdot 2071 = 401.8\text{м}^3/\text{год}$$

Енергетичний баланс переохолоджувача азотної флегми

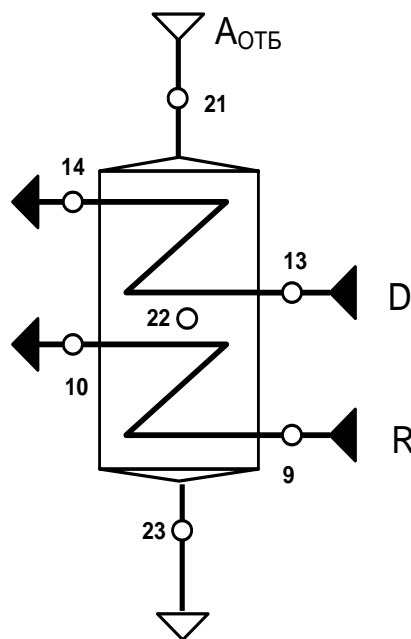


Рис. 2.2. – Схема переохолоджувачів кисню та азотної флегми

З рівняння енергетичного балансу визначається ентальпія відкидного азоту після переохолоджувача азотної флегми:

$$A \cdot (I_{22} - I_{21}) = D \cdot (I_{13} - I_{14}) + q_{\text{про}}^D, \quad (2.14)$$

де $I_{13} = -2216.1\text{кДж/кмоль}$ – ентальпія азотної флегми в стані насичення при $P_{13} = 0.66\text{МПа}$ і $T_{13} = 97.7\text{K}$;

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		22

$I_{14} = -2922.1 \text{ кДж / кмоль}$ – ентальпія азотної флегми при $P_{14} = 0.656 \text{ МПа}$ і T_{14}

$$T_{14} = T_{13} - \Delta T^D \quad (2.15)$$

$$T_{14} = 97.7 - 11 = 86.7 \text{ К};$$

$I_{21} = 2252.5 \text{ кДж / кмоль}$ – ентальпія скидного азота на виході з верхньої колони в стані насичення при $P_{21} = 0.142 \text{ МПа}$

Теплоприпливи з довкілля до трьох переохолоджувачів складають 5 кДж / кмоль , отже до одного переохолоджувача вони становлять $5/3 \text{ кДж / кмоль}$.

Рівняння енергетичного балансу перетворюється на вид

$$I_{22} = I_{21} + \frac{D \cdot (I_{13} - I_{14}) + q_{по}^D}{A}, \quad (2.16)$$

$$I_{22} = 2252.5 + \frac{0.389 \cdot (-2216.1 + 2922.1) + 5/3}{0.806} = 2595.3 \text{ кДж / кмоль},$$

При $P_{22} = 0.14 \text{ МПа}$ цій ентальпії відповідає $T_{22} = 91.5 \text{ К}$;

Ступінь сухості азотної флегми при вході у верхню колону

$$x^D = \frac{I_{15} - I'}{I'' - I'}, \quad (2.17)$$

где $I_{15} = I_{14} = -2922.1 \text{ кДж / кмоль}$ – ентальпія азотної флегми після дроселювання у верхню колону;

$I' = -3311.5 \text{ кДж / кмоль}$ – ентальпія насиченого рідкого азоту при $P_{15} = 0.142 \text{ МПа}$

$I'' = 2252.5 \text{ кДж / кмоль}$ – ентальпія насиченої пари азота при $P_{15} = 0.142 \text{ МПа}$;

$$x^D = \frac{-2922.1 + 3311.5}{2252.5 + 3311.5} = 0.07;$$

Енергетичний баланс охолоджувача кубової рідини

З рівняння енергетичного балансу визначається ентальпія відкидного азоту на виході з охолоджувача

$$A \cdot (I_{23} - I_{22}) = R \cdot (I_9 - I_{10}) + q_O^R, \quad (2.18)$$

де I_9 – ентальпія кубової рідини на виході з нижньої колони при $P_{н.к} = 0.67$. Визначається ця ентальпія за рівнянням змішування, знаючи, що в потоці міститься 33% O_2 .

$$I_9 = I_9^A \cdot (1 - x) + I_9^K \cdot x, \quad (2.19)$$

де $I_9^A = -2202.1 \text{ кДж / кмоль}$ – ентальпія насиченого рідкого азоту при $P_9 = 0.67 \text{ МПа}$

$I_9^K = -3049.6 \text{ кДж / кмоль}$ – ентальпія насиченого рідкого кисню при $P_9 = 0.67 \text{ МПа}$;

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						23
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$I_9 = -2202.1 \cdot (1 - 0.33) - 3049.6 \cdot 0.33 = -2481.8 \text{ кДж / кмоль};$$

Мольна теплоємність суміші

$$\mu_{Cp} = (1 - x) \cdot \mu_{Cp}^A + x \cdot \mu_{Cp}^K, \quad (2.20)$$

$$\mu_{Cp} = (1 - 0.33) \cdot 68.891 + 0.33 \cdot 63.264 = 67.034 \text{ кДж / кмоль} \cdot K;$$

Оскільки різниця температур при охолодженні кубової рідини становить $\Delta T^R = 3.5 K$, то зміна ентальпії в апараті складе

$$I_9 - I_{10} = \mu_{Cp} \cdot \Delta T^R; \quad (2.21)$$

Отже,

$$I_{10} = I_9 - \mu_{Cp} \cdot \Delta T^R, \quad (2.22)$$

$$I_{10} = -2481.8 - 67.034 \cdot 3.5 = -2716.4 \text{ кДж / кмоль};$$

Рівняння енергетичного балансу перетворюється на вид:

$$I_{23} = I_{22} + \frac{R \cdot (I_9 - I_{10}) + q_O^R}{A}, \quad (2.23)$$

$$I_{23} = 2595.3 + \frac{0.611 \cdot (-2481.8 + 2716.4) + 5/3}{0.806} = 2775.2 \text{ кДж / кмоль};$$

При $P_{23} = 0.138 \text{ МПа}$ цій ентальпії відповідає $T_{23} = 97.5 K$.

Енергетичний баланс переохолоджувача рідкого кисню

З рівняння енергетичного балансу визначається ентальпія кубової рідини на виході з переохолоджувача:

$$R \cdot (I_{12} - I_{11}) = K \cdot (I_{16} - I_{17}) + q_{по}^K, \quad (2.24)$$

де $I_{11} = I_{10} = -2716.4 \text{ кДж / кмоль}$ – ентальпія кубової рідини після дроселювання

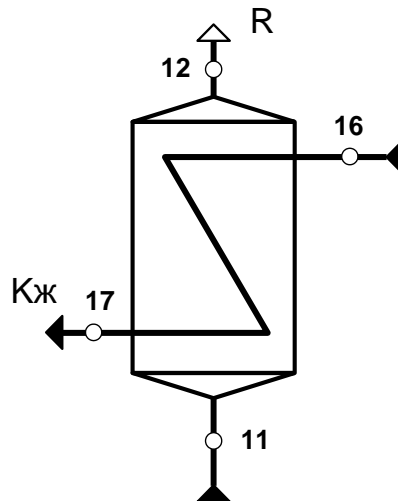


Рис. 2.3 – Схема переохолоджувача кисню

$I_{16} = -4166.4 \text{ кДж / кмоль}$ – ентальпія рідкого кисню в стані насичення при $P_{16} = 0.154 \text{ МПа}$ $T_{16} = 94.4 K$;

$I_{17} = -4550.4 \text{ кДж / кмоль}$ – ентальпія рідкого продукційного кисню при $T_{17} = 87.5 \text{ K}$ і $P_{17} = 0.15 \text{ МПа}$;

Рівняння енергетичного балансу перетворюється на вид:

$$I_{12} = I_{11} + \frac{K \cdot (I_{16} - I_{17}) + q_{\text{ПО}}^K}{R}, \quad (2.25)$$

$$I_{12} = -2716.4 + \frac{0.194 \cdot (-4166.4 + 4550.4) + 5/3}{0.611} = -2591.7 \text{ кДж / кмоль};$$

Параметри кисню після насосу:

$$I_{18} = I_{17} + \frac{q_{\text{СЖ}} + q_{\text{Н}}}{K}; \quad (2.26)$$

де $q_{\text{СЖ}}$ – робота стиснення у насосі;

$$q_{\text{СТ}} = \frac{P_{\text{СТ}} \cdot K \cdot \mu^K}{\rho_{\text{O}_2}}, \quad (2.27)$$

де $\rho_{\text{O}_2} = 1164.2 \text{ кг / м}^3$ – густина кисню перед насосом

$\mu^K = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг / кмоль}$ – молярна маса кисню

$P_{\text{СЖ}} = 16.5 \text{ МПа}$ – розрахунковий тиск нагнітання

$$q_{\text{СТ}} = \frac{16.5 \cdot 10^6 \cdot 0.194 \cdot 32 \cdot 10^{-3}}{1164.2} = 88 \text{ кДж / кмоль},$$

$q_{\text{Н}} = 50 \text{ кДж / кмоль}$ – теплоприпливи до насосу рідкого кисню;

$$I_{18} = -4550.4 + \frac{88 + 50}{0.194} = -3839.1 \text{ кДж / кмоль};$$

При $P_{18} = 16.5 \text{ МПа}$ цій ентальпії відповідає температура $T_{18} = 95.5 \text{ K}$;

Ступінь сухості кубової рідини при $P_{12} = 0.15 \text{ МПа}$:

$$x^R = \frac{I_{12} - I'^R}{I''^R - I'^R}, \quad (2.28)$$

де I''^R – ентальпія азотокисневої суміші в насиченому паровому стані при $\gamma^R = 33\%$

де I' – ентальпія кубової рідини у стані насичення;

I''^R и I' визначаються з рівняння змішування:

$$I''^R = I''^K \cdot \gamma^R + I''^A \cdot (1 - \gamma^R), \quad (2.29)$$

$$I'^R = I'^K \cdot \gamma^R + I'^A \cdot (1 - \gamma^R); \quad (2.30)$$

Ентальпія насичених парів азоту та кисню при $P = 0.15 \text{ МПа}$

$$I''^{\text{N}_2} = 2263.7 \text{ кДж / кмоль},$$

$$I''^{\text{O}_2} = 2662.4 \text{ кДж / кмоль};$$

Температура азоту та кисню при $P = 0.15 \text{ МПа}$

$$T^{\text{N}_2} = 80.8 \text{ K},$$

$$T^{\text{O}_2} = 94.1 \text{ K};$$

Ентальпія рідких азоту і кисню в стані насичення при $P = 0.15 \text{ МПа}$

$$I'^{\text{N}_2} = -3280.7 \text{ кДж / кмоль},$$

$$I'^{\text{O}_2} = -4182.4 \text{ кДж / кмоль};$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						25
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

За рівнянням змішування:

$$I^{R} = 2662.4 \cdot 0.33 + 2263.7 \cdot (1 - 0.33) = 2395.3 \text{ кДж/кмоль},$$

$$I'^R = -4182.4 \cdot 0.33 - 3280.7 \cdot (1 - 0.33) = -3578.3 \text{ кДж/кмоль};$$

Тоді

$$x^R = \frac{-2591.7 + 3578.3}{2395.3 + 3578.3} = 0.165;$$

Енергетичний баланс вузла ректифікації

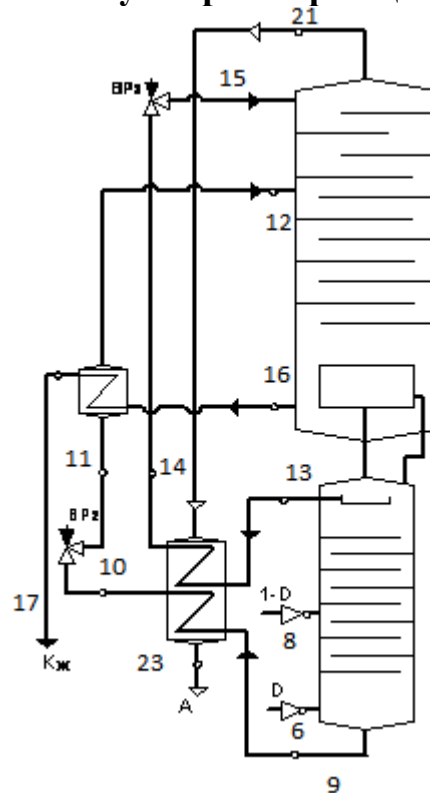


Рис. 2.4 – Схема вузла ректифікації

З рівняння енергетичного балансу вузла ректифікації визначається ентальпія повітря після дроселя:

$$Dem \cdot I_6 + (1 - Dem) \cdot I_8 + q_{V.P.} = K \cdot I_{17} + A \cdot I_{23} \quad (2.31)$$

де I_6 – ентальпія повітря після детандеру

$$I_6 = I_5 - \Delta I_{ДЕТ.}, \quad (2.32)$$

$$\Delta I_{ДЕТ.} = \eta_{АД} \cdot (I_5 - I_{АД}); \quad (2.33)$$

Параметри повітря перед детандером:

$P_5 = 6 \text{ МПа}, T_5 = 185 \text{ К};$

$I_5 = 4241,3 \text{ кДж/кмоль}, S_5 = 122,02 \text{ кДж/кмоль} \cdot \text{К};$

$I_{АД} = 2372,3 \text{ кДж/кмоль}$ - ентальпія повітря при адіабатичному розширенні в детандері до $P_6 = 0,66 \text{ Мпа};$

Тоді:

$$I_6 = 4241,3 - 0.7 \cdot (4241,3 - 2372,3) = 2933 \text{ кДж/кмоль};$$

При $P_6 = 0.67 \text{ МПа}$ цієї ентальпії відповідає температура $T_6 = 105 \text{ К};$

Рівняння енергетичного балансу перетворюється на вид:

$$I_8 = \frac{(K \cdot I_{17} + A \cdot I_{23}) - (Dem \cdot I_6 + q_{V.P.})}{1 - Dem}, \quad (2.34)$$

$$\text{где } q_{V.P.} = q_{B.K.} + q_{H.K.} + q_{K.I.} + q_{PO}, \quad (2.35)$$

$$q_{V.P.} = 70 + 40 + 40 + 5 = 155 \text{ кДж/кмоль}$$

$$I_8 = \frac{(0.194 \cdot (-4550.4) + 0.806 \cdot 2775.2) - (0.52 \cdot 2933 + 155)}{1 - 0.52} = -679.5 \text{ кДж/кмоль}$$

Енергетичний баланс блоку поділу

З рівняння енергетичного балансу блоку поділу визначається частка детандерного потоку:

$$\Delta I_T + Dem \cdot \Delta I_{DET} = q_{B.P.} + q_{CЖ} + q_H + q_{H.P.}^A + q_{H.P.}^K, \quad (2.36)$$

$$\text{де } \Delta I_T = I_{0.1}^{28} - I_{6.1}^{28} - \text{ізотермічний дросель-ефект (3.37)} \quad (2.37)$$

стиснення повітря у компресорі на рівні температур 283(K)

$$\Delta I_{DET} = I_5 - I_6 - \text{дійсний теплоперепад при} \quad (2.38)$$

розширенні повітря у детандері

$$q_{B.P.} = q_{H.K.} + q_{B.K.} + q_{K.I.} + q_{PO} + q_{O.T.}, \quad (2.39)$$

$$q_{B.P.} = 40 + 70 + 40 + 5 + 30 = 185 \text{ кДж/кмоль} - \text{теплоприпливи до блоку розподілу;}$$

$$q_{CT} = 88 \text{ кДж/кмоль} - \text{робота стиснення кисню у насосі;}$$

$$q_H = 50 \text{ кДж/кмоль} - \text{теплоприпливи до насосу рідкого кисню;}$$

$$q_{H.P.}^K = K \cdot (I_{0.1}^{283K} - I_{19}) - \text{втрата холоду від недорекуперації кисню} \quad (2.40)$$

$$q_{H.P.}^A = A \cdot (I_{0.1}^{283A} - I_{24}) - \text{втрата холоду від недорекуперації азоту} \quad (2.41)$$

Температура відкидного азоту після основного теплообмінника:

$$T_{24} = 283 - 15 = 268 \text{ K} \quad (2.42)$$

$P_{24} = 0.125 \text{ МПа}$ тепер за тиском та температурою визначається ентальпія в цій точці:

$$I_{24} = 7806.3 \text{ кДж/кмоль;}$$

Визначаються величини, що входять у формулу:

$$I_{0.1}^{283} = 8212,9 \text{ кДж/кмоль} - \text{ентальпія повітря при } P = 0.1 \text{ МПа і } T = 283 \text{ K;}$$

$$I_{6.1}^{283} = 7785,5 \text{ кДж/кмоль} - \text{ентальпія повітря при } P = 6.1 \text{ МПа і } T = 283 \text{ K;}$$

$$\Delta I_T = 8212,9 - 7785,5 = 427.4 \text{ кДж/кмоль;}$$

$$\Delta I_{DET} = 4241,3 - 2933 = 1308.3 \text{ кДж/кмоль;}$$

$$I_{19} = 6343,2 \text{ кДж/кмоль} - \text{ентальпія кисню при } P_{19} = 16.487 \text{ МПа}$$

$$\text{і } T_{19} = 269 \text{ K;}$$

$$I_{0.1}^{283K} = 8235,9 \text{ кДж/кмоль} - \text{ентальпія кисню при } P = 0.1 \text{ МПа } T = 283 \text{ K}$$

$$q_{H.P.}^K = 0.194 \cdot (8235,9 - 6343,2) = 367.2 \text{ кДж/кмоль;}$$

$$I_{0.1}^{283A} = 8256.7 \text{ кДж/кмоль} - \text{ентальпія азоту } P = 0.1 \text{ МПа } T = 283 \text{ K} \quad ;$$

$$q_{H.P.}^A = 0.806 \cdot (8256.7 - 7806.3) = 363.1 \text{ кДж/кмоль;}$$

Рівняння енергетичного балансу перетворюється на вид:

$$Dem = \frac{q_{B.P.} + q_{CЖ} + q_H + q_{H.P.}^A + q_{H.P.}^K - \Delta I_T}{\Delta I_{DET}}, \quad (2.43)$$

										Лист
										27
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	КРБ.КТ.1.490-03.2.15					

$$D_{em} = \frac{185+88+50+363.1+367.2-427.4}{1308.3} = 0.52$$

Енергетичний баланс основного теплообмінника

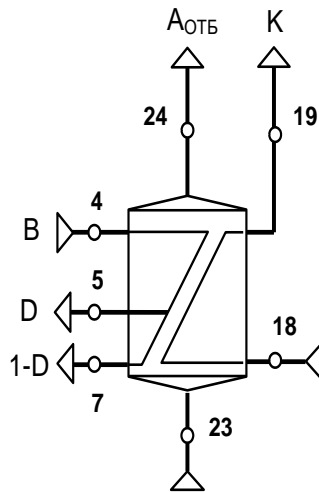


Рис. 2.5. – Схема основного теплообмінника

З рівняння енергетичного балансу основного теплообмінника визначається ентальпія повітря перед дроселем. Так як $I_7 = I_8$, то значення ентальпії отримане в результаті розрахунку має бути приблизно рівним значенню ентальпії, отриманому в результаті розрахунку енергобалансу вузла ректифікації.

$$D_{em} \cdot (I_4 - I_5) + (B - D_{em}) \cdot (I_4 - I_7) + q_{OT} = A \cdot (I_{24} - I_{23}) + K \cdot (I_{19} - I_{18}), \quad (2.44)$$

Рівняння енергетичного балансу перетворюється на вид:

$$I_7 = \frac{A \cdot (I_{23} - I_{24}) + K \cdot (I_{18} - I_{19}) + B \cdot I_4 + q_{OT} - D_{em} \cdot I_5}{B - D_{em}}, \quad (2.45)$$

где $q_{OT} = 30 \text{ кДж/кмоль}$ – теплоприливи до основного теплообмінника;

$I_4 = 7787,1 \text{ кДж/кмоль}$ – ентальпія повітря перед основним теплообмінником при $P_4 = 6.076 \text{ МПа}$ и $T_4 = 283 \text{ K}$;

$$I_7 = \frac{0.806 \cdot (2775.2 - 7806.3) + 0.194 \cdot (-3839.1 - 6343.2) + 1 \cdot 7787.1 + 30 - 0.52 \cdot 4241.3}{1 - 0.52} = -682.5 \text{ кДж/кмоль}$$

Енергетичний баланс теплообмінника-зріджувача

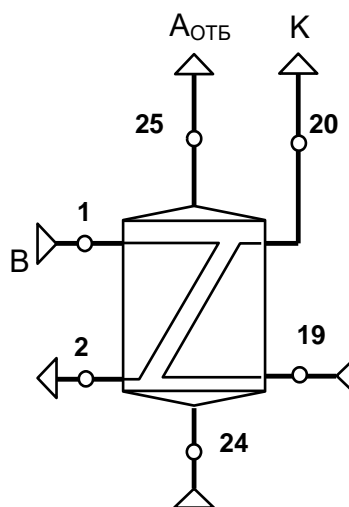


Рис.2.6. – Схема теплообмінника-зріджувача

З енергетичного балансу теплообмінника-зріджувача визначається температура відкидного потоку на виході з апарату

$$(I_1 - I_2) + q_{ож} = A \cdot (I_{25} - I_{24}) + K \cdot (I_{20} - I_{19}), \quad (2.46)$$

де $I_1 = 8756,5 \text{ кДж/кмоль}$ – ентальпія вологого повітря при $P_1 = 6.1 \text{ МПа}$ і $T_1 = 313 \text{ К}$;

$I_2 = 7720,1 \text{ кДж/кмоль}$ – ентальпія вологого повітря при $P_2 = 6.096 \text{ МПа}$ і $T_2 = 281 \text{ К}$;

$I_{20} = 7699,2 \text{ кДж/кмоль}$ – ентальпія кисню при $P_{20} = 16.483 \text{ МПа}$ і $T_{20} = 303 \text{ К}$

Рівняння енергетичного балансу перетворюється на вид:

$$I_{25} = I_{24} + \frac{(I_1 - I_2) + q_{ож} - K \cdot (I_{20} - I_{19})}{A}, \quad (2.47)$$

$$I_{25} = 7806.3 + \frac{8756,5 - 7720,1 + 5 - 0.194 \cdot (7699,2 - 6343,2)}{0.806} = 8772.1 \text{ кДж/кмоль}$$

При $P_{25} = 0,121 \text{ МПа}$ цій ентальпії відповідає температура $T_{25} = 301.3 \text{ К}$

Енергетичний баланс верхньої колони

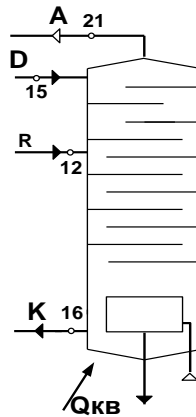


Рис.2 7. – Схема верхньої колони

З рівняння енергетичного балансу визначається теплове навантаження конденсатора-випарника:

$$D \cdot I_{15} + R \cdot I_{12} + q_{в.к.} + \frac{1}{2} \cdot q_{к.в.} + Q_{к.в.} = A \cdot I_{21} + K \cdot I_{16}, \quad (2.48)$$

де $q_{в.к.} = 70 \text{ кДж/кмоль}$ – теплоприплив до верхньої колони;

$\frac{1}{2} \cdot q_{к.в.} = 20 \text{ кДж/кмоль}$ – теплоприпливи до конденсатора-випарника (у

розрахунку вважається половинний теплоприплив, оскільки друга частина теплоприпливу враховується в енергобалансі нижньої колони);

$$I_{15} = I_{14} = -2922.1 \text{ кДж/кмоль} \text{ при } P_{15} = 0.145 \text{ МПа};$$

$Q_{к.в.}$ – теплове навантаження конденсатора-випарника.

$$Q_{к.в.} = A \cdot I_{21} + K \cdot I_{16} - D \cdot I_{15} - R \cdot I_{12} - q_{в.к.} - \frac{1}{2} \cdot q_{к.в.} \quad (2.49)$$

$$Q_{к.в.} = 0.806 \cdot 2252.5 + 0.194 \cdot (-4166.4) - 0.389 \cdot (-2922.1) - 0.611 \cdot (-2591.7) - 70 - \frac{1}{2} \cdot 40 = 3637.5 \text{ кДж/кмоль};$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						29
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2.2. Розрахунок процесу ректифікації нижньої колони

Теплове навантаження конденсатора-випарника визначалося у технологічному розрахунку. Для перевірки правильності розрахунку воно визначається з енергетичного балансу нижньої колони:

$$Dem \cdot I_6 + (B - Dem) \cdot I_8 + 1/2 \cdot q_{K.B.} + q_{H.K.} = R \cdot I_9 + D \cdot I_{13} + Q_{K.H.}; \quad (2.50)$$

$$Q_{K.B.} = Dem \cdot I_6 + (B - Dem) \cdot I_8 + 1/2 \cdot q_{K.B.} + q_{H.K.} - R \cdot I_9 - D \cdot I_{13}, \quad (2.51)$$

$$Q_{K.B.} = 0.52 \cdot 2933 + (1 - 0.52) \cdot (-679.5) + 0.5 \cdot 40 + 40 - 0.611 \cdot (-2481.8) - 0.389 \cdot (-2216.1) = 3637.4 \text{ кДж/кмоль}$$

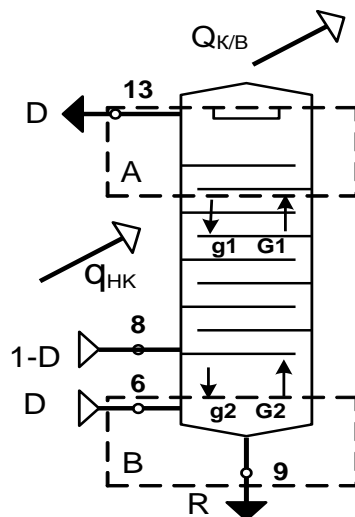


Рис.2.8. - Схема потоків нижньої колони

Визначення числа теоретичних тарілок ведеться у діаграмі у-х. Для побудови першої робочої лінії складається рівняння матеріального балансу верхньої частини нижньої колони (контур А) та рівняння балансу по легкокиплячому компоненту:

$$G_1 = g_1 + D, \quad (2.52)$$

$$G_1 \cdot y = g_1 \cdot x + D \cdot x_D; \quad (2.53)$$

Витрата пари G_1 визначається по навантаженню конденсатора-випарника та теплоті пароутворення r_{N_2} .

При $P = 0.67$ (МПа) $r_{N_2} = 4706.7$ кДж/кмоль;

$$G_1 = \frac{Q_{K.}}{r_{N_2}}, \quad (2.54)$$

$$G_1 = \frac{3637.4}{4706.7} = 0.773 \text{ кмоль/кмоль};$$

Витрата флегми g_1 визначається із загального матеріального балансу:

$$g_1 = G_1 - D, \quad (2.55)$$

$$g_1 = 0.773 - 0.389 = 0.384 \text{ кмоль/кмоль};$$

Рівняння першої робочої лінії, що встановлює зв'язок між концентраціями, має вигляд:

$$y_1 = \frac{g_1}{G_1} \cdot x + \frac{D}{G_1} \cdot x_D, \quad (2.56)$$

$$y_1 = \frac{0.384}{0.773} \cdot x + \frac{0.389}{0.773} \cdot 98,$$

$$y_1 = 0.497 \cdot x + 49.317;$$

Перша робоча лінія будується за точками:

$$x = 75\% \text{ об. } N_2, \quad y = 86.59\% \text{ об. } N_2,$$

$$x = x_D, \quad y = x_D = 98\% \text{ об. } N_2;$$

Для побудови другої робочої лінії складається рівняння нижньої частини нижньої колони (контур В) та рівняння балансу по легкокиплячому компоненту:

$$Dem + g_2 = R + G_2, \quad (2.57)$$

$$Dem \cdot y_{DET} + g_2 \cdot x = R \cdot x_R + G_2 \cdot y; \quad (2.58)$$

Витрата флегми g_2 визначається так:

$$g_2 = g_1 + (B - Dem) \cdot (1 - \psi), \quad (2.59)$$

де ψ – ступінь сухості дросельного потоку:

$$\psi = \frac{I_8 - I'}{I'' - I'}, \quad (2.60)$$

де $I' = -2459.2$ (кДж/кмоль) – ентальпія рідкого повітря на лінії насичення при тиску $P = 0.67$ (МПа);

$I'' = 2650.6$ (кДж/кмоль) – ентальпія сухого повітря на лінії насичення при тиску $P = 0.67$ (МПа);

$$\psi = \frac{-679.5 + 2459.2}{2650.6 + 2459.2} = 0.35$$

Витрата флегми g_2 :

$$g_2 = 0.384 + (1 - 0.52) \cdot (1 - 0.35) = 0.696 \text{ кмоль/кмоль}$$

Витрата пари G_2 визначається із загального матеріального балансу:

$$G_2 = Dem + g_2 - R, \quad (2.61)$$

$$G_2 = 0.52 + 0.696 - 0.611 = 0.605 \text{ кмоль/кмоль}$$

Рівняння другої робочої лінії:

$$y_2 = \frac{g_2}{G_2} \cdot x + \frac{Dem}{G_2} \cdot y_{DET} - \frac{R}{G_2} \cdot x^R, \quad (2.62)$$

$$y_2 = \frac{0.696}{0.605} \cdot x + \frac{0.52}{0.605} \cdot 79 - \frac{0.611}{0.605} \cdot 67$$

$$y_2 = 1.15x + 0.24$$

Робоча лінія будується за такими точками:

$$x = 65\% \text{ об. } N_2; \quad y = 74.99\% \text{ об. } N_2$$

$$x = 75\% \text{ об. } N_2; \quad y = 86.49\% \text{ об. } N_2$$

В результаті проведених графічних побудов число теоретичних тарілок

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						31
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$n_{TEOP.} = 10.5$$

№ тарілки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	10,5	куб
x, % об N ₂	98	95.5	92,8	89,9	86,9	84,1	81,2	78,6	76,2	74,2	69,2	67
y, % об N ₂	98	96.7	95,4	94	92,5	91,1	89,7	88,3	87,2	84,5	79,1	76,9

Таблиця 2.1 - Концентрації рідини та пари над тарілками нижньої колони.

Приймається ККД тарілки для нижньої колони $\eta_T = 0,5$

Дійсна кількість тарілок

$$n_D = \frac{n_{TEOP.}}{\eta_T}, \quad (2.63)$$

$$\eta_D = \frac{10,5}{0,5} = 21$$

2.3. Гідравлічний розрахунок нижньої колони

Основна мета розрахунку – визначення конструктивних та технологічних параметрів ректифікаційної колони.

Ректифікаційна колона проектованої установки являє собою циліндричний посуд з внутрішнім діаметром 600 мм, в якій встановлено 21 шт. алюмінієвих поперечно-точних тарілок з сепарацією фаз. Відстань між тарілками $H_T = 50 \text{ мм}$

По висоті колони поперемінно встановлені тарілки з двома та з однією зливними кишнями, тим самим забезпечуючи поперемінний струм рідини.

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

ΔP_T – опір тарілки.

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

Середній опір тарілки визначається, виходячи з розрахунку верхнього та нижнього перерізу колони.

2.3.1 Розрахунок верхнього перерізу колони

Дані до розрахунку

Тип тарілки – двозливна

Кількість пари вперерізі

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

Кількість рідини в перерізі

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

Концентрація пари та рідини

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

Густина пари

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

Густина рідини

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

Густина азоту в нормальних умовах

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

Тиск у перерізі

$$P_B = 0.66 \text{ МПа ;}$$

Температура

$$T_B = 97.7 \text{ К ;}$$

Коефіцієнт поверхневого натягу

$$\sigma = [25.16 - 0.211 \cdot T_B] \cdot 10^{-3}, \quad (2.64)$$

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

Витрата рідини у робочих умовах

$$L_P = \frac{g_1 \cdot B \cdot \rho_{N_2}^{\text{Н.У.}}}{\rho^{\text{Р}}}, \quad (2.65)$$

$$L_P = \frac{0.384 \cdot 2060 \cdot 1.167}{685.165} = 1.35 \text{ м}^3 / \text{год}$$

Витрата пари в робочих умовах

$$G_P = \frac{G_1 \cdot B \cdot \rho_{N_2}^{\text{Н.У.}}}{\rho^{\text{П}}}, \quad (2.66)$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						33
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$G_p = \frac{0.773 \cdot 2060 \cdot 1.167}{26.941} = 68,98 \text{ м}^3/\text{год}$$

Ширина перфорованої смуги 155 мм;

Діаметр перфорованого листа $D_T = 2R = 600 \text{ мм}$;

Ширина приймальної кишені 50 мм;

Площа барботажу

$$F_B = 2F_{BEFD}; \quad (2.67)$$

Площа сектору ABCD

$$F_{ABCD} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \alpha}{360}, \quad (2.68)$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{AK}{AB}; \quad (2.69)$$

$$\cos \frac{\alpha}{2} = \frac{25}{300} = 0.0833;$$

$$\frac{\alpha}{2} = 85.2^\circ, \quad \alpha = 170.5^\circ,$$

$$F_{ABCD} = \frac{\pi \cdot 0,3^2 \cdot 170,5}{360} = 0.134 \text{ м}^2$$

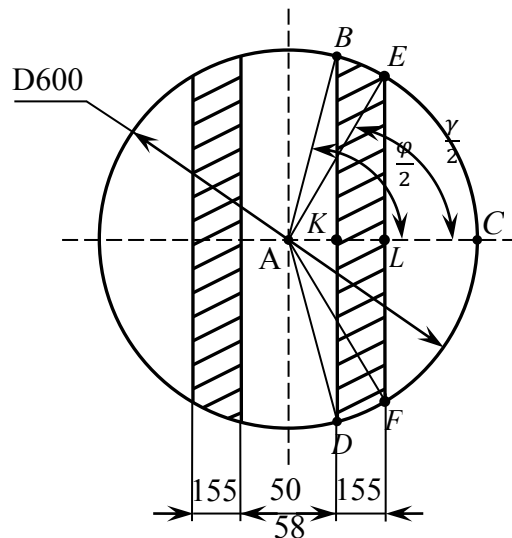


Рис.2.9 – Схема двозливної тарілки

Площа трикутника $\triangle ABD$

$$F_{\triangle ABD} = AK \cdot BK, \quad (2.70)$$

$$BK = \sqrt{R^2 - AK^2}, \quad (2.71)$$

$$BK = \sqrt{0.3^2 - 0.025^2} = 0.299 \text{ м};$$

$$F_{\triangle ABD} = 0.025 \cdot 0.299 = 0.0075 \text{ м}^2;$$

Площа сектора

$AECF$

$$F_{AECF} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \beta}{360}, \quad (2.72)$$

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{AL}{AE}, \quad (2.73)$$

$$\cos \frac{\beta}{2} = \frac{180}{300} = 0.6;$$

$$\frac{\beta}{2} = 52.3^\circ, \quad \beta = 104.6^\circ,$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						34
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$W_{\text{щ}} = \frac{G_p}{3600 \cdot F_{\text{щ}}^{\text{II}}}, \quad (2.80)$$

$$W_{\text{щ}} = \frac{68,98}{3600 \cdot 0,0193} = 0,993 \text{ м/с};$$

Щільність зрошення

$$i^{\text{II}} = \frac{L_p}{P_{\text{С.П.}}^{\text{II}}}, \quad (2.81)$$

де $P_{\text{С.П.}}^{\text{II}}$ – периметр зливних перегородок,

$$P_{\text{С.П.}}^{\text{II}} = 2 \cdot l_{\text{С.П.}}^{\text{II}}, \quad (2.82)$$

$l_{\text{С.П.}}^{\text{II}} = 0,495 \text{ м}$ – довжина зливної перегородки,

$$P_{\text{С.П.}}^{\text{II}} = 2 \cdot 0,495 = 0,99 \text{ м}$$

$$i^{\text{II}} = \frac{1,35}{0,99} = 1,364 \text{ м}^2/\text{ч}$$

Коефіцієнт опору щілинного зазору:

$$\xi_{\text{щ}} = 1,8 \cdot \sin \gamma + 1, \quad (2.83)$$

де γ – кут нахилу відбійника,

$$tg \gamma = \frac{13}{68} = 0,1912$$

$$\gamma = 11^\circ,$$

$$\xi_{\text{щ}} = 1,8 \cdot \sin 11^\circ + 1 = 1,343$$

Критична глибина потоку

$$h_{\text{кр.}} = 4,3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L_p}{P_{\text{ПЕР.}}}\right)^2 \cdot \frac{1}{g}}, \quad (2.84)$$

де $P_{\text{ПЕР}} = 0,985 \text{ м}$ – периметр переливу, що дорівнює двом довжинам зливних кишень,

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння

$$h_{\text{кр.}} = 4,3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{1,35}{0,985}\right)^2 \cdot \frac{1}{9,81}} = 2,5 \text{ мм}$$

Висота найбільш вузького перерізу кишені

$$S_K = 1,34 \cdot h_{\text{кр.}}, \quad (2.85)$$

$$S_K = 1,34 \cdot 2,5 = 3,35 \text{ мм},$$

Рекомендується $S_K \geq 5 \text{ мм}$, приймати $S_K = 5 \text{ мм}$.

Статичний рівень рідини на тарілці:

$$h = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot \left(5,48 \cdot i^{\text{II}0,1} + 8 \cdot \sqrt{W_B} \cdot \sqrt{\rho^{\text{II}}} - 3,85\right), \quad (2.86)$$

$$h = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot (5,48 \cdot 1,364^{0,1} + 8 \cdot \sqrt{0,11} \cdot \sqrt{26,165} - 3,85) = 5,46 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

Опір щілинного зазору тарілки, що не зрошується.

$$\Delta P_{\text{щ}}^C = \xi_{\text{щ}} \cdot \frac{W_{\text{щ}}^2 \cdot \rho^{\text{II}}}{2}, \quad (2.87)$$

$$\Delta P_{\text{щ}}^C = 1,343 \cdot \frac{0,993^2 \cdot 26,165}{2} = 17,32 \text{ Па};$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						36
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Опір щілинного зазору

$$\Delta P_{щ} = 12.753 \cdot [i'' \cdot (\sin \gamma + 1) + 2(\sin \gamma + 0.1)], \quad (2.88)$$

$$\Delta P_{щ} = 12.753 \cdot [1.364 \cdot (0.191 + 1) + 2(0.191 + 0.1)] = 28.15 \text{ Па};$$

Визначення площі отворів

$$F_o = 0.91 \cdot \left(\frac{d_o}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot F_B''; \quad (2.89)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм} \quad F_o^{0,9} = 0.91 \cdot \left(\frac{0.9 \cdot 10^{-3}}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0.175 = 0.0122 \text{ м}^2;$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм} \quad F_o^{1,0} = 0.91 \cdot \left(\frac{1.0 \cdot 10^{-3}}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0.175 = 0.0151 \text{ м}^2;$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм} \quad F_o^{1,1} = 0.91 \cdot \left(\frac{1.1 \cdot 10^{-3}}{3.25 \cdot 10^{-3}} \right)^2 \cdot 0.175 = 0.0172 \text{ м}^2;$$

Швидкість пари в отворах

$$W_o = W_B \cdot \frac{F_B''}{F_o}; \quad (2.90)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм} \quad W_o^{0,9} = 0.11 \cdot \frac{0.175}{0.0122} = 1.578 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм} \quad W_o^{1,0} = 0.11 \cdot \frac{0.175}{0.0151} = 1.275 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм} \quad W_o^{1,1} = 0.11 \cdot \frac{0.175}{0.0172} = 1.132 \text{ м/с};$$

Коефіцієнт опору отворів:

$$\xi_o = 1.4148 \cdot \left(\frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{d_o} \right)^{0.2} \cdot \left(1 - \left(\frac{F_o}{F_B''} \right) \right)^2; \quad (2.91)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм} \quad \xi_o^{0,9} = 1.4148 \cdot \left(\frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{0.9 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.2} \cdot \left(1 - \left(\frac{0.0122 \cdot 10^{-6}}{0.175 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.579$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм} \quad \xi_o^{1,0} = 1.4148 \cdot \left(\frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{1.0 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.2} \cdot \left(1 - \left(\frac{0.0151 \cdot 10^{-6}}{0.175 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.496$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм} \quad \xi_o^{1,1} = 1.4148 \cdot \left(\frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{1.1 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.2} \cdot \left(1 - \left(\frac{0.0182 \cdot 10^{-6}}{0.175 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.411$$

Мінімально допустима швидкість пари в отворах тарілки

$$W_{II \text{ MIN}} = 0.0364 \cdot \xi_o^{-0.625} \cdot \left(\frac{h}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho^{\text{ж}}}{\rho^{\text{п}}}}; \quad (2.92)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм} \quad W_{II \text{ min}}^{0,9} = 0.0364 \cdot 1.579^{-0.625} \cdot \left(\frac{5.46 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{658.165}{26.941}} = 1.056 \text{ м/с}$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм} \quad W_{II \text{ min}}^{1,0} = 0.0364 \cdot 1.496^{-0.625} \cdot \left(\frac{5.46 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{658.165}{26.941}} = 1.09 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм} \quad W_{II \text{ min}}^{1,1} = 0.0364 \cdot 1.411^{-0.625} \cdot \left(\frac{5.46 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{658.165}{26.941}} = 1.123 \text{ м/с};$$

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

Опір тарілки, що не зрошується.

$$\Delta P_C = \xi_o \cdot \frac{W_o^2 \cdot \rho^{II}}{2}; \quad (2.93)$$

При $d_o = 0.9 \text{ мм}$ $\Delta P_C^{0.9} = 1.82 \cdot \frac{1.578^2 \cdot 26.941}{2} = 61.1 \text{ Па};$

При $d_o = 1.0 \text{ мм}$ $\Delta P_C^{1.0} = 1.496 \cdot \frac{1.275^2 \cdot 26.941}{2} = 32.8 \text{ Па};$

При $d_o = 1.1 \text{ мм}$ $\Delta P_C^{1.1} = 1.411 \cdot \frac{1.132^2 \cdot 26.941}{2} = 24.4 \text{ Па};$

Визначення втрат напору від поверхневого натягу

Для $d_o \leq 1.0 \text{ мм}$ $\Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{d_o}; \quad (2.94)$

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

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

Для $d_o > 1.0 \text{ мм}$ $\Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{1.3 \cdot d_o + 0.08 \cdot d_o^2}; \quad (2.95)$

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

$$\Delta P_T^{II} = \Delta P_{II}^C + \Delta P_{II} + \Delta P_C + \Delta P_\sigma + \rho^{ж} \cdot g \cdot h; \quad (2.96)$$

При $d_o = 0.9 \text{ мм}$ $\Delta P_T^{II} = 17,32 + 28,15 + 61,1 + 20 + 685.165 \cdot 9.81 \cdot 5,46 \cdot 10^{-3} = 163,27 \text{ Па};$

При $d_o = 1.0 \text{ мм}$ $\Delta P_T^{II} = 17,32 + 28,15 + 32,8 + 18 + 685.165 \cdot 9.81 \cdot 5,46 \cdot 10^{-3} = 132,97 \text{ Па};$

При $d_o = 1.1 \text{ мм}$ $\Delta P_T^{II} = 17,32 + 28,15 + 24,4 + 13 + 685.165 \cdot 9.81 \cdot 5,46 \cdot 10^{-3} = 119,57 \text{ Па};$

Максимально допустимий опір тарілки

$$\Delta P_{T \text{ MAX}} = 0.00826 \cdot \rho^{ж} \cdot \left(H_T + 15 - 1.195 \cdot S_K - 2.1 \cdot h_{KP} - 1.45 \cdot \frac{h_{KP}^3}{S_K^2} \right), \quad (2.97)$$

$$\Delta P_{T \text{ max}} = 0.00826 \cdot 685.165 \cdot \left(50 + 15 - 1.195 \cdot 3,35 - 2.1 \cdot 2,5 - 1.45 \cdot \frac{2,5^3}{3,35^2} \right) = 304,09 \text{ Па}$$

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

2.3.1 Розрахунок нижнього перерізу колони.

Дані для розрахунку:

Тип тарілки – однозливна.

Кількість пари в перерізі

$$G_2 = 0.605 \text{ кмоль/кмоль};$$

Кількість рідини вперерізі

$$g_2 = 0.696 \text{ кмоль/кмоль};$$

										Лист
										38
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

Температури кипіння чистих продуктів при
Кисню
Азоту
Концентрації:

$$P = 0.67 \text{ МПа};$$

$$T_1 = 113.1 \text{ К};$$

$$T_2 = 97.9 \text{ К};$$

Пари
Рідини

$$y_1 = 76.9\% \text{ об. } N_2;$$

$$x_1 = 67\% \text{ об. } N_2;$$

Густини чистих насичених рідких продуктів
Кисню
Азоту

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

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

Густини чистих газоподібних продуктів:

Кисню
Азоту

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

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

Густина пари в нормальних умовах

$$\rho_{H.Y.}^{\Pi} = \rho_{H.Y.}^A \cdot y_1 + \rho_{H.Y.}^K \cdot (1 - y_1), \quad (2.98)$$

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

Густина рідини у нормальних умовах:

$$\rho_{H.Y.}^{Ж} = \rho_{H.Y.}^A \cdot x_1 + \rho_{H.Y.}^K \cdot (1 - x_1), \quad (2.99)$$

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

Густина суміші пари

$$\rho_{\Pi} = \frac{\rho_{H.Y.}^{\Pi}}{\frac{\rho_{H.Y.}^A}{\rho^A} \cdot y_1 + \frac{\rho_{H.Y.}^K}{\rho^K} \cdot (1 - y_1)}, \quad (2.100)$$

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

Густина суміші рідини

$$\rho_{Ж} = \frac{\rho_{H.Y.}^{Ж}}{\frac{\rho_{H.Y.}^A}{\rho^{A_{жс}}} \cdot x_1 + \frac{\rho_{H.Y.}^K}{\rho^{K_{жс}}} \cdot (1 - x_1)}, \quad (2.101)$$

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

Коефіцієнт поверхневого натягу:

Кисню

$$\sigma_1 = (36.36 - 0.255 \cdot T_1) \cdot 10^{-3}, \quad (2.102)$$

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

Азоту

$$\sigma_2 = (25.16 - 0.211 \cdot T_2) \cdot 10^{-3}, \quad (2.103)$$

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

Поверхневий натяг суміші

$$\sigma = \sigma \cdot x_1 + \sigma \cdot x_2, \quad (2.104)$$

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

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

Визначення площі барботажу однозливної тарілки:

$$F'_B = 2 \cdot F_{ABDE}; \quad (2.105)$$

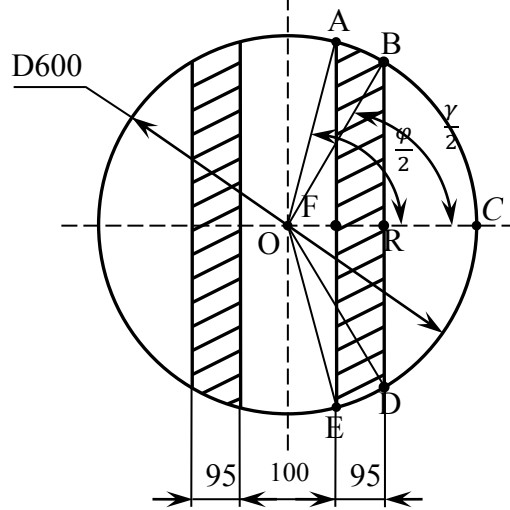


Рис.2.11 – Схема однозливної тарілки

Ширина неперфорованої центральної смуги 100 мм.

Ширина перфорованих смуг 95 мм.

Площа сектора $OACE$

$$F_{OACE} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \varphi}{360}, \quad (2.106)$$

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \frac{OF}{OA}, \quad (2.107)$$

$$\cos \frac{\varphi}{2} = \frac{0.05}{0.3} = 0.1667, \\ \frac{\varphi}{2} = 80,5^\circ, \quad \varphi = 161^\circ;$$

$$F_{OACE} = \frac{3.14 \cdot 0.3^2 \cdot 161}{360} = 0.126 \text{ м}^2;$$

Площа сектора $OBCD$

$$F_{OBCD} = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot \gamma}{360}, \quad (2.108)$$

$$\cos \frac{\gamma}{2} = \frac{OR}{OB}, \quad (2.109)$$

$$\cos \frac{\gamma}{2} = \frac{0.145}{0.3} = 0.483, \quad \frac{\gamma}{2} = 61,5^\circ, \quad \gamma = 123^\circ;$$

$$F_{OBCD} = \frac{3.14 \cdot 0.3^2 \cdot 123}{360} = 0.0966 \text{ м}^2;$$

Площа трикутника OAE

$$F_{\Delta OAE} = \frac{1}{2} \cdot OF \cdot AE, \quad (2.110)$$

$$AE = 2 \cdot \sqrt{OA^2 - OF^2}, \quad (2.111)$$

$$AE = 2 \cdot \sqrt{0.3^2 - 0.05^2} = 0.592 \text{ м},$$

$$F_{\Delta OAE} = \frac{1}{2} \cdot 0.05 \cdot 0.592 = 0.0148 \text{ м}^2;$$

Площа трикутника OBD

$$F_{\Delta OBD} = \frac{1}{2} \cdot OR \cdot BD, \quad (2.112)$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						40
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$BD = 2 \cdot \sqrt{OB^2 - OR^2}, \quad (2.113)$$

$$BD = 2 \cdot \sqrt{0.3^2 - 0.145^2} = 0.5254 \text{ м},$$

$$F_{\Delta OBD} = \frac{1}{2} \cdot 0.145 \cdot 0.5254 = 0.0381 \text{ м}^2;$$

Площа сегмента BCD

$$F_{BCD} = F_{OBCD} - F_{\Delta OBD}, \quad (2.114)$$

$$F_{BCD} = 0.0966 - 0.0381 = 0.0585 \text{ м}^2$$

Площа однієї перфорованої смуги

$$F_{ABDE} = F_{OACE} - F_{BCD} - F_{\Delta OAE}, \quad (2.115)$$

$$F_{ABDE} = 0.126 - 0.0585 - 0.0148 = 0.0527 \text{ м}^2$$

Площа барботажу

$$F_B^I = 2 \cdot 0.0527 = 0.1054 \text{ м}^2;$$

Витрата рідини у робочих умовах

$$L_p = \frac{g_2 \cdot B \cdot \rho_{H.V.}^{\text{ж}}}{\rho^{\text{ж}}}, \quad (2.116)$$

$$L_p = \frac{0.696 \cdot 2060 \cdot 1.222}{772.39} = 2.27 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

Витрата пари в робочих умовах

$$G_p = \frac{G_2 \cdot B \cdot \rho_{H.V.}^{\text{п}}}{\rho^{\text{п}}}, \quad (2.117)$$

$$G_p = \frac{0.605 \cdot 2060 \cdot 1.206}{26.953} = 55.77 \text{ м}^3 / \text{ч};$$

Швидкість барботажу

$$W_B^I = \frac{G_p}{3600 \cdot F_B^I}, \quad (2.118)$$

$$W_B^I = \frac{55.77}{3600 \cdot 0.1054} = 0.147 \text{ м} / \text{с};$$

Площа щілинного зазору

$$F = l_{\text{щ}}^I m \quad l_{\text{щ}}^I \quad (2.119)$$

де $l_{\text{щ}}^I = 560$ мм – довжина щілини для однозливної тарілки

= 19.5 мм – ширина щілини

$$F_{\text{щ}}^I = 2 \cdot 0.56 \cdot 0.0195 = 0.02184 \text{ м}^2$$

Швидкість пари в щілинному зазорі

$$W_{\text{щ}} = \frac{G_p}{3600 \cdot F_{\text{щ}}^I}, \quad (2.120)$$

$$W_{\text{щ}} = \frac{55.77}{3600 \cdot 0.02184} = 0.709 \text{ м} / \text{с};$$

Щільність зрошення

$$i^I = \frac{L_p}{P_{C.I}^I}, \quad (2.121)$$

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

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						41
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$P_{C.П.}^I = 2 \cdot l_{C.П.}^{II}, \quad (2.122)$$

$l_{C.П.}^{II} = 0,555\text{м}$ – довжина зливної перегородки,

$$P_{C.П.}^I = 2 \cdot 0,555 = 1,11 \text{ м};$$

$$i^I = \frac{2,27}{1,11} = 2,045 \frac{\text{м}^2}{\text{ч}};$$

Критична глибина потоку:

$$h_{кр.} = 4,3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{L_P}{P_{ПЕР.}}\right)^2 \cdot \frac{1}{g}}, \quad (2.123)$$

де $P_{ПЕР.} = 1,05\text{м}$ – периметр переливу, що дорівнює двом довжинам зливних кишень,

$g = 9,81\text{м/с}^2$ – прискорення вільного падіння,

$$h_{кр.} = 4,3 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{2,27}{1,05}\right)^2 \cdot \frac{1}{9,81}} = 3,4\text{мм};$$

Висота найбільш вузького перерізу кишені

$$S_K = 1,34 \cdot h_{кр.}, \quad (2.124)$$

$$S_K = 1,34 \cdot 3,4 = 4,6\text{мм};$$

Рекомендується $S_K \geq 5\text{мм}$, приймається $S_K = 5\text{мм}$.

Статичний рівень рідини на тарілці

$$h = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot \left(5,48 \cdot i^{I0,1} + 8 \cdot \sqrt{W_B} \cdot \sqrt{\rho^{II}} - 3,85\right), \quad (2.125)$$

$$h = 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot (5,48 \cdot 2,045^{0,1} + 8 \cdot \sqrt{0,0993} \cdot \sqrt{26,165} - 3,85) = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

Опір щілинного зазору тарілки, що не зрошується.

$$\Delta P_{щ}^C = \xi_{щ} \cdot \frac{W_{щ}^2 \cdot \rho^{II}}{2}, \quad (2.126)$$

$$\Delta P_{щ}^C = 1,343 \cdot \frac{0,709^2 \cdot 26,165}{2} = 8,8\text{Па};$$

Опір щілинного зазору

$$\Delta P_{щ} = 12,753 \cdot [i^I \cdot (\sin \gamma + 1) + 2(\sin \gamma + 0,1)], \quad (2.127)$$

$$\Delta P_{щ} = 12,753 \cdot [2,045 \cdot (0,191 + 1) + 2(0,191 + 0,1)] = 38,48 \text{ Па};$$

Визначення площі отворів

$$F_O = 0,91 \cdot \left(\frac{d_O}{3,25}\right)^2 \cdot F_B^I, \quad (2.128)$$

При $d_O = 0,9\text{мм}$ $F_0^{0,9} = 0,91 \cdot \left(\frac{0,9 \cdot 10^{-3}}{3,25 \cdot 10^{-3}}\right)^2 \cdot 0,1054 = 0,0109\text{м}^2;$

При $d_O = 1,0\text{мм}$ $F_0^{1,0} = 0,91 \cdot \left(\frac{1,0 \cdot 10^{-3}}{3,25 \cdot 10^{-3}}\right)^2 \cdot 0,1054 = 0,0129\text{м}^2;$

При $d_O = 1,1\text{мм}$ $F_0^{1,1} = 0,91 \cdot \left(\frac{1,1 \cdot 10^{-3}}{3,25 \cdot 10^{-3}}\right)^2 \cdot 0,1054 = 0,0151\text{м}^2;$

Швидкість пари в отворах

$$W_O = W_B \cdot \frac{F_B^I}{F_O^I}; \quad (2.129)$$

При $d_O = 0,9\text{мм}$ $W_0^{0,9} = 0,0993 \cdot \frac{0,156}{0,0109} = 1,42\text{м/с};$

									Лист
									42
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	КРБ.КТ.1.490-03.2.15				

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм} \quad W_o^{1.0} = 0.0993 \cdot \frac{0.156}{0.0129} = 1,201 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм} \quad W_o^{1.1} = 0.0993 \cdot \frac{0.156}{0.0151} = 1,026 \text{ м/с};$$

Коефіцієнт опору отворів

$$\xi_o = 1.4148 \cdot \left(\frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{d_o} \right)^{0.2} \cdot \left(1 - \left(\frac{F_o}{F_b^I} \right) \right)^2; \quad (2.130)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм} \quad \xi_o^{0.9} = 1.4148 \cdot \left(\frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{0.9 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.2} \cdot \left(1 - \left(\frac{0.0109 \cdot 10^{-6}}{0.156 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.582$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм} \quad \xi_o^{1.0} = 1.4148 \cdot \left(\frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{1.0 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.2} \cdot \left(1 - \left(\frac{0.0134 \cdot 10^{-6}}{0.156 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.497$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм} \quad \xi_o^{1.1} = 1.4148 \cdot \left(\frac{3.25 \cdot 10^{-3}}{1.1 \cdot 10^{-3}} \right)^{0.2} \cdot \left(1 - \left(\frac{0.0163 \cdot 10^{-6}}{0.156 \cdot 10^{-6}} \right) \right)^2 = 1.409$$

Мінімально допустима швидкість пари в отворах тарілки

$$W_{II \text{ MIN}} = 0.0364 \cdot \xi_o^{-0.625} \cdot \left(\frac{h}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{\rho^{\text{ж}}}{\rho^{\text{п}}}}; \quad (2.131)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм} \quad W_{II \text{ min}}^{0.9} = 0.0364 \cdot 1.582^{-0.625} \cdot \left(\frac{5.6 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{658.165}{26.941}} = 1.102 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм} \quad W_{II \text{ min}}^{1.0} = 0.0364 \cdot 1.497^{-0.625} \cdot \left(\frac{5.6 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{658.165}{26.941}} = 1.141 \text{ м/с};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм} \quad W_{II \text{ min}}^{1.0} = 0.0364 \cdot 1.409^{-0.625} \cdot \left(\frac{5.6 \cdot 10^{-3}}{0.7 \cdot 10^{-3}} \right) \cdot \sqrt{\frac{658.165}{26.941}} = 1.013 \text{ м/с};$$

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

Опір тарілки, що не зрошується.

$$\Delta P_c = \xi_o \cdot \frac{W_o^2 \cdot \rho^{\text{п}}}{2}; \quad (2.132)$$

$$\text{При } d_o = 0.9 \text{ мм} \quad \Delta P_c^{0.9} = 1.582 \cdot \frac{1.42^2 \cdot 26.941}{2} = 42,97 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.0 \text{ мм} \quad \Delta P_c^{1.0} = 1.497 \cdot \frac{1,201^2 \cdot 26.941}{2} = 29,09 \text{ Па};$$

$$\text{При } d_o = 1.1 \text{ мм} \quad \Delta P_c^{0.9} = 1.409 \cdot \frac{1,026^2 \cdot 26.941}{2} = 19,98 \text{ Па};$$

Втрати тиску від поверхневого натягу

$$\text{Для } d_o \leq 1.0 \text{ мм} \quad \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{d_o}; \quad (2.133)$$

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

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

$$\text{Для } d_o > 1.0 \text{ мм} \quad \Delta P_\sigma = \frac{4 \cdot \sigma}{1.3 \cdot d_o + 0.08 \cdot d_o^2}; \quad (2.134)$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						43
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

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

$$\Delta P_T^I = \Delta P_{\text{ш}}^C + \Delta P_{\text{ш}} + \Delta P_C + \Delta P_{\sigma} + \rho^{\text{ж}} \cdot g \cdot h; \quad (2.135)$$

При $d_o = 0.9 \text{ мм}$ $\Delta P_T^I = 8,8 + 38,48 + 42,97 + 24 + 772.39 \cdot 9.81 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3} = 156,68 \text{ Па};$

При $d_o = 1.0 \text{ мм}$ $\Delta P_T^I = 8,8 + 38,48 + 29,09 + 22 + 772.39 \cdot 9.81 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3} = 140,8 \text{ Па};$

При $d_o = 1.1 \text{ мм}$ $\Delta P_T^I = 8,8 + 38,48 + 19,98 + 15 + 772.39 \cdot 9.81 \cdot 5,6 \cdot 10^{-3} = 124,69 \text{ Па};$

Максимально допустимий опір тарілки

$$\Delta P_{T \text{ MAX}} = 0.00826 \cdot \rho^{\text{ж}} \cdot \left(H_T + 15 - 1.195 \cdot S_K - 2.1 \cdot h_{\text{кр}} - 1.45 \cdot \frac{h_{\text{кр}}^3}{S_K^2} \right), \quad (2.136)$$

$$\Delta P_{T \text{ max}} = 0.00826 \cdot 772.39 \cdot \left(50 + 15 - 1.195 \cdot 4,6 - 2.1 \cdot 3.4 - 1.45 \cdot \frac{3.4^2}{4,6^2} \right) = 322,47 \text{ Па};$$

Кожен із варіантів перфорації задовольняє умову $\Delta P_T^{II} < \Delta P_{T \text{ MAX}}$,

отже колона працює стабільно без зависання

Приймається діаметр отворів 1.0 мм всім тарілок колони.

Середній опір тарілки

$$\Delta P_T = \frac{\Delta P_T^{II} + \Delta P_T^I}{2}, \quad (2.137)$$

$$\Delta P_T = \frac{132,97 + 140,8}{2} = 136,89 \text{ Па};$$

Загальний опір колони:

$$\Delta P_K = 21 \cdot 136,89 = 2874,69 \text{ Па};$$

Отриманий опір не перевищує прийнятого у вихідних даних.

Таким чином, діаметр колони та перфорації, відстань між тарілками повністю задовольняють та забезпечують нормальну роботу нижньої колони.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		44

2.4. Розрахунок переохолоджувача рідкого кисню

У даному розрахунку визначаються коефіцієнти тепловіддачі та теплопередачі, середня різниця температур між потоками рідкого кисню низького тиску та кубовою рідиною низького тиску у двопотоковому витому гладкотрубному теплообміннику. Визначається поверхня теплообміну діаметр труб та довжина навивки, кількість шарів, складається таблиця навивки теплообмінника. Розраховується гідравлічний опір теплообмінника та перевіряється на міцність днища та обичайка корпусу апарату.

2.4.1. Вихідні дані:

Розрахункова кількість переробленого повітря	$B = 0.02295 \text{ кмоль/с};$
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 в теплообмінник	$T_{16} = 94.4 \text{ К};$
Кубової рідини на вході в теплообмінник	$T_{11} = 82.8 \text{ К};$
Кисню на виході з теплообмінника	$T_{17} = 87.5 \text{ К};$
Теплоприпливи до переохолоджувачу	$q_{\text{по.}}^K = 5/3 \text{ кДж/кмоль};$

2.4.2 Розрахунок масових витрат прямого та зворотного потоків.

Визначаються мольні витрати потоків кисню та кубової рідини:

$$M^K \doteq B \cdot K \quad (2.138)$$

$$M^K = 0.02295 \cdot 0.194 = 0.00445 \text{ кмоль/с};$$

$$M^R = B \cdot R \quad (2.139)$$

$$M^R = 0.02295 \cdot 0.611 = 0.01402 \text{ кмоль/с};$$

Визначаються масові витрати прямого та зворотного потоків:

$$G^K = M^K \cdot \mu^K \cdot 3600, \quad (2.140)$$

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

$$G^K = 0.00445 \cdot 32 \cdot 3600 = 512.64 \text{ кг/год};$$

$$G^R = M^R \cdot \mu^R \cdot 3600, \quad (2.141)$$

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

$$(2.142)$$

– мольна маса кубової рідини,

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

$$G^R = 0.01402 \cdot 29.33 \cdot 3600 = 1480.34 \text{ кг/год};$$

										Лист
										45
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	КРБ.КТ.1.490-03.2.15					

2.4.3 Визначення теплофізичних властивостей кисню та кубової рідини

Параметри прямого та зворотного потоків визначаються за їх середніх температур. При цьому вважається, що температура кубової рідини при кипінні в міжтрубному просторі не змінюється значно і її можна прийняти постійною.

Середня температура прямого потоку

$$T_{CP}^{PP} = \frac{T_{16} + T_{17}}{2}, \quad (2.143)$$

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

Середня температура зворотного потоку приймається

$$T_{CP}^{OB} = T_{11} = 87.5K;$$

Теплофізичні властивості кубової рідини будуть визначатися за рівняння змішування. Тому спочатку визначаються властивості азоту та кисню при $P = 0.164MPa$ и $T = 82.8K$

Речовина	P, MPa	T, K	$\rho, кг / м^3$	$Cp, кДж / кг \cdot K$	$\lambda, Вт / м \cdot K$	$\nu \cdot 10^6, Па \cdot с$
Кисень	0.164	82.8	1188.418	1.708	0.16198	287.6
Азот	0.164	82.8	7.058	1.102	0.00832	5.5

Таблица 2.2 – теплофізичні властивості речовин

За рівнянням змішування

$$Cp^R = Cp^K \cdot x^R + Cp^A \cdot (1 - x^R), \quad (2.144)$$

$$\rho^R = \rho^K \cdot x^R + \rho^A \cdot (1 - x^R), \quad (2.145)$$

$$\lambda^R = \lambda^K \cdot x^R + \lambda^A \cdot (1 - x^R), \quad (2.146)$$

$$\mu^R = \mu^K \cdot x^R + \mu^A \cdot (1 - x^R), \quad (2.147)$$

де x^R – концентрація кисню в кубовій рідині, $x^R = 33\% \text{ об. } O_2$

При цьому значення необхідно перевести в мольні одиниці, а потім здійснити зворотне переведення.

$$Cp^K = Cp^{K'} \cdot \mu^K \quad (2.148)$$

$$Cp^A = Cp^{A'} \cdot \mu^A, \quad (2.149)$$

$$\rho^K = \rho^{K'} / \mu^K, \quad (2.150)$$

$$\rho^A = \rho^{A'} / \mu^A, \quad (2.151)$$

$$\mu^R = \mu^K \cdot x^R + \mu^A \cdot (1 - x^R), \quad (2.152)$$

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

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

μ^R – молярна маса кубової рідини

$$\rho^R = [(\rho^{K'} / \mu^K) \cdot x^R + (\rho^{A'} / \mu^A) \cdot (1 - x^R)] \cdot \mu^R, \quad (2.153)$$

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

$$Cp^R = [(Cp^{K'} \cdot \mu) \cdot x^R + (Cp^{A'} \cdot \mu^A) \cdot (1 - x^R)] / \mu^R, \quad (2.154)$$

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

$$\lambda^R = \lambda^K \cdot x^R + \lambda^A \cdot (1 - x^R) , \quad (2.155)$$

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

$$\nu^R = \nu^K \cdot x^R + \nu^A \cdot (1 - x^R) \quad (2.156)$$

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

Результати розрахунку теплофізичних властивостей речовин зводяться до таблиці

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

Таблиця 2.3 – Теплофізичні властивості потоків

2.4.4. Енергетичний баланс теплообмінника

Енергетичний баланс апарату розрахований у технологічному розрахунку схеми установки. Повторювати його в цьому розрахунку немає необхідності.

2.4.5. Визначення коефіцієнтів тепловіддачі

Для навивки теплообмінника вибирається мідна трубка $10 \times 1 \text{ мм}$ (тобто внутрішній діаметр трубки $d_1 = 8 \text{ мм}$, а зовнішній $d_2 = 10 \text{ мм}$), із міркувань безпеки т.к. у трубках тече рідкий кисень. Приймається масова швидкість кисню у трубках $\omega_1 \cdot \rho_1 = 600 \text{ кг} / \text{ м}^2 \cdot \text{ с}$, масова швидкість кубової рідини у міжтрубному просторі $\omega_2 \cdot \rho_2 = 90 \text{ кг} / \text{ м}^2 \cdot \text{ с}$.

Для визначення режиму перебігу трубного (кисневого) потоку знаходиться величина критерію Рейнольдса

$$\text{Re}^{TP} = \frac{\omega_1 \cdot \rho_1 \cdot d_1}{\nu^{TP}} , \quad (2.157)$$

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

Критичне значення числа Рейнольдса для трубного простору

$$\text{Re}_{KP}^{TP} = 2300 \cdot \left[1 + 8.6 \cdot \left(\frac{d_1}{D_{CP}} \right)^{0.45} \right] , \quad (2.158)$$

Приймаючи $D_{CP} = 200 \text{ мм}$,

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

Так як $\text{Re}^{TP} \gg \text{Re}_{KP}^{TP}$, то міжтрубному просторі встановлюється розвинена турбулентна течія.

У цьому випадку критерій Нуссельта визначається за наступною залежністю

$$Nu^{TP} = 0.021 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.43} \cdot \varepsilon, \quad (2.159)$$

где критерій Прандля

$$Pr^{TP} = \frac{\nu^K \cdot Cp^K}{\lambda^K}, \quad (2.160)$$

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

де ε – коефіцієнт, що враховує кривизну трубок:

$$\varepsilon = 1 + 3.54 \cdot \frac{d_1}{D_{CP}}, \quad (2.161)$$

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

Підставляючи значення Pr^{TP} і ε у формулу критерію Нуссельта,

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

Коефіцієнт тепловіддачі від кисню до трубки

$$\alpha^{TP} = Nu^{TP} \cdot \frac{\lambda^K}{d_1}, \quad (2.162)$$

$$\alpha^{TP} = 106.1 \cdot \frac{0.14759}{0.008} = 1957.41 \text{ Bm} / \text{m}^2 \cdot \text{K};$$

Величина критерію Рейнольдса у міжтрубному просторі

$$Re^M = \frac{\omega_2 \cdot \rho_2 \cdot d_2}{\nu^M}, \quad (2.163)$$

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

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

Критерій Нуссельта в міжтрубному просторі визначається по залежності:

$$Nu = 0.0418 \cdot (Re^M)^{0.8508}, \quad (2.164)$$

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

Коефіцієнт теплопередачі від стінки трубки до кубової рідини

$$\alpha^M = Nu^M \cdot \frac{\lambda^R}{d_2}, \quad (2.165)$$

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

Коефіцієнт теплопередачі віднесений до зовнішньої поверхні трубок

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha^{TP}} \cdot \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha^M}}, \quad (2.166)$$

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

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						48
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2.4.6 Визначення середньої різниці температур

Визначається середня чи середньоінтегральна різниця температур.

Оскільки потоки протікають при низькому тиску, то теплоємності потоків за висотою теплообмінника практично не змінюються. Перевіряється відношення:

$$\frac{\Delta T_{T.}}{\Delta T_{X.}} = \frac{T_{16} - T_{12}}{T_{17} - T_{11}}, \quad (2.167)$$

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

Отже середню різницю температур слід визначати як середньогеометричну

$$\Delta T_{CP.} = \frac{\Delta T_{T.} - \Delta T_{X.}}{\ln \frac{\Delta T_{T.}}{\Delta T_{X.}}} = \frac{(T_{16} - T_{12}) - (T_{17} - T_{11})}{\ln \frac{(T_{16} - T_{12})}{(T_{17} - T_{11})}}, \quad (2.168)$$

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

2.4.7 Визначення поверхні теплообміну.

Теплове навантаження теплообмінника

$$= G^{OB.} \cdot (i_{12} - i_{11}) = G^{OB.} \cdot (I_{12} - I_{11}) / M^R$$

$$Q = 1480.34 \cdot (-2591.7 - (-2716.4)) / 29.3 = 6300,29 \text{ кДж / ч};$$

Приймається величина запасу поверхні теплообміну, що дорівнює 75%, тому що теплообмінник рідинний. Визначається поверхня теплообміну

$$F = \frac{1.75 \cdot Q}{K \cdot \Delta T_{CP.}}, \quad (2.170)$$

$$F = \frac{1.75 \cdot 6300,29 \cdot 10^3}{422.05 \cdot 7.63 \cdot 3600} = 0,951 \text{ м}^3;$$

2.4.8 Конструктивний розрахунок теплообмінника.

Діаметр сердечника приймається за умови:

$$D_{СЕРД.} = 13 \cdot d_2, \quad (2.171)$$

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

Приймається кількість шарів навивки $n_{СЛ.} = 3$

Площа перерізу міжтрубного простору

$$f^M = \frac{G^R}{\omega_2 \cdot \rho_2}, \quad (2.172)$$

$$f^M = \frac{1480.34}{90 \cdot 3600} = 0.0046 \text{ м}^2;$$

Приймається товщина прокладки $\delta = 3$ мм,
тоді

$$D_{CP.} = D_{СЕРД.} + n_{СЛ.} \cdot (d_2 + \delta), \quad (2.173)$$

$$D_{CP.} = 0.13 + 3 \cdot (0.01 + 0.003) = 0.169 \approx 0.17 \text{ м};$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						49
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Визначається розрахункова товщина прокладки

$$\delta = \frac{f^M}{\pi \cdot D_{CP} \cdot n_{CL}}, \quad (2.174)$$

$$\delta = \frac{0,0046}{3,14 \cdot 0,17 \cdot 3} = 0,0029;$$

Оскільки прийняте значення δ незначно відрізняється від розрахункового, фактичний прохідний переріз змінюється також незначно, отже, нема необхідності уточнювати прийняте значення масової швидкості $\omega_2 \cdot \rho_2$ та перераховувати значення коефіцієнта тепловіддачі α_2 .

Зовнішній діаметр намотування

$$D_{НАР} = D_{СЕРД.} + 2 \cdot n_{CL} \cdot (d_2 + \delta), \quad (2.175)$$

$$D_{НАР} = 0,13 + 2 \cdot 3 \cdot (0,01 + 0,003) = 0,208 \text{ м};$$

Число трубок теплообмінника

$$n_{ТР} = \frac{4 \cdot G^{TP}}{\omega_1 \cdot \rho_1 \cdot \pi \cdot d_1^2}, \quad (2.176)$$

$$n_{ТР} = \frac{4 \cdot 512,64}{600 \cdot 3,14 \cdot 0,008^2} = 5,7_{3600}$$

Приймається $n_{ТР} = 6$, при цьому масова швидкість $\omega_1 \cdot \rho_1$ не змінюється, та уточнювати коефіцієнт тепловіддачі α_1 немає необхідності.

Середня довжина однієї трубки теплообмінника

$$L = \frac{F}{\pi \cdot d_2 \cdot n_{ТР}}, \quad (2.177)$$

$$L = \frac{0,951}{3,14 \cdot 0,01 \cdot 6} = 6,06 \text{ м};$$

Теоретична довжина намотування

$$H = \frac{n_{ТР} \cdot L \cdot t_2}{\pi \cdot D_{CP} \cdot n_{CL}}, \quad (2.178)$$

где $t_2 = \sigma_2 \cdot d_2$,

$$t_2 = 1,4 \cdot 0,01 = 0,014 \text{ м},$$

$$H = \frac{6 \cdot 6,06 \cdot 0,014}{3,14 \cdot 0,17 \cdot 3} = 0,318 \text{ м};$$

Складається таблиця навивки теплообмінника, розрахувавши наступні величини:

Середній діаметр шару

$$D_{CL}^i = D_{СЕРД.} + 2 \cdot i \cdot t_1, \quad (2.180)$$

де $t_1 = \sigma_1 \cdot d_2$,

$$t_1 = 1,4 \cdot 0,01 = 0,014 \text{ м},$$

$$D_{CL}^1 = 0,13 + 2 \cdot 1 \cdot 0,014 = 0,158 \text{ м},$$

$$D_{CL}^2 = 0,13 + 2 \cdot 2 \cdot 0,014 = 0,186 \text{ м},$$

$$D_{CL}^3 = 0,13 + 2 \cdot 3 \cdot 0,014 = 0,214 \text{ м};$$

Число заходів у шарі

$$n_3^i = \frac{n_{ТР} \cdot D_{CL}^i}{n_{CL} \cdot D_{CP}}, \quad (2.182)$$

$$n_3^1 = \frac{6 \cdot 0,158}{3 \cdot 0,17} = 1,86 \approx 2;$$

$$n_3^1 = \frac{6 \cdot 0,186}{3 \cdot 0,17} = 2,19 \approx 2;$$

$$n_3^1 = \frac{6 \cdot 0,214}{3 \cdot 0,17} = 2,52 \approx 3;$$

Число витків трубки у шарі

$$n_{B.}^i = \frac{H}{n_3^i \cdot t_2}, \quad (2.183)$$

$$n_B^1 = \frac{0,318}{2 \cdot 0,014} = 11,4;$$

$$n_B^1 = \frac{0,318}{2 \cdot 0,014} = 11,4;$$

$$n_B^1 = \frac{0,318}{3 \cdot 0,014} = 7,6;$$

Довжина трубки у шарі

$$L^i = \pi \cdot D_{сл.}^i \cdot n_{B.}^i \quad (2.184)$$

$$L^1 = 3,14 \cdot 0,158 \cdot 11,4 = 5,66 \text{ м};$$

$$L^2 = 3,14 \cdot 0,186 \cdot 11,4 = 6,66 \text{ м};$$

$$L^3 = 3,14 \cdot 0,214 \cdot 7,6 = 5,11 \text{ м};$$

З урахуванням додаткової довжини трубок в колекторі:

$$L^1 = 7,08 \text{ м};$$

$$L^1 = 8,33 \text{ м};$$

$$L^1 = 6,39 \text{ м};$$

№ слоя	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	11,4	7,08	3.0
2	0.186	2	11,4	8,33	3.0
3	0.214	3	7,6	6,39	3.0

Таблиця 2.4 – Таблиця навивки теплообмінника.

2.4.9 Гідравлічний розрахунок теплообмінника.

Опір трубного простору

$$\Delta P^{TP.} = \xi \cdot \frac{(\rho_1 \cdot \omega_1)^2 \cdot L}{2 \cdot \rho^k \cdot d_1}, \quad (2.185)$$

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

$$\xi = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}, \quad (2.186)$$

$$\xi = \frac{0,3164}{21295^{0,25}} = 0,026,$$

$\rho^k = 1145,57 (\text{кг} / \text{м}^3)$ – густина рідкого кисню при $P = 0,154 \text{ МПа}$

Тоді втрати тиску у трубному просторі:

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		51

$$\Delta P^{TP} = 0.026 \cdot \frac{600^2 \cdot 6.06}{2 \cdot 1145.57 \cdot 0.008} = 3094,6 \text{ Па} = 0,0033 \text{ МПа};$$

Гідравлічний опір у міжтрубному просторі

$$\Delta P^M = m \cdot \frac{Eu}{m} \cdot \frac{(\rho_2 \cdot \omega_2)}{\rho^R}, \quad (2.187)$$

$$\text{де } \frac{Eu}{m} = 0.53 \cdot (\text{Re}^M)^{-0.122}, \quad (2.188)$$

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

$$m = \frac{H^M}{\sigma_2 \cdot d_2 \cdot \sqrt{1 + \text{tg}^2 \beta}}, \quad (2.189)$$

$$\text{де } \text{tg} \beta = \frac{\sigma_2 \cdot d_2 \cdot n_{TP}}{\pi \cdot n_{СЛ} \cdot (D_{СЕРД.} + n_{СЛ} \cdot \sigma_1 \cdot d_2)}, \quad (2.190)$$

$$\text{tg} \beta = \frac{1.4 \cdot 0.01 \cdot 6}{3.14 \cdot 3 \cdot (0.13 + 3 \cdot 1.4 \cdot 0.01)} = 0,052;$$

тоді

$$H^M = \left(\frac{L}{\sqrt{1 + 1/\text{tg}^2 \beta}} \right) \quad (2.191)$$

$$H^M = \left(\frac{6.06}{\sqrt{1 + \frac{1}{0.052^2}}} \right) = 0,31;$$

Підставляючи формулу знайдені значення $\text{tg} \beta$ і H^M ,

$$m = \frac{0.31}{1.4 \cdot 0.01 \cdot \sqrt{1 + 0.052^2}} = 23.6 \approx 24,$$

Тоді

$$\Delta P^M = 24 \cdot 0.53 \cdot 9129^{-0.122} \cdot \frac{90}{364.41} = 1.03 \text{ Па};$$

Так як отримане значення $\Delta P_{TP} = 0.0033 \text{ МПа} < [\Delta P_{TP}] = 0.004 \text{ МПа}$, теплообмінник вважається придатним для використання.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						52
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2.5. Розрахунок конденсатора-випарника

Конденсатор-випарник проектованої установки представляє собою пластинчасто-ребристий пакет, що вбудований у куб верхньої колони.

2.5.1 Вихідні дані:

тиск кипіння кисню

$$P_K = 0.1588 \text{ МПа};$$

тиск конденсації азоту

$$P_A = 0.6304 \text{ МПа};$$

температурний натиск у верхньому перерізі

$$\Delta T_{K/B} = T_A - T_K = 97.04 - 94.7 = 2.3 \text{ К};$$

конструктивні розміри пакету:

- висота пакету

$$b_2 = 500 \text{ мм};$$

- ширина пакету

$$b_1 = 500 \text{ мм};$$

- довжина пакету

$$l = 1500 \text{ мм};$$

- ширина проставочної смуги

$$b_3 = 18 \text{ мм};$$

- висота насадки

$$l_1 = l_2 = 6 \text{ мм};$$

- товщина насадки

$$\delta_1 = \delta_2 = 0,2 \text{ мм};$$

- товщина стінки каналів

$$\delta = 1 \text{ мм};$$

- товщина бічних листів

$$T = 6 \text{ мм};$$

- крок ребра на стороні кипіння

$$S_1 = 3 \text{ мм};$$

- крок ребра на стороні конденсації

$$S_2 = 3 \text{ мм};$$

- рівень конденсату визначається конструкцією конденсатора-випарника (розташуванням і діаметром трубки зливу конденсату, $H_K = 0.05 \dots 0.3 \text{ м}$;

Приймається $H_K = 0,1 \text{ м}$.

$$\text{Тепловий потік конденсатора-випарника } Q = Q_{K.B} \cdot \frac{3000}{3600} \cdot \frac{1}{24} = 3637,5 \cdot \frac{3000}{3600} \cdot \frac{1}{24} = 126,3 \text{ кВт.}$$

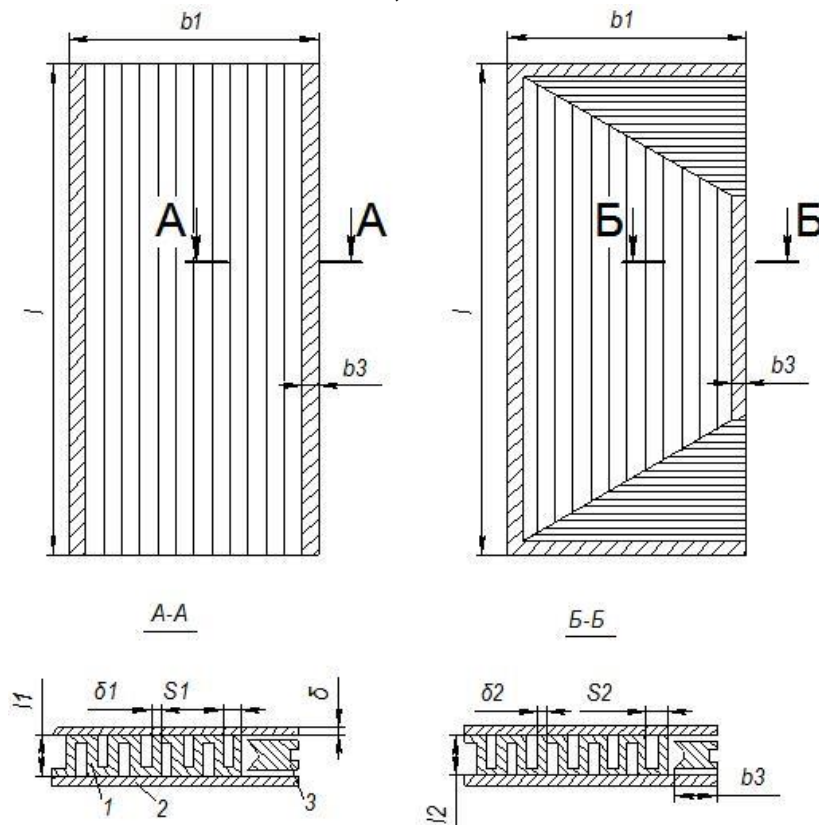


Рис 2.12 – Пакет пластинчасто-ребристого конденсатора-випарника.

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

КРБ.КТ.1.490-03.2.15

Лист

53

1. - Ребрита поверхня;
2. - Стінка каналу;
3. - Проставкова смуга.

2.5.2 Розрахунок пластинчасто-ребристого пакета

Еквівалентний діаметр каналу

$$d_3 = \frac{2 \cdot (s_1 - \delta_1) \cdot (l_1 - \delta_1)}{(s_1 + l_1 - 2\delta_1)}; \quad (2.192)$$

$$d_3 = \frac{2 \cdot (3 - 0.2) \cdot (6 - 0.2)}{(3 + 6 - 2 \cdot 0.2)} = 3,78 \text{ мм};$$

робоча довжина парогенеруючих каналів

$$l_p = l - H_K - b_3; \quad (2.193)$$

$$l_p = 1500 - 100 - 18 = 1382 \text{ мм};$$

площа робочої поверхні каналу кипіння та каналу конденсації

$$F_1 = F_2 = \frac{2l_p \cdot (b_1 - 2b_3) \cdot (s_1 + l_1 - 2\delta_1)}{s_1}; \quad (2.194)$$

$$F_1 = F_2 = \frac{2 \cdot 1382 \cdot (500 - 2 \cdot 18) \cdot (3 + 6 - 2 \cdot 0.2)}{3} = 3676488,5 \text{ мм}^2 = 3.676 \text{ м}^2;$$

площа поперечного перерізу каналу кипіння

$$f = \frac{(b_1 - 2b_3) \cdot (s_1 - \delta_1) \cdot (l_2 - \delta_1)}{s_1}; \quad (2.195)$$

$$f = \frac{(500 - 2 \cdot 18) \cdot (3 - 0.2) \cdot (6 - 0.2)}{3} = 2.512 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2;$$

площа робочої поверхні ребер у каналі

$$F_{p1} = F_{p2} = \frac{2l_p \cdot (b_1 - 2b_3) \cdot (l_1 - \delta_1)}{s_1}; \quad (2.196)$$

$$F_{p1} = F_{p2} = \frac{2 \cdot 1382 \cdot (500 - 2 \cdot 18) \cdot (6 - 0.2)}{3} = 2,48 \text{ м}^2$$

Теплофізичні властивості киплячого кисню на лінії насичення при

$P_K = 0.1588 \text{ МПа}$:

$\rho_1' = 1124,4 \text{ кг/м}^3$ - густина рідкого насиченого кисню;

$\rho_1'' = 6,731 \text{ кг/м}^3$ - густина газоподібного насиченого кисню;

$r_1 = 210.2 \text{ кДж/кг}$ - теплота пароутворення кисню;

$\mu_1' = 15.1 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічна в'язкість рідкого кисню;

$\mu_1'' = 8.74 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічна в'язкість газоподібного кисню;

$\lambda_1 = 0.14105 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ - теплопровідність рідкого кисню;

$C_p = 1,772 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$ - теплоємність рідкого кисню.

Середній тиск у парогенеруючих каналах

$$P_{cp} = P_{кип} + \frac{h \cdot l_p \cdot \rho_1'}{2 \cdot 10^5}, \quad (2.197)$$

де h – відносний рівень, $h = 0,2 \dots 1 \text{ м}$; приймається $h = 0,8 \text{ м}$;

$$P_{cp} = 0,1588 + \frac{0,8 \cdot 1,382 \cdot 1124,4}{2 \cdot 10^5} = 0,165 \text{ МПа}$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						54
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Теплофізичні властивості азоту, що конденсується.

$\rho = 689,7 \text{ кг/м}^3$ - густина рідкого азоту;

$r_2 = 172,3 \text{ кДж/кг}$ - теплота пароутворення азоту;

$\mu = 63,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ - динамічна в'язкість рідкого азоту;

$\lambda'_2 = 0,08676 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$ - теплопровідність рідкого азоту.

Кінематична в'язкість рідкого азоту

$$v'_2 = \frac{\mu'_2}{\rho'_2}; \quad (2.198)$$

$$v'_2 = \frac{63,4 \cdot 10^{-6}}{689,7} = 0,0919 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с};$$

Ефективна потужність теплового потоку з боку конденсації і вибирається в діапазоні $800 \dots 45 \text{ Вт/м}^2$, приймається $q_{\text{эф}2} = 1800 \text{ Вт/м}^2$.

Температурний напор на стороні конденсації

$$\Delta T_{\text{Конд}} = \left(\frac{q_{\text{эф}2}}{0,95}\right)^{1,282} \cdot \left(\frac{1}{\lambda'_2}\right) \cdot \left(\frac{v'^2_2}{g}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \left(\frac{l_p}{r_2 \cdot v'_2 \cdot \rho'_2}\right)^{0,282}; \quad (2.199)$$

$$\Delta T_{\text{Конд}} = \left(\frac{1800}{0,95}\right)^{1,282} \cdot \left(\frac{1}{0,08676}\right) \cdot \left(\frac{(0,0919 \cdot 10^{-6})^2}{9,8}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot$$

$$\left(\frac{1,382}{172,3 \cdot 10^3 \cdot 0,0919 \cdot 10^{-6} \cdot 689,7}\right)^{0,282} = 0,975 \text{ К}$$

Коефіцієнт теплопередачі під час конденсації

$$\alpha_{\text{Конд}} = \frac{q_{\text{эф}2}}{\Delta T_{\text{Конд}}}; \quad (2.200)$$

$$\alpha_{\text{Конд}} = \frac{1800}{0,975} = 1846,15 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

Параметр ребра каналу конденсації

$$m_{\text{Конд}} = \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{Конд}}}{\lambda_{\text{ст}} \cdot \delta_2}}, \quad (2.201)$$

де $\lambda_{\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки;

$\lambda_{\text{ст}} = 148 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$

$$m_{\text{Конд}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1846,15}{148 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}} = 353,19;$$

ККД ребра каналу конденсації

$$\eta_{\text{Р.Конд}} = \frac{\text{th}(0,5m_{\text{Конд}} \cdot l_2)}{0,5m_{\text{Конд}} \cdot l_2}; \quad (2.202)$$

$$\eta_{\text{Р.Конд}} = \frac{\text{th}(0,5 \cdot 353,19 \cdot 0,006)}{0,5 \cdot 353,19 \cdot 0,006} = 0,7452;$$

ККД поверхні конденсації

$$\eta_{\text{П.Конд}} = 1 - \frac{F_{\text{р}2}}{F_2} (1 - \eta_{\text{Р.Конд}}); \quad (2.203)$$

$$\eta_{\text{П.Конд}} = 1 - \frac{2,48}{3,676} (1 - 0,7452) = 0,8281$$

Кількість теплоти, що виділилося в каналі конденсації

$$Q_1 = q_{\text{эф}2} \cdot F_2 \cdot \eta_{\text{П.Конд}}; \quad (2.204)$$

$$Q_1 = 1800 \cdot 3,676 \cdot 0,8281 = 5479,37 \text{ Вт}$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						55
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Температурний напір у проставному листі

$$\Delta_{CT} = \frac{Q_1 \delta}{2(b_1 - 2b_3) l_P \lambda_{CT}}; \quad (2.205)$$

$$\Delta_{CT} = \frac{5479.37 \cdot 0.2 \cdot 10^{-3}}{2(0.5 - 2 \cdot 0.018) \cdot 1.382 \cdot 148} = 0,00577 \text{ К}$$

Ефективна густина теплового потоку в каналі конденсації

$$q_{\text{эф1}} = \frac{Q_1}{F_1}; \quad (2.206)$$

$$q_{\text{эф1}} = \frac{5479.37}{3.676} = 1490,58 \text{ Вт/м}^2$$

Число Рейнольдса

$$R_e = \frac{\omega_0 d_3 \rho'_1}{\mu'_1}, \quad (2.207)$$

де ω_0 - швидкість циркуляції, $\omega_0 = 0,07$ м/с ;

$$R_e = \frac{0,07 \cdot 3,78 \cdot 10^{-3} \cdot 1124,4}{15.1 \cdot 10^{-5}} = 1970,31;$$

Модифіковане число Рейнольдса потоку маси від теплообмінної поверхні

$$R_{eF} = \frac{q_{\text{эф1}} \cdot d_3 \rho'_1}{r_1 \cdot \mu'_1 \cdot \rho''_1}; \quad (2.208)$$

$$R_{eF} = \frac{1490,58 \cdot 3,78 \cdot 10^{-3} \cdot 1124,4}{210.2 \cdot 10^3 \cdot 15.1 \cdot 10^{-5} \cdot 6,731} = 29,65;$$

Температурний напір на стороні кипіння

$$\Delta T_{\text{Кип}} = 0,15 \frac{Q_1}{M \cdot C_p} R_e^{1.1} \cdot R_{eF}^{-0.75} \cdot \left(\frac{l_P}{d_3}\right)^{-1.1}, \quad (2.209)$$

де M – масова витрата рідини на вході в парогенеруючий канал,

$$M = \omega_0 f \rho'_1 \quad (2.210)$$

$$M = 0,07 \cdot 2.512 \cdot 10^{-3} \cdot 1124,4 = 0,198 \text{ м/с}$$

$$\Delta T_{\text{Кип}} = 0,15 \frac{5479.37}{0,198 \cdot 1,772 \cdot 10^3} 1970,31^{1.1} \cdot 29,65^{-0.75} \cdot \left(\frac{1,382}{3,78 \cdot 10^{-3}}\right)^{-1.1} = 1,176 \text{ К}$$

Коефіцієнт тепловіддачі за кипіння

$$m_{\text{Кип}} = \sqrt{\frac{2\alpha_{\text{Кип}}}{\lambda_{CT} \delta_1}}; \quad (2.211)$$

$$m_{\text{Кип}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1104,32}{148 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3}}} = 290,34$$

ККД ребра каналу кипіння

$$\eta_{P.\text{Кип}} = \frac{th(0.5 m_{\text{Кип}} \cdot l_1)}{0.5 m_{\text{Кип}} \cdot l_1}; \quad (2.212)$$

$$\eta_{P.\text{Кип}} = \frac{th(0.5 \cdot 290,34 \cdot 0,006)}{0.5 \cdot 290,34 \cdot 0,006} = 0,806$$

Уточнене значення густини теплового потоку в каналі кипіння

$$q_{\text{эф1}}' = \frac{Q_1}{F_1 \eta_{P.\text{Кип}}}; \quad (2.213)$$

$$q_{\text{эф1}}' = \frac{5479.37}{3.676 \cdot 0.806} = 1849,35 \text{ Вт/м}^2;$$

						КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
							56
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			

Сумарний температурний напор

$$\begin{aligned}\Sigma\Delta T &= \Delta T_{\text{Конд}} + \Delta T_{\text{Ст}} + \Delta T_{\text{Кип}} ; & (2.214) \\ \Sigma\Delta T &= 0,975 + 0,00577 + 1,176 = 2,157 \text{ К} \\ |\Sigma\Delta T - \Delta T_{\text{к/и}}| &= |2,157 - 2,3| = 0,143 \text{ К}\end{aligned}$$

Дійсна ефективна густина теплового потоку сторони конденсація визначається в результаті графічного рішення рівняння

$$\Sigma\Delta T = f(q_{\text{эф2}}), q_{\text{эф2}}^* = 1840 \text{ Вт/м}^2 .$$

Площа ефективності поверхні на стороні конденсації

$$\begin{aligned}F_{\text{эф2}} &= \frac{Q_{\text{к}}}{q_{\text{эф2}}^*}; & (2.215) \\ F_{\text{эф2}} &= \frac{126,3 \cdot 10^3}{1840} = 68,64 \text{ м}^2\end{aligned}$$

Число каналів конденсації

$$\begin{aligned}N_2 &= \frac{F_{\text{эф2}}}{F_2 \cdot \eta_{\text{п.Конд}}}; & (2.216) \\ N_2 &= \frac{68,64}{3,676 \cdot 0,8281} = 22,55\end{aligned}$$

Число каналів конденсації в одному пакеті

$$\begin{aligned}n_2 &= \frac{b_2 - (l_1 + 2T)}{l_1 + l_2 + 2\delta}; & (2.217) \\ n_2 &= \frac{0,5 - (0,006 + 2 \cdot 0,006)}{0,006 + 0,006 + 2 \cdot 0,001} = 34,43\end{aligned}$$

Необхідна кількість пакетів у конденсаторі

$$\begin{aligned}n &= \frac{N_2}{n_2}; & (2.218) \\ n &= \frac{22,55}{34,43} = 0,66\end{aligned}$$

Приймається число пакетів $n = 1$.

Робоча поверхня на стороні кипіння

$$\begin{aligned}F_{\text{Кип}} &= F_1 \cdot n_2; & (2.219) \\ F_{\text{Кип}} &= 3,676 \cdot 34,43 = 126,6 \text{ м}^2\end{aligned}$$

									Лист
									57
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

2.6. Розрахунок теплообмінника-зріджувача

2.6.1. Вихідні данні:

внутрішній діаметр обичайки
число шарів навивки
зовнішній діаметр трубки
внутрішній діаметр трубки
діаметр сердечника

$$D_{BH} = 0,6 \text{ м};$$

$$Z = 16;$$

$$d_H = 8 \text{ мм};$$

$$d_{BH}^T = 6 \text{ мм};$$

$$d_{BH}^O = 5 \text{ мм};$$

$$D_C = 0,2976 \text{ м};$$

діаметр обрібного дроту
крок оребрення

$$d_{PP} = 1,5 \text{ мм};$$

$$r_{OP} = 0,005 \text{ м}.$$

Відносні кроки навивки:
діаметральний
осьовий

$$\delta_1 = 1,106;$$

$$\delta_2 = 1,263.$$

Кількість труб:
прямого потоку
зворотного потоку

$$n_T = 37;$$

$$n_0 = 7.$$

Температури :
повітря на вході в апарат
повітря на виході з апарату
азот на вході в апарат
азот на виході з апарату
кисень на вході в апарат
кисень на виході з апарату

$$T_1 = 313 \text{ K};$$

$$T_2 = 281 \text{ K};$$

$$T_{24} = 268 \text{ K};$$

$$T_{25} = 301,3 \text{ K};$$

$$T_{19} = 269 \text{ K};$$

$$T_{20} = 303 \text{ K};$$

2.6.2. Тепловий розрахунок

Теплообмінник є кручений трипотоковий теплообмінний апарат з дротяним оребренням труб. У трубах прямого потоку проходить вологе повітря під тиском 6,1 МПа, у трубах зворотного потоку – кисень під тиском 16,487 МПа, у міжтрубному просторі – азот під тиском 0,125 МПа.

Розрахунок ведеться від холодного кінця апарату теплomu.

2.6.2.1 Визначення коефіцієнта тепловіддачі трубного потоку до стінки трубки.

Середня температура потоку

$$T_{CP}^T = \frac{T_2 + T_1}{2}; \quad (2.220)$$

$$T_{CP}^T = \frac{281 + 313}{2} = 297 \text{ K}$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		58

Теплофізичні властивості вологого повітря при тиску 6,1 МПа та температурі 297 К:

питома теплоємність $C_{pT} = 1.117 \frac{\text{КДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$;

динамічна в'язкість $\eta_T = 193 \cdot 10^{-7} \text{Па}\cdot\text{с}$;

теплопровідність $\lambda_T = 0,0294 \text{Вт/м}\cdot\text{К}$;

густина $\rho_T = 71,753 \text{кг/м}^3$.

Живий переріз трубного простору

$$f_T = \frac{\pi}{4} (d_{BH}^T)^2 \cdot n_T ; \quad (2.221)$$

$$f_T = \frac{3.14}{4} 0.006^2 \cdot 37 = 0.001043 \text{ м}^2 ;$$

масова швидкість трубного потоку

$$W_T = \frac{v_T \cdot \mu_T}{3600 \cdot 24 \cdot f_T} , \quad (2.222)$$

де μ_T - молярна маса повітря ; $\mu_T = 29 \text{ г/моль}$;

$$W_T = \frac{1 \cdot 1440 \cdot 29}{3600 \cdot 24 \cdot 0.001043} = 463,41 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} ;$$

критерій Прандтля

$$P_{rT} = \frac{C_{pT} \cdot \eta_T}{\lambda_T} ; \quad (2.223)$$

$$P_{rT} = \frac{1.117 \cdot 193 \cdot 10^{-7}}{0.0294 \cdot 10^{-3}} = 0.733 ;$$

критерій Рейнольдса

$$R_{eT} = \frac{W_T \cdot d_{BH}^T}{\eta_T} ; \quad (2.224)$$

$$R_{eT} = \frac{463,41 \cdot 0.006}{193 \cdot 10^{-7}} = 144065.28 ;$$

зовнішній діаметр навивки

$$D_H = D_C + 2Z \delta_1 d_H + 2(d_H + 2d_{PP} - \delta_1 d_H) ;$$

$$D_H = 0.2976 + 2 \cdot 16 \cdot 1.106 \cdot 0.008 + 2(0.008 + 2 \cdot 0.0015 - 1.106 \cdot 0.008) = 0.585 \text{ м} ;$$

критерій Нуссельта

$$N_{uT} = 0.023 R_{eT}^{0.8} \cdot P_{rT}^{0.4} ; \quad (2.226)$$

$$N_{uT} = 0.023 \cdot 144065.28^{0.8} \cdot 0.733^{0.4} = 272.03$$

поправка на кривизну труб

$$\varepsilon_R = 1 + 7.08 \frac{d_{BH}^T}{D_H + D_C} ; \quad (2.227)$$

$$\varepsilon_R = 1 + 7.08 \frac{0.006}{0.585 + 0.2976} = 1.048 ;$$

коефіцієнт тепловіддачі від трубного потоку

$$\alpha_T = \varepsilon_R N_{uT} \frac{\lambda_T}{d_{BH}^T} \cdot 10^3 ; \quad (2.228)$$

$$\alpha_T = 1.048 \cdot 272.03 \frac{0,0294 \cdot 10^{-3}}{0.006} \cdot 10^3 = 1396.9 \text{ Вт/м}^2\text{К} ;$$

										Лист
										59
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	КРБ.КТ.1.490-03.2.15					

2.6.2.2. Визначення коефіцієнта тепловіддачі від зворотного потоку до стінки трубки

Середня температура потоку

$$T_{CP}^0 = \frac{T_{19} + T_{20}}{2} ; \quad (2.229)$$

$$T_{CP}^0 = \frac{269 + 303}{2} = 286 \text{ К}$$

Теплофізичні властивості кисню при тиску 16,487 МПа і температурі 286 К:

питома теплоємність $C_{p0} = 1.243 \frac{\text{Кдж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;
динамічна в'язкість $\eta_0 = 255 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{с}$;
теплопровідність $\lambda_0 = 0,0352 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$;
густина $\rho_0 = 234,4 \text{ кг/м}^3$.

Живий переріз трубного простору

$$f_0 = \frac{\pi}{4} (d_{BH}^0)^2 \cdot n_0 ; \quad (2.230)$$

$$f_0 = \frac{3.14}{4} 0.005^2 \cdot 7 = 1,372 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 ;$$

масова швидкість трубного потоку

$$W_0 = \frac{\nu_{0 \cdot B} \cdot \mu_0}{3600 \cdot 24 \cdot f_0} , \quad (2.231)$$

де μ_0 - молярна маса кисню ; $\mu_0 = 32 \text{ г/моль}$;

$$W_0 = \frac{0,194 \cdot 1440 \cdot 32}{3600 \cdot 24 \cdot 1,372 \cdot 10^{-4}} = 754,13 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} ;$$

критерій Прандтля

$$Pr_0 = \frac{C_{p0} \cdot \eta_0}{\lambda_0} ; \quad (2.232)$$

$$Pr_0 = \frac{1.243 \cdot 255 \cdot 10^{-7}}{0.0352 \cdot 10^{-3}} = 0.9005 ;$$

критерій Рейнольдса

$$Re_0 = \frac{W_0 \cdot d_{BH}^0}{\eta_0} ; \quad (2.233)$$

$$Re_0 = \frac{754,13 \cdot 0.005}{255 \cdot 10^{-7}} = 147868,63 ;$$

критерій Нуссельта

$$Nu_{u0} = 0.023 Re_0^{0.8} \cdot Pr_0^{0.4} ; \quad (2.234)$$

$$Nu_{u0} = 0.023 \cdot 147868,63^{0.8} \cdot 0.9005^{0.4} = 301,59$$

поправка на кривизну труб

$$\varepsilon_R = 1 + 7.08 \frac{d_{BH}^0}{D_H + D_C} ; \quad (2.235)$$

$$\varepsilon_R = 1 + 7.08 \frac{0.005}{0.585 + 0.2976} = 1.048 ;$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						60
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

коефіцієнт тепловіддачі від зворотного потоку

$$\alpha_0 = \varepsilon_R N_{u0} \frac{\lambda_0}{d_{BH}^0} \cdot 10^3 ; \quad (2.236)$$

$$\alpha_0 = 1.048 \cdot 301,59 \frac{0,0352 \cdot 10^{-3}}{0,005} \cdot 10^3 = 2225,1 \text{ Вт/м}^2\text{К} ;$$

2.6.2.3. Визначення коефіцієнта тепловіддачі від стінки трубки до міжтрубного потоку.

Середня температура потоку

$$T_{CP}^M = \frac{T_{24} + T_{25}}{2} ; \quad (2.237)$$

$$T_{CP}^M = \frac{268 + 301,3}{2} = 284,65 \text{ К}$$

Теплофізичні властивості азоту при тиску 0,125 МПа та температурі 284,65 К:

питома теплоємність $C_{PM} = 1,043 \frac{\text{КДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} ;$

динамічна в'язкість $\eta_M = 173 \cdot 10^{-7} \text{ Па} \cdot \text{с} ;$

теплопровідність $\lambda_M = 0,0249 \text{ Вт/м} \cdot \text{К} ;$

густина $\rho_M = 1,628 \text{ кг/м}^3 .$

Живий перетин міжтрубного простору

$$f_M = \frac{\pi}{4} (D_H^2 - D_C^2) \cdot \varepsilon_M , \quad (2.238)$$

де ε_M – частка вільного обсягу ;

$$\varepsilon_M = 1 - \frac{\pi \cdot (d_H^2 + d_{PP}^2) \cdot l_{PP}}{4 \delta_1 \delta_2 d_H^2} , \quad (2.239)$$

де l_{PP} – довжина дроту на 1 метр труби ;

$$l_{PP} = \sqrt{(\pi(d_H + d_{PP}))^2 + r_{OP}^2} \frac{1}{r_{OP}} ; \quad (2.240)$$

$$l_{PP} = \sqrt{(3,14(0,008 + 0,0015))^2 + 0,005^2} \frac{1}{0,005} = 6,05 \text{ м} ;$$

$$\varepsilon_M = 1 - \frac{3,14 \cdot (0,008^2 + 0,0015^2) \cdot 6,05}{4 \cdot 1,106 \cdot 1,263 \cdot 0,008^2} = 0,3185$$

$$f_M = \frac{3,14}{4} (0,585^2 - 0,2976^2) \cdot 0,3185 = 0,06342 \text{ м}^2 ;$$

масова швидкість потоку в міжтрубному просторі

$$W_M = \frac{\nu_M \cdot V \cdot \mu_M}{3600 \cdot 24 \cdot f_M} , \quad (2.241)$$

де μ_M - молярна маса азоту ; $\mu_M = 28 \text{ г/моль} ;$

$$W_M = \frac{0,806 \cdot 1440 \cdot 28}{3600 \cdot 24 \cdot 0,06342} = 5,931 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с} ;$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						61
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

критерій Прандтля

$$Pr_M = \frac{C_{PM} \cdot \eta_M}{\lambda_M}; \quad (2.242)$$

$$Pr_M = \frac{1.043 \cdot 173 \cdot 10^{-7}}{0.0249 \cdot 10^{-3}} = 0.725;$$

критерій Рейнольдса

$$Re_M = \frac{W_M \cdot d_{\text{э}}}{\eta_M}, \quad (2.243)$$

де d_e – еквівалентний діаметр;

$$d_{\text{э}} = \frac{4 \cdot d_H^2 \cdot \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \varepsilon_M}{\pi(d_H + d_{\text{ПП}} \cdot l_{\text{ПП}})}; \quad (2.244)$$

$$d_{\text{э}} = \frac{4 \cdot 0,008^2 \cdot 1,106 \cdot 1,263 \cdot 0,3185}{3,14(0,008 + 0,0015 \cdot 6,05)} = 2,125 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$Re_M = \frac{5,931 \cdot 2,125 \cdot 10^{-3}}{173 \cdot 10^{-7}} = 728,52 ;$$

коефіцієнта тепловіддачі до міжтрубного потоку

$$\alpha_M = 168 \cdot Re_M^{-0,3} \cdot W_M \cdot C_{PM} \cdot Pr_M^{-2/3} \cdot A_r, \quad (2.245)$$

де A_r – коефіцієнт оребрення;

$$A_r = \frac{d_H + d_{\text{ПП}} \cdot l_{\text{ПП}}}{d_H}; \quad (2.246)$$

$$A_r = \frac{0,008 + 0,0015 \cdot 6,05}{0,008} = 2,134$$

$$\alpha_M = 168 \cdot 728,52^{-0,3} \cdot 5,931 \cdot 1.043 \cdot 0.725^{-2/3} \cdot 2,134 = 380,85 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

2.6.2.4 Визначення коефіцієнтів теплопередачі.

Коефіцієнт теплопередачі від трубного потоку до міжтрубного

$$K_{TM} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_T} \cdot \frac{d_H}{d_{BH}^T} + \frac{1}{\alpha_M}}; \quad (2.247)$$

$$K_{TM} = \frac{1}{\frac{1}{1396,9} \cdot \frac{0,008}{0,006} + \frac{1}{380,85}} = 279,33 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

коефіцієнт теплопередачі від міжтрубного потоку до зворотного

$$K_{MO} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_O} \cdot \frac{d_H}{d_{BH}^O} + \frac{1}{\alpha_M}}; \quad (2.248)$$

$$K_{MO} = \frac{1}{\frac{1}{2225,1} \cdot \frac{0,008}{0,005} + \frac{1}{380,85}} = 308,03 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$$

2.6.2.5 Розрахунок поверхні теплообміну

Розрахунок ведеться за елементарними перерізами.

З технологічного розрахунку питоме теплове навантаження теплообмінника-зріджувача $q = 1041.4$ кДж/кмоль; для кожного елементарного перерізу $q_i = 104.14 \cdot (1 \dots 10)$ кДж/кмоль; розрахунок ведеться від холодного кінця до теплого.

З енергетичного балансу теплообмінника-зріджувача

$$I_T^i = I_2 - q_{\text{зр}}^i + q_i \quad (2.249)$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		62

$$\begin{aligned}
I_T^1 &= 7720,1 - 0,5 + 104,14 = 7823,74 \text{ кДж/кмоль}; \\
I_T^2 &= 7720,1 - 1 + 208,28 = 7927,38 \text{ кДж/кмоль}; \\
I_T^3 &= 7720,1 - 1,5 + 312,42 = 8031,02 \text{ кДж/кмоль}; \\
I_T^4 &= 7720,1 - 2 + 416,56 = 8134,66 \text{ кДж/кмоль}; \\
I_T^5 &= 7720,1 - 2,5 + 520,7 = 8238,3 \text{ кДж/кмоль}; \\
I_T^6 &= 7720,1 - 3 + 624,84 = 8341,94 \text{ кДж/кмоль}; \\
I_T^7 &= 7720,1 - 3,5 + 728,98 = 8445,58 \text{ кДж/кмоль}; \\
I_T^8 &= 7720,1 - 4 + 833,12 = 8549,22 \text{ кДж/кмоль}; \\
I_T^9 &= 7720,1 - 4,5 + 937,26 = 8652,86 \text{ кДж/кмоль}; \\
I_T^{10} &= 7720,1 - 5 + 1041,4 = 8756,5 \text{ кДж/кмоль};
\end{aligned}$$

Для кожного елементарного перерізу по ентальпії та тиску визначається температура.

Задаючись зміною ентальпії трубного потоку на ΔI_T , визначається зміна ентальпії зворотного потоку:

$$\Delta I_O = \frac{v_T}{v_O} \cdot \Delta I_T \cdot \frac{K_{MO}}{K_{TM}} \cdot \frac{n_O}{n_T} \cdot \frac{\Delta T_{MO}^{XK}}{\Delta T_{TM}^{XK}}, \quad (2.250)$$

$$\Delta I_O^1 = \frac{1}{0.194} \cdot 103,64 \cdot \frac{308,03}{279,33} \cdot \frac{7}{37} \cdot \frac{-1}{13} = -8,57 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_O^2 = \frac{1}{0.194} \cdot 103,64 \cdot \frac{308,03}{279,33} \cdot \frac{7}{37} \cdot \frac{4,1}{11,32} = 40,37 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_O^3 = \frac{1}{0.194} \cdot 103,64 \cdot \frac{308,03}{279,33} \cdot \frac{7}{37} \cdot \frac{7,16}{10,4} = 76,73 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_O^4 = \frac{1}{0.194} \cdot 103,64 \cdot \frac{308,03}{279,33} \cdot \frac{7}{37} \cdot \frac{9,07}{9,85} = 102,62 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_O^5 = \frac{1}{0.194} \cdot 103,64 \cdot \frac{308,03}{279,33} \cdot \frac{7}{37} \cdot \frac{9,93}{9,72} = 113,86 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_O^6 = \frac{1}{0.194} \cdot 103,64 \cdot \frac{308,03}{279,33} \cdot \frac{7}{37} \cdot \frac{10,81}{9,26} = 119,75 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_O^7 = \frac{1}{0.194} \cdot 103,64 \cdot \frac{308,03}{279,33} \cdot \frac{7}{37} \cdot \frac{11,27}{9,06} = 138,64 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_O^8 = \frac{1}{0.194} \cdot 103,64 \cdot \frac{308,03}{279,33} \cdot \frac{7}{37} \cdot \frac{11,07}{9,12} = 135,28 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_O^9 = \frac{1}{0.194} \cdot 103,64 \cdot \frac{308,03}{279,33} \cdot \frac{7}{37} \cdot \frac{10,95}{8,95} = 136,36 \text{ кДж/кмоль};$$

$$\Delta I_O^{10} = \frac{1}{0.194} \cdot 103,64 \cdot \frac{308,03}{279,33} \cdot \frac{7}{37} \cdot \frac{10,76}{8,99} = 133,39 \text{ кДж/кмоль};$$

Для кожного елементарного перерізу по ентальпії та тиску визначається температура.

Для міжтрубного потоку, визначаючи суму різниць ентальпій перерізів, визначається різниця ентальпій перерізів, і для кожного елементарного перерізу по ентальпії та тиску визначається температура.

$$\Sigma \Delta I_M = \frac{v_T}{v_M} \cdot \Sigma \Delta I_T - \frac{v_O}{v_M} \cdot \Sigma \Delta I_O + q_{OC}^i, \quad (2.251)$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						63
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\begin{aligned} \Sigma \Delta I_M^1 &= \frac{1}{0,806} \cdot 103,64 - \frac{0,194}{0,806} \cdot (-8,57) + 0,5 = 131,15 \text{ кДж/кмоль}; \\ \Sigma \Delta I_M^2 &= \frac{1}{0,806} \cdot 207,28 - \frac{0,194}{0,806} \cdot 31,8 + 1 = 248,52 \text{ кДж/кмоль}; \\ \Sigma \Delta I_M^3 &= \frac{1}{0,806} \cdot 310,92 - \frac{0,194}{0,806} \cdot 108,53 + 1,5 = 358,14 \text{ кДж/кмоль}; \\ \Sigma \Delta I_M^4 &= \frac{1}{0,806} \cdot 414,56 - \frac{0,194}{0,806} \cdot 211,15 + 2 = 455,52 \text{ кДж/кмоль}; \\ \Sigma \Delta I_M^5 &= \frac{1}{0,806} \cdot 518,2 - \frac{0,194}{0,806} \cdot 325,01 + 2,5 = 562,2 \text{ кДж/кмоль}; \\ \Sigma \Delta I_M^6 &= \frac{1}{0,806} \cdot 621,84 - \frac{0,194}{0,806} \cdot 444,76 + 3 = 661,46 \text{ кДж/кмоль}; \\ \Sigma \Delta I_M^7 &= \frac{1}{0,806} \cdot 725,48 - \frac{0,194}{0,806} \cdot 583,4 + 3,5 = 756,18 \text{ кДж/кмоль}; \\ \Sigma \Delta I_M^8 &= \frac{1}{0,806} \cdot 829,12 - \frac{0,194}{0,806} \cdot 718,68 + 4 = 851,7 \text{ кДж/кмоль}; \\ \Sigma \Delta I_M^9 &= \frac{1}{0,806} \cdot 932,76 - \frac{0,194}{0,806} \cdot 855,04 + 4,5 = 946,97 \text{ кДж/кмоль}; \\ \Sigma \Delta I_M^{10} &= \frac{1}{0,806} \cdot 1036,4 - \frac{0,194}{0,806} \cdot 988,43 + 5 = 1042,95 \text{ кДж/кмоль}; \end{aligned}$$

Поверхня елементарних перерізів трубного потоку

$$F_T = \frac{10^3}{K_{TM} \cdot \Delta T_{TM}^{XK}} \cdot v_T \cdot \Delta I_T \frac{B}{3600 \cdot 24}; \quad (2.252)$$

$$F_T^1 = \frac{10^3}{279,33 \cdot 13} \cdot 1 \cdot 103,64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,684 \text{ м}^2;$$

$$F_T^2 = \frac{10^3}{279,33 \cdot 11,32} \cdot 1 \cdot 103,64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,785 \text{ м}^2;$$

$$F_T^3 = \frac{10^3}{279,33 \cdot 10,4} \cdot 1 \cdot 103,64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,855 \text{ м}^2;$$

$$F_T^4 = \frac{10^3}{279,33 \cdot 9,85} \cdot 1 \cdot 103,64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,903 \text{ м}^2;$$

$$F_T^5 = \frac{10^3}{279,33 \cdot 9,72} \cdot 1 \cdot 103,64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,915 \text{ м}^2;$$

$$F_T^6 = \frac{10^3}{279,33 \cdot 9,26} \cdot 1 \cdot 103,64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,96 \text{ м}^2;$$

$$F_T^7 = \frac{10^3}{279,33 \cdot 9,06} \cdot 1 \cdot 103,64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,981 \text{ м}^2;$$

$$F_T^8 = \frac{10^3}{279,33 \cdot 9,12} \cdot 1 \cdot 103,64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,975 \text{ м}^2;$$

$$F_T^9 = \frac{10^3}{279,33 \cdot 8,95} \cdot 1 \cdot 103,64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,993 \text{ м}^2;$$

$$F_T^{10} = \frac{10^3}{279,33 \cdot 8,99} \cdot 1 \cdot 103,64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,989 \text{ м}^2;$$

Поверхня елементарних перерізів зворотного потоку

$$F_O = \frac{10^3}{K_{MO} \cdot \Delta T_{MO}^{XK}} \cdot v_O \cdot \Delta I_O \frac{B}{3600 \cdot 24}; \quad (2.253)$$

$$F_O^1 = \frac{10^3}{308,03 \cdot (-1)} \cdot 0,194 \cdot (-8,57) \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0,129 \text{ м}^2;$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						64
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$F_o^2 = \frac{10^3}{308.03 \cdot 4.1} \cdot 0.194 \cdot 40.37 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0.149 \text{ м}^2;$$

$$F_o^3 = \frac{10^3}{308.03 \cdot 7.16} \cdot 0.194 \cdot 76.63 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0.162 \text{ м}^2;$$

$$F_o^4 = \frac{10^3}{308.03 \cdot 9.07} \cdot 0.194 \cdot 102.62 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0.171 \text{ м}^2;$$

$$F_o^5 = \frac{10^3}{308.03 \cdot 9.93} \cdot 0.194 \cdot 113.86 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0.173 \text{ м}^2;$$

$$F_o^6 = \frac{10^3}{308.03 \cdot 10.81} \cdot 0.194 \cdot 119.75 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0.167 \text{ м}^2;$$

$$F_o^7 = \frac{10^3}{308.03 \cdot 11.27} \cdot 0.194 \cdot 138.64 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0.186 \text{ м}^2;$$

$$F_o^8 = \frac{10^3}{308.03 \cdot 11.07} \cdot 0.194 \cdot 135.28 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0.185 \text{ м}^2;$$

$$F_o^9 = \frac{10^3}{308.03 \cdot 10.95} \cdot 0.194 \cdot 136.36 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0.188 \text{ м}^2;$$

$$F_o^{10} = \frac{10^3}{308.03 \cdot 10.76} \cdot 0.194 \cdot 133.39 \frac{2071}{3600 \cdot 24} = 0.187 \text{ м}^2;$$

Результати обчислень заносяться до таблиці.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						65
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Парам. № пер.	Трубний потік				Зворотний потік				Міжтрубний потік				Температурний напор		Поверхня теплообміну	
	$I_T, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$	$\Delta I_T, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$	$\frac{\Sigma \Delta I_T, \text{кДж}}{\text{кмоль}}$	$T_T, \text{К}$	$I_O, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$	$\Delta I_O, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$	$\frac{\Sigma \Delta I_O, \text{кДж}}{\text{кмоль}}$	$T_O, \text{К}$	$I_M, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$	$\Delta I_M, \frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}}$	$\frac{\Sigma \Delta I_M, \text{кДж}}{\text{кмоль}}$	$T_M, \text{К}$	$\Delta T_{TM}, \text{К}$	$\Delta T_{MO}, \text{К}$	$F_T, \text{М}^2$	$F_O, \text{М}^2$
0	7720,1	-	-	281	6343,2	-	-	269	7806,3	-	-	268	13	-1	-	-
1	7823,74	103,64	103,64	284,2	6334,63	-8,57	268,78	7937,45	131,15	131,15	272,88	11,32	4,1	0,684	0,129	
2	7927,38	103,64	207,28	287,3	6375	40,37	269,74	8054,82	117,37	248,52	276,9	10,4	7,16	0,785	0,149	
3	8031,02	103,64	310,92	290,5	6451,73	76,73	271,58	8164,44	109,62	358,14	280,65	9,85	9,07	0,855	0,162	
4	8134,66	103,64	414,56	293,7	6554,35	102,62	274,05	8261,82	97,38	455,52	283,98	9,72	9,93	0,903	0,171	
5	8238,3	103,64	518,2	296,9	6668,21	113,86	276,83	8368,5	106,68	562,2	287,64	9,26	10,81	0,915	0,173	
6	8341,94	103,64	621,84	300,1	6787,96	119,75	279,77	8467,76	99,26	661,46	291,04	9,06	11,27	0,96	0,167	
7	8445,58	103,64	725,48	303,4	6926,6	138,64	283,21	8562,48	94,72	756,18	294,28	9,12	11,07	0,981	0,186	
8	8549,22	103,64	829,12	306,5	7061,88	135,28	286,6	8658	95,52	851,7	297,55	8,95	10,95	0,975	0,185	
9	8652,86	103,64	932,76	309,8	7198,24	136,36	290,05	8753,27	95,27	946,97	300,81	8,99	10,76	0,993	0,188	
10	8756,5	103,64	1036,4	313	7331,63	133,39	293,46	8849,25	95,98	1042,95	304,1	8,9	10,64	0,989	0,187	

2.6.3. Гідралічний розрахунок.

Опір по трубному потоку

$$\Delta P_T = \lambda_T \frac{W_T \cdot l}{2 \cdot d_{BH}^5 \cdot \rho_T}; \quad (2.254)$$

$$\lambda_T = \frac{0.3164}{Re_T^{0.25}}; \quad (2.255)$$

$$\lambda_T = \frac{0.3164}{144065.28^{0.25}} = 0.0162;$$

$$\Delta P_T = 0.0162 \frac{463,41 \cdot 49,5}{2 \cdot 0,006 \cdot 71,753} = 431.58 \text{ Па} = 0,43 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} .$$

Опір зворотного потоку

$$\Delta P_O = \lambda_O \frac{W_O \cdot l}{2 \cdot d_{BH}^5 \cdot \rho_O}; \quad (2.256)$$

$$\lambda_O = \frac{0.3164}{Re_O^{0.25}};$$

$$\lambda_O = \frac{0.3164}{147868,63^{0.25}} = 0.0161;$$

$$\Delta P_T = 0.0161 \frac{754,13 \cdot 49,5}{2 \cdot 0,005 \cdot 234,4} = 256.4 \text{ Па} = 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ МПа} .$$

Опір міжтрубного потоку

$$\Delta P_M = 2.65 \cdot Re_M^{-0.3} \frac{W_M^2}{2 \cdot f_M \cdot \rho_M} \cdot (F_T + F_O) \cdot A_r; \quad (2.257)$$

$$\Delta P_M = 2.65 \cdot 728,52^{-0.3} \frac{5,931^2}{2 \cdot 0,06342 \cdot 1,628} \cdot 10,74 \cdot 2,134 = 1432,9 \text{ Па} = 1,43 \cdot 10^{-3} \text{ МПа};$$

2.6.4. Розрахунок днища на міцність

Матеріал днища Ст 6;

Внутрішній діаметр $D_B = 0.6 \text{ м}$;

$$h_B = 0.25 D_B; \quad (2.258)$$

$$h_B = 0.25 \cdot 0.6 = 0.15$$

Діаметр отвору для повітря $d = 0.21 \text{ м}$.

Коефіцієнт ослаблення днища отвором

$$\varphi_o = \frac{D_B - d}{D_B}; \quad (2.259)$$

$$\varphi_o = \frac{0.6 - 0.21}{0.6} = 0.65 .$$

Визначення відношення визначального параметра $\frac{\sigma_e}{P}$ з урахуванням коефіцієнта φ_o

$$\frac{\sigma_e}{P} \cdot \varphi_o = \frac{195}{6,1} \cdot 0,65 = 20,78 > 20 , \text{ де}$$

σ_e – допустима напруга на розтяг для матеріалу днища

$\sigma_e = 195 \text{ МПа} .$

Мінімальна розрахункова товщина стінки днища

$$S' = \frac{D_B \cdot P}{2 \cdot \sigma_e \cdot \varphi_o}; \quad (2.260)$$

$$S' = \frac{0.6 \cdot 6.1}{2 \cdot 195 \cdot 0.65} = 0.0144 \text{ м} = 14,4 \text{ мм} .$$

Додаткове збільшення на визначення товщини стінки $C_M = 1.6 \text{ мм}$; товщина стінки з урахуванням збільшення $S = 16 \text{ мм}$.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						67
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

2.7. Розрахунок турбодетандера

2.7.1 Опис конструкції турбодетандеру.

Турбодетандерний агрегат складається з одноступеневого турбодетандера в теплоізоляційному кожусі та агрегату мастила, що забезпечує постачання машини оливою.

Турбодетандер включає в себе: корпус, напрямний апарат, вузол ущільнень, вузол підшипників та гальмо.

Енергія, що розвивається турбодетандером, переходить у тепло тертя в підшипниках і в циліндричному масляному гальмі. Це тепло передається оливі і потім відводиться з водою в маслоохолоджувачі. Гальмо розташоване всередньоїчастини міжопорами.

При роботі турбодетандера в номінальному розрахунковому режимі олива в гальмівну втулку не подається, механічна енергія витрачається лише на тертя у підшипниках.

При роботі турбодетандера у форсованих режимах (пусковий або рідинний режими установки) додаткова потужність знімається в масляному гальмі. Потужність, що витрачається на нагрівання оливи в гальмі і, відповідно, кількість оборотів ротора регулюються кількістю оливи, що подається в гальмо. Напрямний апарат, ротор, вузол ущільнення та підшипники змонтовані у стійці, яка приєднана до корпусу машини через текстолітову проставку та проміжну втулку із фланцем. Корпус турбодетандера через фланець проміжної втулки герметично прикріплений до теплоізоляційного кожуха.

Робоче колесо напіввідкрите, радіально-осьового типу, закріплене на консолі валу.

Напрямний апарат має крилоподібні лопатки, що утворюють сопла прямокутного перерізу, що звужуються.

Покривна щока направляючого апарату має форму зовнішнього обведення лопаток робочого колеса і замикає з невеликим зазором канали робочого колеса. Підшипники турбодетандера виконані з антифрикційної бронзи і мають роздільну подачу олії до радіальних та торцевих поверхонь.

Внутрішня порожнина турбодетандера у місці виходу валу ущільнена трьома «плаваючими» графітовими кільцями. Щоб масло не потрапляло на графітові кільця, з боку підшипників на валу розташована латунна олійна втулка.

Газ, що пройшов через графітові ущільнення, може бути відведений в атмосферу через всмокувальну лінію.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						68
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Постачання турбодетандера оливою здійснюється агрегатом, розташованим окремо від турбодетандера. Олива з маслобака через приймальний фільтр засмоктується занурювальним шестеренним насосом і, пройшовши фільтр тонкого очищення, надходить у кожухотрубний водяний охолоджувач.

Охолоджена олива через розподільний колектор подається до підшипників та масляного гальма. Регулювання тиску олії перед колектором здійснюється скидним клапаном. Гаряча олива з машини самопливом зливається в маслобак.

Для запобігання аварії у разі неприпустимого падіння тиску оливи в маслосистемі турбодетандер забезпечений відсічним клапаном, встановленим на лінії подачі повітря в турбодетандер.

2.7.2. Термогазодинамічний розрахунок

2.7.2.1 Вихідні дані:

Початковий тиск газу перед турбодетандером

$$P_H = 6,0 \text{ МПа}$$

Початкова температура

$$T_H = 185 \text{ К}$$

Кінцева температура

$$T_K = 108 \text{ К}$$

Тиск газу після турбодетандера

$$P_K = 0,66$$

Масова витрата газу G

$$G = 0,425 \frac{\text{кг}}{\text{МПа}}$$

Робоча середня повітря

На підставі даних технічного завдання для виконання розрахунків вибираються конструктивні характеристики турбодетандера.

Тип робочого колеса (РК): радіально-осьове, напіввідкрите, одностороннє.

Тип направляючого апарату (НА): сопловий

Кут нахилу середньої лінії сопів у напрямному апараті $\alpha_c \cong 51^\circ$.

Кут нахилу лопатки на вході до робочого колеса $\beta_1 = 90^\circ$.

Кут нахилу лопатки на виході з робочого колеса $\beta_2 = 35^\circ$.

Коефіцієнт радіальності (наведений діаметр) - відношення середнього діаметра виходу потоку з РК до зовнішнього діаметра колеса .

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						69
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Втулке відношення (відношення діаметрів втулки та лійки) $\xi_{em} = 0,5$

Конфузорність потоку у вхідному пристрої (відношення швидкості на вході в НА до швидкості на вході в пристрій) приймається

$$k_H = 1, \text{ т.е. } P_0 = P_H, T_0 = T_H.$$

Параметри газу на вході до НА (ентальпія i_0 ентропія S_0 ; показник адіабати k — визначаються за значеннями P_0 і T_0 .

$$i_0 = 146,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; S_0 = 4,212 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; k = 1,93.$$

По значенням P_K і S_0 визначаються ентальпія газу при ізоентропному розширенні в ТД, $i_{KS} = 78,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$.

Ізоентропний перепад ентальпій у ТД

$$h_s = i_0 - i_{KS} = 146,9 - 78,8 = 67,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad (2.261)$$

Умовна швидкість ізоентропного закінчення, відповідна ізоентропному перепаду ентальпій у ТД

$$c_s = \sqrt{2000 \cdot h_s} = \sqrt{2000 \cdot 67,1} = 366,33 \text{ м/с} . \quad (2.262)$$

Окружна швидкість на вході до РК

$$u_1 = x_s \cdot c_s, \quad (2.263)$$

де x_s - безрозмірна окружна швидкість, відповідна максимуму ізоентропного ККД;

$$u_1 = 0,67 \cdot 366,33 = 245,44 \text{ м/с} .$$

Абсолютна швидкість закінчення газу з НА

$$c_1 = \frac{u_1 \cdot \sin \beta_1}{\sin(\beta_1 - \alpha_1)}, \quad (2.264)$$

де α_1 - кут потоку при виході з НА, град (п.2.11);

$$c_1 = \frac{245,44 \cdot \sin 90^\circ}{\sin(90^\circ - 15,4^\circ)} = 254,6 \text{ м/с} .$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						70
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Ентальпія газу на виході з НА

$$i_1 = i_0 - \frac{c_1^2}{2000} = 146,9 - \frac{254,6^2}{2000} = 114,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ; \quad (2.265)$$

Ентальпія газу при ізоентропному розширенні в НА

$$i_{1s} = i_0 - \frac{i_0 - i_1}{\varphi^2} , \quad (2.266)$$

де $\varphi = \frac{c_1}{c_{1s}}$ - швидкісний коефіцієнт сопла;

$$i_{1s} = 146,9 - \frac{146,9 - 114,5}{0,95^2} = 111 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} .$$

Тиск газу на виході з прямого апарату P_1 визначається по значенням

$i_{1s} \quad P_1 S_0 = 2,4 \text{ МПа}$ Інші параметри газу на виході визначаються за

значеннями P_1 і i_1 : $T_1 = 141 \text{ К}$; $S_1 = 4,23 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$;

$$\rho_1 = 74,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} .$$

Швидкість звуку

$$a_1 = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^6 \cdot k \cdot P_1}{\rho_1}} , \quad (2.267)$$

де k – показник адіабати, що відповідає P_1 параметрам і T_1 ;

$$a_1 = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^6 \cdot 1,88 \cdot 2,4}{74,5}} = 246,1 \text{ м/с} .$$

Число Маха по абсолютній швидкості при виході з НА

$$M_{c1} = \frac{c_1}{a_1} = \frac{254,6}{246,1} = 1,03 ; \quad (2.268)$$

При $c_1 >$ режим течії надкритичний, і необхідно визначити наступні параметри газу у вузькому перерізі сопла при течії з тертям:

показник політропи розширення

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						71
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$m = \frac{k}{k - \varphi^2(k-1)} = \frac{1,88}{1,88 - 0,95^2(1,88-1)} = 1,73 ; \quad (2.269)$$

ТИСК

$$P^* = P_0 \left(\frac{2}{m+1} \right)^{\frac{m}{m-1}} = 6 \left(\frac{2}{1,73+1} \right)^{\frac{1,73}{1,73-1}} = 2,87 \text{ МПа} ; \quad (2.270)$$

ентальпія при ізоентропному розширенні визначається за значеннями

$$P^* \text{ и } S_0 ; i_s^* = 118,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ;$$

ентальпія при течії з тертям

$$i^* = i_0 - (i_0 - i_s^*) \varphi^2 = 146,9 - (146,9 - 118,6) 0,95^2 = 121,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ; \quad (2.271)$$

Густина та температура визначаються за значеннями P^* і i^*

$$\rho^* = 83,78 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} ; T^* = 149,4 \text{ К} ;$$

абсолютна швидкість

$$c^* = \sqrt{2000(i_0 - i^*)} = \sqrt{2000(146,9 - 121,4)} = 225,7 \frac{\text{м}}{\text{с}} . \quad (2.272)$$

Площа прохідного перерізу НА

$$f_c = \frac{G}{c^* \cdot \rho^*} = \frac{0,425}{225,7 \cdot 83,78} = 2,25 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2 . \quad (2.273)$$

Кут потоку при виході з НА

$$\alpha_1 = \arcsin \frac{c^* \rho^* \sin \alpha_c}{c_1 \rho_1} = \arcsin \frac{225,7 \cdot 83,78 \cdot 0,2588}{254,6 \cdot 74,5} = 15^\circ . \quad (2.274)$$

Зовнішній діаметр колеса

$$d_1 = \left(\frac{G}{\pi \cdot \bar{b}_1 \cdot \tau_1 \cdot \rho_1 \cdot c_1 \cdot \sin \alpha_1} \right)^{0,5} , \quad (2.275)$$

де \bar{b}_1 - відносна ширина РК на вході;

τ_1 - коефіцієнт стиснення на вході в РК, що враховує зменшення прохідного перерізу через наявність лопаток при вході в колесо;

$$d_1 = \left(\frac{0,425}{3,14 \cdot 0,04 \cdot 0,85 \cdot 74,5 \cdot 254,6 \cdot 0,2588} \right)^{0,5} = 0,029 \text{ м} .$$

									Лист
									72
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	КРБ.КТ.1.490-03.2.15				

Ширина РК на вході

$$b_1 = \bar{b}_1 \cdot d_1 = 0,04 \cdot 0,029 = 0,0012 \text{ м} . \quad (2.276)$$

Окружна швидкість на виході з РК

$$u_2 = \mu \cdot u_1 = 0,4 \cdot 245,44 = 98,18 \text{ м/с} . \quad (2.277)$$

Швидкість потоку при вході в РК у відносному русі

$$w_1 = \frac{u_1 \cdot \sin \alpha_1}{\sin(\beta_1 - \alpha_1)} = \frac{245,44 \cdot 0,258}{0,9659} = 65,66 \text{ м/с} . \quad (2.278)$$

Ентальпія потоку на виході з РК при ізоентропному розширенні визначається за

$$\text{значеннями } P_K \text{ і } S_1 ; i_{2s} = 80,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} .$$

Ступінь реактивності

$$\rho_T = \frac{i_1 - i_{2s}}{h_s} = \frac{114,5 - 80,6}{67,1} = 0,51 . \quad (2.279)$$

Швидкість потоку при виході з РК у відносному русі

$$w_2 = \psi \cdot \sqrt{2000 \cdot (i_1 - i_{2s}) + w_1^2 - u_1^2 + u_2^2} , \quad (2.280)$$

де ψ - коефіцієнт відносної швидкості РК, що враховує відхилення дійсного процесу від ідеального;

$$w_2 = 0,83 \cdot \sqrt{2000 \cdot (114,5 - 80,6) + 65,66^2 - 245,44^2 + 98,18^2} = 122,6 \frac{\text{м}}{\text{с}} .$$

Швидкість потоку при виході з РК в абсолютному русі

$$c_2 = \sqrt{w_2^2 + u_2^2 - 2 \cdot u_2 \cdot w_2 \cdot \cos \beta_2} \quad (2.281)$$

$$c_2 = \sqrt{122,6^2 + 98,18^2 - 2 \cdot 98,18 \cdot 122,6 \cdot 0,8192} = 70,35 \frac{\text{м}}{\text{с}} .$$

Кут виходу потоку з РК в абсолютному русі

$$\alpha_2 = \arccos \frac{w_2^2 - u_2^2 - c_2^2}{2c_2u_2} = \arccos \frac{122,6^2 - 98,18^2 - 70,35^2}{2 \cdot 70,35 \cdot 98,18} = 88,2^\circ , \quad (2.282)$$

приймається $\alpha_2 = 90^\circ$ /6/.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		73

Втрати холоду в НА:
абсолютне значення

$$\Delta h_{HA} = i_{2S} - i_{KS} = 80,6 - 78,8 = 1,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ; \quad (2.283)$$

відносне значення

$$\zeta_{HA} = \frac{\Delta h_{HA}}{h_S} = \frac{1,8}{67,1} = 0,027 . \quad (2.284)$$

Втрати енергії під час руху потоку в каналах РК:

абсолютне значення

$$\Delta h_K = \frac{w_2^2 \cdot \left(\frac{1}{\psi^2} - 1\right)}{2000} = \frac{122,6^2 \cdot \left(\frac{1}{0,83^2} - 1\right)}{2000} = 3,39 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ; \quad (2.285)$$

відносне значення

$$\zeta_K = \frac{\Delta h_K}{h_S} = \frac{3,39}{67,1} = 0,05 . \quad (2.286)$$

Втрати енергії з вихідною швидкістю потоку:

абсолютне значення

$$\Delta h_{BC} = \frac{c_2^2}{2000} = \frac{70,35^2}{2000} = 2,47 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ; \quad (2.287)$$

відносне значення

$$\zeta_{BC} = \frac{\Delta h_{BC}}{h_S} = \frac{2,47}{67,1} = 0,037 . \quad (2.288)$$

Гідравлічний ККД

$$\eta_{\Gamma} = 1 - \zeta_{HA} - \zeta_{BC} - \zeta_K = 1 - 0,027 - 0,037 - 0,05 = 0,886 . \quad (2.289)$$

Параметри потоку на виході з РК:

ентальпія

$$i_2 = i_{2S} + \Delta h_K = 80,6 + 3,39 = 84 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} ; \quad (2.290)$$

густина (визначається за значеннями P_K і i_2); $\rho_2 = 57,17 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

температура $T_2 = 102\text{K}$.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						74
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Швидкість звуку за параметрами потоку на виході з РК

$$a_2 = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^6 \cdot k \cdot P_2}{\rho_2}}, \quad (2.291)$$

де k - показник адіабати, що відповідає параметрам T_2 і P_2 ;

$$a_2 = \sqrt{\frac{1 \cdot 10^6 \cdot 1,6 \cdot 0,66}{57,17}} = 135,9 \frac{м}{с}.$$

Число Маха щодо відносної швидкості потоку при виході з РК

$$Mw_2 = \frac{w_2}{a_2} = \frac{122,6}{135,9} = 0,9. \quad (2.292)$$

2.7.3. Розрахунок геометричних розмірів робочого колеса

Площа виходу із колеса

$$f_2 = \frac{G}{w_2 \cdot \rho_2 \cdot \tau_2 \cdot \sin \beta_2}, \quad (2.293)$$

де τ_2 - коефіцієнт стиснення перерізу лопатками на виході з РК;

$$f_2 = \frac{0,425}{122,6 \cdot 57,17 \cdot 0,81 \cdot 0,5736} = 0,00013 м^2.$$

Діаметр воронки

$$d_B = \sqrt{\frac{4 \cdot f_2}{\pi \cdot (1 - \xi_{Bm}^2)}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,00013}{3,14 \cdot (1 - 0,5^2)}} = 0,0148 м. \quad (2.294)$$

Діаметр втулки

$$d_{Bm} = \xi_{Bm} \cdot d_B = 0,5 \cdot 0,0148 = 0,0074 м. \quad (2.295)$$

Середній діаметр РК у вихідному перерізі

$$d_2 = \sqrt{\frac{d_B^2 + d_{Bm}^2}{2}} = \sqrt{\frac{0,0148^2 + 0,0074^2}{2}} = 0,012 м. \quad (2.296)$$

Число лопаток на вході до РК

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						75
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$Z_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot \tau_1}{\operatorname{tg} \alpha_1}, \quad (2.297)$$

де k_1 - коефіцієнт, що використовується при розрахунку числа лопаток РК;

$$Z_1 = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 0,7 \cdot 0,85}{0,26795} = 13,95 ;$$

результат округляється до цілого парного числа $Z_1 = 14$;

кількість лопаток на виході з РК

$$Z_2 = \frac{z_1}{K_Z}, \quad (2.298)$$

де K_Z - відношення числа лопаток на вході в РК і на виході;

$$Z_2 = \frac{14}{2} = 7 .$$

Товщина лопатки на вході до РК

$$\delta_1 = \bar{\delta}_1 \cdot d_1, \quad (2.299)$$

де $\bar{\delta}_1$ - відносна товщина лопатки на вході до РК;

$$\delta_1 = 0,06 \cdot 0,029 = 0,0017 \text{ м} .$$

Товщина лопатки на виході з РК

$$\delta_2 = \bar{\delta}_2 \cdot d_1, \quad (2.300)$$

де $\bar{\delta}_2$ - відносна товщина лопатки на виході з РК

$$\bar{\delta}_2 = 0,6 \cdot \bar{\delta}_1 = 0,6 \cdot 0,06 = 0,036 \quad (2.301)$$

$$\delta_2 = 0,036 \cdot 0,029 = 0,001 \text{ м} .$$

Коефіцієнт стиснення перерізу лопатками на вході в РК

$$\tau_1 = 1 - \frac{z_1 \cdot \delta_1}{\pi \cdot d_1 \cdot \sin \beta_1} = 1 - \frac{14 \cdot 0,0017}{3,14 \cdot 0,029 \cdot 1} = 0,7386 ; \quad (2.302)$$

Коефіцієнт стиснення перерізу лопатками на виході з РК

$$\tau_2 = 1 - \frac{z_2 \cdot \delta_2}{\pi \cdot d_2 \cdot \sin \beta_2} = 1 - \frac{7 \cdot 0,001}{3,14 \cdot 0,012 \cdot 0,5736} = 0,68 . \quad (2.303)$$

Загальна ширина РК в осьовому напрямку

$$B_K = 0,3 \cdot d_1 = 0,3 \cdot 0,029 = 0,0087 \text{ м} . \quad (2.304)$$

										Лист
										76
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата						

2.7.4 Розрахунок основних характеристик турбодетандера

Частота обертання ротора

$$n = \frac{60 \cdot u_1}{\pi \cdot d_1} = \frac{60 \cdot 245,44}{3,14 \cdot 0,029} = 161722 \text{ хв}^{-1} \quad (2.305)$$

Потужність дискового тертя (тертя обертових дисків коліс о навколишній газ)

$$N_{T\partial} = 10^{-3} \cdot \beta_{Tp} \cdot u_1^3 \cdot \rho_1 \cdot d_1^2, \quad (2.306)$$

де β_{Tp} - експериментальний коефіцієнт, що враховує втрати від дискового тертя;

$$\beta_{Tp} = 0,0089 k_{Tp} \cdot \text{Re}_1^{-0,2}, \quad (2.307)$$

де k_{Tp} - поправочний коефіцієнт, що враховує форму та тип РК;

Re_1 - число Рейнольдса за параметрами входу потоку в колесо;

$$\text{Re}_1 = \frac{u_1 \cdot d_1 \cdot \rho_1}{\eta_1}, \quad (2.308)$$

где η_1 - коефіцієнт динамічної в'язкості

$$\text{Re}_1 = \frac{245,44 \cdot 0,029 \cdot 74,5}{11 \cdot 10^{-6}} = 4,8 \cdot 10^7;$$

$$\beta_{Tp} = 0,0089 \cdot 2,5 \cdot (4,8 \cdot 10^7)^{-0,2} = 0,7 \cdot 10^{-3};$$

$$N_{T\partial} = 10^{-3} \cdot 0,7 \cdot 10^{-3} \cdot 245,44^3 \cdot 74,5 \cdot 0,029^2 = 0,65 \text{ кВт}.$$

Втрати холоду від дискового тертя:

абсолютне значення

$$\Delta h_{T\partial} = \frac{N_{T\partial}}{G} = \frac{0,65}{0,425} = 1,53 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; \quad (2.309)$$

відносне значення

$$\zeta_{T\partial} = \frac{\Delta h_{T\partial}}{h_s} = \frac{1,53}{67,1} = 0,03 \quad (2.310)$$

Втрати холоду від перетікання газу через зазор між корпусом та відкритою стороною робочого колеса:

коефіцієнт перетікань через зазор

$$\alpha_{ym} = \frac{4 \cdot \mu_3 \cdot \bar{\Delta}_{\min}}{\tau_2 \cdot (1 - \xi_{Bm}^2)}, \quad (2.311)$$

де μ_3 - поправочний коефіцієнт при розрахунку перетікань через зазор між напіввідкритим колесом та корпусом;

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		77

Δ_{\min} - відносний мінімальний зазор

$$\bar{\Delta}_{\min} = \frac{3 + \lg d_B}{4000 \cdot d_B} = \frac{3 + (-1,83)}{4000 \cdot 0,0148} = 0,02 ; \quad (2.312)$$

$$\alpha_{ym} = \frac{4 \cdot 0,4 \cdot 0,02}{0,68 \cdot (1 - 0,5^2)} = 0,063 .$$

Відносна втрата холоду через внутрішні витоки

$$\zeta_{ym} = \alpha_{ym} \cdot \eta_T = 0,063 \cdot 0,886 = 0,056 . \quad (2.313)$$

Ізоентропний ККД

$$\eta_S = \eta_T - \zeta_{T0} - \zeta_{ym} = 0,886 - 0,03 - 0,056 = 0,8 . \quad (2.314)$$

Дійсний перепад ентальпій у ТД

$$h = h_S \cdot \eta_S = 67,1 \cdot 0,8 = 53,68 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} . \quad (2.315)$$

Холодопродуктивність ТД

$$Q_0 = G \cdot h \cdot \eta_v , \quad (2.316)$$

де η_v - коефіцієнт, що враховує зовнішні витоки газу;

$$Q_0 = 0,425 \cdot 53,68 \cdot 0,99 = 22,59 \text{кВт} .$$

Потужність (ефективна) на валу ТД

$$N_e = Q_0 \cdot \eta_M , \quad (2.317)$$

де η_M - коефіцієнт, що враховує втрати у підшипниках (механічний ККД);

$$N_e = 22,59 \cdot 0,96 = 21,69 \text{кВт} .$$

Ентальпія потоку на виході з ТД

$$i_K = i_0 - h = 146,9 - 53,68 = 93,22 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} . \quad (2.318)$$

Температура газу на виході з турбодетандеру визначається зазначенням

$$P_K \text{ і } i_K , T_K = 104\text{K}$$

2.7.5. Розрахунок геометричних характеристик направляючого апарату

Діаметр НА (внутрішній)

$$d_C = 1,034 \cdot d_1 = 1,034 \cdot 0,029 = 0,03\text{м} . \quad (2.319)$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
						78
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

9.5.2 Число лопаток НА

$$Z_C = \frac{360^\circ}{1,42 \cdot \alpha_C} = \frac{360}{1,42 \cdot 15} = 16,9 \quad , \quad (2.320)$$

приймається $Z_C = 16$.

Ширина НА (розмір уздовж осі машини)

$$b_C = 1,03 \cdot b_1 = 1,03 \cdot 0,0012 = 0,00124 \text{ м} \quad . \quad (2.321)$$

Висота каналу (горло, мінімальна відстань між профілями)

$$a_C = \frac{f_C}{Z_C \cdot b_C} = \frac{2,25 \cdot 10^{-5}}{16 \cdot 0,0012} = 0,00117 \text{ м} \quad . \quad (2.232)$$

Кутовий крок розташування сопел

$$\theta_t = \frac{360^\circ}{Z_C} = \frac{360}{16} = 22,5^\circ \quad . \quad (2.233)$$

Коефіцієнт, що характеризує відношення ширини сопла до висоти

$$k_C = \frac{b_C}{a_C} = \frac{0,0012}{0,00117} = 1,026 \quad . \quad (2.234)$$

Геометричні характеристики НА

Кути профілю на колі виходу:

$$\alpha_{КП} = \alpha_C - \frac{180^\circ}{Z_C} \tau_{КР} \quad , \quad (2.235)$$

де $\tau_{КР}$ - коефіцієнт стиснення перерізу на виході з НА;

$$\tau_{КР} = \frac{1}{1 + \delta_{КР}/a_C} \quad ; \quad (2.236)$$

де $\delta_{КР}$ - товщина вихідної кромки лопатки НА

$$\tau_{КР} = \frac{1}{1 + 0,1 \cdot 10^{-3} / 0,00117} = 0,92 \quad ;$$

$$\alpha_{КП} = 15 - \frac{180}{16} \cdot 0,92 = 4,7 \quad ;$$

$$\alpha_{КР} = 2\alpha_C - \alpha_{КП} = 2 \cdot 15 - 4,7 = 25,3^\circ \quad . \quad (2.237)$$

									Лист
									79
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата					

Довжина прямолінійної ділянки передньої стінки профілю

$$l = \frac{d_c \sin \theta_t}{2 \cos(\theta_t + \alpha_{КП})} = \frac{0,03 \cdot 0,3827}{2 \cdot 0,8894} = 0,065 м \quad (2.238)$$

Радіус кривизни передньої стінки, що окреслює контур профілю

$$R_{II} = \frac{\delta_{КР} + l \sin \theta_t}{\cos \theta_t - \sin \gamma} = \frac{0,1 \cdot 10^{-3} + 0,065 \cdot 0,3827}{0,9239 - 0,342} = 0,043 м \quad (2.239)$$

2.7.6. Розрахунок швидкісних коефіцієнтів напрямного апарату та робочого колеса

Еквівалентний діаметр

$$d_{\mathcal{D}} = \frac{2a_c b_c}{a_c + b_c} = \frac{2 \cdot 0,00117 \cdot 0,0012}{0,00117 + 0,0012} = 0,00118 м \quad (2.240)$$

Для розрахункової оцінки швидкісного коефіцієнта лопаткового НА та швидкісного коефіцієнта РК можна використовувати наступні апроксимаційні залежності:

$$\varphi = 0,95 \sqrt{1 - \frac{1,2 \cdot 10^{-4}}{d_{\mathcal{D}}}} = 0,95 \sqrt{1 - \frac{1,2 \cdot 10^{-4}}{0,00118}} = 0,92 ; \quad (2.241)$$

$$\varphi = 0,92 \varphi = 0,92 \cdot 0,92 = 0,85 \quad (2.242)$$

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		80

ВИСНОВКИ

В результаті розробки проекту було визначено основні технічні та конструктивні характеристики повітророздільної установки.

У технологічному розрахунку були визначені параметри у вузлових точках установки, параметри потоків на вході та виході з апаратів, турбодетандера, насоса, а також частки потоків. З енергобалансу нижньої колони визначено навантаження конденсатора-випарника.

Розрахунок процесу ректифікації нижньої колони виконано за методом Мак-Кеба і Тіле, в результаті якого було визначено дійсне число тарілок ректифікації. Воно складає 21.

Під час розрахунку нижньої колони визначено гідравлічний опір тарілки, у ході якого було перевірено працездатність колони при заданих конструктивних параметрах.

При розрахунку переохолоджувача рідкого кисню визначено розрахункове число трубок у кожному шарі, довжини трубок у кожному шарі, гідравлічні втрати.

Виконано термогазодинамічний розрахунок турбодетандера, а також розрахунок геометричних характеристик направляючого апарату.

У розрахунку конденсатора-випарника було виконано розрахунок пластинчато-ребристого пакета, розраховані його геометричні характеристики, визначено площі робочих поверхонь кипіння та конденсації, а також теплові потоки.

Здійснено розрахунок теплообмінника-зріджувача, при якому виконано тепловий розрахунок апарату, визначено параметри навивки, а також розраховано поверхню теплообміну шляхом розбивки на 10 елементарних перерізів.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		81

ОХОРОНА ПРАЦІ

Токсичність застосовуваних чи одержуваних речовин

Класи небезпеки токсичних речовин ГОСТ 12.1.007-76 встановлює 4 класи небезпеки:

- 1) надзвичайно небезпечні (гранично допустима концентрація ГДК $< 0,1 \text{ мг/м}^3$);
- 2) високо небезпечні ($0.1 < \text{ГДК} < 1.0 \text{ мг/м}^3$);
- 3) помірно небезпечні ($1.0 < \text{ГДК} < 10.0 \text{ мг/м}^3$);
- 4) малонебезпечні ($\text{ГДК} > 10.0 \text{ мг/м}^3$).

На даній повітророздільній установці задіяна холодильна установка, холодильним агентом для якої є фреон R22.

Фреон R22 надає токсичну дію на органи дихання, отруює місцеве середовище на виробництві, відноситься до підгрупи Б групи IV сильнотоксичних отруйних речовин (СДОР). При їх зберіганні повинні виконуватись вимоги «Санітарних правил проектування обладнання, складів для зберігання сильнотоксичних отруйних речовин» (СДОР) (№534-65).

Інертні гази, попутні продукти розділення повітря, такі як азот, шкідливі лише тією мірою, якою вони своєю присутністю знижують вміст кисню повітря.

Дія шкідливих речовин в умовах високих температур, шуму та вібрацій значно посилюється, хоча кількісну оцінку цього явища нині дати важко. Так, при високій температурі повітря розширюються судини шкіри, посилюється потовиділення, частішає дихання, що прискорює проникнення шкідливих речовин в організм. Внаслідок впливу шкідливих речовин можуть виникати професійні захворювання. Контроль за концентрацією шкідливих речовин здійснюється санепідемстанціями шляхом експресних та автоматичних методів (газоаналізатори, хроматографи). Зниження впливу отруйних речовин можна досягти при максимальній механізації та

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		82

автоматизації виробництва, модернізації технічного обладнання, ефектної вентиляції (як місцевої, так і загальнообмінної).

Класифікація виробництва за рівнем вибухової, вибухопожежної та пожежної небезпеки

Приміщення цеху розділення, стиснення продуктів поділу повітря (машинне відділення), апаратне відділення, вентильовані підвали під блоком поділу повітря, камера фільтрів (повітряних) за категорією приміщень за вибухонебезпечністю та пожежною небезпекою за ОНТП 24-86 відносяться до категорії Д.

За рівнем вогнестійкості будівельних конструкцій – II, Ша.

Випробування посудин, що працюють під тиском

Гідравлічному випробуванню підлягають всі посудини після виготовлення. Посудини, виготовлення яких закінчується на місці установки, що транспортуються на місце монтажу частинами, піддаються гідравлічному випробуванню на місці монтажу. Посудини, що мають захисне покриття або ізоляцію, піддаються гідравлічному випробуванню до покриття або ізоляції. Посудини, що мають зовнішній кожух, піддаються гідравлічному випробуванню до встановлення кожуха.

Гідравлічне випробування, вироблене в організації виробника, повинно проводитися на спеціальному випробувальному стенді, що має відповідну огорожу та відповідає вимогам безпеки та інструкції з проведення гідровипробувань відповідно до НД.

Первинний технічний огляд

Кожна нововстановлена посудина і апарат повинен бути підданий адміністрацією підприємства технічному огляду відповідно до вимог Правил.

Періодичний технічний огляд

Посудини, що працюють при змінному режимі тисків та температур (регенератори та ін.), а також інші посудини. Пристрої, що мають фланцеві і

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		83

знімні з'єднання корпусів (адсорбери, фільтри та ін.), виготовлених з матеріалів регламентованими галузевими правилами, повинні періодично, не рідше одного разу на шість років піддаватися гідравлічному випробуванню з попереднім внутрішнім оглядом.

Внутрішній огляд таких посудин галузевими правилами (не рідше одного разу на два роки) може бути замінений пневматичним випробуванням на робочий тиск без демонтажу ізоляції та обв'язувальних трубопроводів.

Посудини (ректифікаційні та ін. апарати), що працюють в умовах стабільних температур та тисків, для яких за конструктивними особливостями неможливий внутрішній огляд та гідравлічне випробування, повинні періодично піддаватися пневматичним випробуванням:

а) не рідше одного разу на два роки на робочий тиск без демонтажу обв'язувальних трубопроводів та ізоляції;

б) не рідше одного разу на шість років пробним тиском з демонтажем ізоляції та обв'язувальних трубопроводів з попереднім оглядом судини в доступних місцях та перевіркою міцності її розрахунком.

Внутрішній огляд таких посудин повинен проводитись при ремонті їх внутрішніх пристроїв, але не рідше одного разу на 12 років.

Пневматичне випробування посудин пробним тиском має проводитися за дотримання особливих запобіжних заходів під керівництвом головного механіка підприємства.

Електробезпека обладнання

Основними заходами захисту від поразки струмом є: забезпечення недоступності струмопровідних частин, що є під напругою, для дотику; електричний поділ мережі; усунення небезпеки ураження при появі напруги на корпусах, кожухах та інших частинах електрообладнання, що досягається застосуванням малої напруги, використанням подвійної ізоляції, вирівнюванням потенціалу, захисним заземленням, зануленням, захисним відключенням та ін.; застосування спеціальних електрозахисних засобів,

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		84

переносних приладів та пристроїв; організація безпечної експлуатації електроустановок.

Класифікація приміщень щодо небезпеки ураження струмом

Всі приміщення діляться за рівнем ураження людей електричним струмом на три класи: без підвищеної небезпеки, з підвищеною небезпекою, особливо небезпечні.

Приміщення без підвищеної небезпеки — це сухі, безпилкові приміщення з нормальною температурою повітря та з ізолюючими (наприклад, дерев'яними) підлогами, тобто в яких відсутні умови, властиві приміщенням з підвищеною небезпекою та особливо небезпечним.

Приміщення з підвищеною небезпекою характеризуються наявністю однієї з наступних п'яти умов, що створюють підвищену небезпеку:

- вогкості, коли відносна вологість повітря тривало перевищує 75%; такі приміщення називають сирими;

- високої температури, коли температура повітря тривало (понад добу) перевищує 35°C; такі приміщення називаються жаркими;

- струмопровідного пилу, коли за умовами виробництва в приміщеннях виділяється токорозділяючий технологічний пил (наприклад, вугільний, металевий тощо) у такій кількості, що він осідає па проводах, проникає всередину машин, апаратів тощо; такі приміщення називаються курними з токорозділяючим пилом;

- струмопровідних підлог – металевих, земляних, залізобетонних, цегляних тощо;

- можливості одночасного дотику людини до металоконструкцій будівель, що мають з'єднання з землею, технологічним апаратів, механізмів тощо, з одного боку, і до металевих корпусів електрообладнання - з іншого.

Прикладом приміщення з підвищеною небезпекою можуть бути сходові клітини різних будівель з провідними підлогами, складські неопалювані

приміщення (навіть якщо вони розміщені в будинках з ізолюючими підлогами та дерев'яними стелажми) тощо.

Приміщення особливо небезпечні характеризуються наявністю однієї з наступних трьох умов, що створюють особливу небезпеку:

- особливої вологості, коли відносна вологість повітря близька до 100% (стіни, підлога та предмети, що знаходяться в приміщенні, вкриті вологою); такі приміщення називаються особливо сирими;

- хімічно активного або органічного середовища, тобто приміщення, в яких постійно або протягом тривалого часу містяться агресивні пари, гази, рідини, що утворюють відкладення або плісняву, що діють

- руйнівно на ізоляцію та струмопровідні частини електроустаткування; такі приміщення називаються приміщеннями з хімічно активним чи органічним середовищем; одночасної наявності двох і більше умов, властивих приміщенням із підвищеною небезпекою.

Це приміщення відноситься до приміщення з особливою небезпекою.

Вимоги до приміщень з розміщення обладнання

Виробництво продуктів розділення повітря, зокрема кисню, має розміщуватись у санітарній зоні довжиною не менше 50 метрів. Цехи розділення повітря і газифікації кисню повинні бути віддалені від інших цехів, що забруднюють повітря, на таку відстань, щоб у повітрі, що надходить на переробку, домішок було менше допустимої межі. Для ацетилену це $0,25...5 \text{ мг/м}^3$, для вуглеводнів $0,27...0,65 \text{ мг/м}^3$, сірковуглецю $0,3 \text{ мг/м}^3$.

Визначення вмісту шкідливих домішок у повітрі проводиться, коли відстань до забруднюючого цеху менше 2 км.

Повинні бути передбачені протипожежні розриви між будинками, апаратами та ємностями для зберігання криогенних продуктів. Залежно від типу обладнання, будівлі проектують 1-2 поверховими без горищних перекриттів і цокольних поверхів. Виробничі будівлі та приміщення повинні

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		86

забезпечити найбільш приємну виробничу обстановку та усунути пожежну небезпеку, маючи при цьому будь-яку форму та розміри. Але, виходячи з санітарно-гігієнічних умов (освітлення, вентиляція), найбільш доцільними вважаються будівлі, що мають форму прямокутника. Конструкція виробничих будівель, їх протяжність та кількість поверхів визначаються технологічним процесом, ступенем його пожежної безпеки та вибухобезпеки, наявністю шкідливих виділень.

Об'єм виробничих приміщень повинен бути таким, щоб на кожного працюючого доводилося не менше 15 м^3 , а площа приміщень – не менше $4,5\text{ м}^2$. Висоту виробничих приміщень із значними тепло-, волого- та газовиділеннями визначають з урахуванням технологічного процесу та забезпечення достатнього видалення теплоти, вологи та газів із робочої зони.

Для безпеки руху робітників та зручності транспортування газів у цехах необхідно передбачити розділові входи (в'їзди) та виходи (виїзди) для людей та транспорту. Двері та ворота повинні відчинятися назовні, щоб у разі масового руху робітників із приміщення двері не були перешкодою для виходу. На випадок пожежі у виробничих будинках обладнують додаткові евакуаційні виходи.

Ворота для автотранспорту повинні мати ширину, що дорівнюють ширині автомашини плюс 0,6 м, і висоту, що дорівнює висоті автомашини плюс 0,2 м.

Зовнішні стіни опалювальних виробничих будівель повинні мати таку товщину, при якій виключилася б можливість конденсації вологи на їх внутрішніх поверхнях. Протяжність прибудов до виробничого приміщення зі значними волого-, тепло- та газовиділення та природним повітрообміном не повинна перевищувати 40% загальної протяжності зовнішніх стін даного приміщення.

Аналіз установки на можливість аварії, способи захисту

До обслуговування установки допускаються особи, які пройшли виробничо-технічне навчання та мають посвідчення на право обслуговування, що вивчили посібник з експлуатації установки та порядок роботи.

Злив рідкого кисню повинен виконуватися у випарник. Категорично забороняється злив рідкого кисню з апарату приміщення цеху.

Забороняється розкривати апарати, що не відігріті до плюсових температур.

Ущільнення бавовняним набиванням, просоченим мастилом забороняється.

Біля повітророздільної установки для отримання кисню під високим тиском забороняється зберігання горючих речовин: масел, бензину, жирів, ганчір'я, забороняється куріння, застосування відкритого вогню – газових, паяльних пальників тощо.

Запобіжні клапани повинні бути відрегульовані на відповідний тиск та запломбовані.

Інструмент, який використовується при обслуговуванні установки, повинен мати блакитну смугу та знежирюватись щоразу при регламентних роботах.

Усі манометри мають бути справними, мати пломбу та перевірятися щороку. Їх необхідно очищати від забруднення олією та жирами.

Строго забороняється підтягування фланцевих та ніпельних з'єднань, що знаходяться під тиском.

Усі ремонтні роботи повинні проводитись тільки при знятій напрузі на установці та вимкнених автоматах на щиті керування. Усі струмоприймачі обов'язково мають бути заземлені у загальний контур заземлення.

Перед пуском установки в експлуатацію необхідно перевірити стан захисту від накопичення статичної електрики.

Загальні вимоги до приміщень, в яких експлуатується установка: категорія Д за будівельними нормами та правилами, ступінь вогнестійкості «П», характеристика середовища приміщення для вибору електрообладнання – «нормальна» згідно з «Правилами пристрою електроустановок».

Підбір запобіжного клапана

Для захисту пристроїв та установок від підвищення в них тиску вище межі, встановленої нормами техніки безпеки, використовують запобіжні клапани та розривні мембрани. У судинах і трубопроводах, призначених для різних рідин та газоподібних середовищ з температурою до 837 К та тиском до 30...32 МПа застосовують запобіжні клапани прямої дії.

Запобіжний клапан, що розраховується, встановлений на блоці очищення і осушення повітря.

Пропускна здатність запобіжного клапана:

$$G = 1,59 \cdot \alpha \cdot F \cdot B \cdot \sqrt{(P_{кр} - P_2) \cdot \rho}$$

де α – коефіцієнт витрати газу, $\alpha = 0,65$ [10];

$$F - \text{площа перерізу клапана, } F = \frac{\pi \cdot D^2}{4};$$

$D = 25 \text{ мм}$ – діаметр перерізу в проточній частині;

B – коефіцієнт стисливості реального газу; $B = 0,96$;

$P_{кр} = 0,153 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ – абсолютний критичний тиск газу перед запобіжним клапаном;

$P_1 = 0,1 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ – абсолютний тиск за запобіжним клапаном;

$\rho = 261,899 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ – густина повітря перед клапаном.

$$F = \frac{3,14 \cdot 0,025^2}{4} = 0,000491 \text{ м}^2$$

$$G = 1,59 \cdot 0,65 \cdot 0,000491 \cdot 0,96 \cdot \sqrt{(0,153 - 0,1) \cdot 10^6 \cdot 261,899} = 1,815 \text{ кг/с.}$$

Розрахунок системи заземлення

Метою розрахунку є підбір заземлювачів так, щоб опір їх розтікання у ґрунті був менше 4 Ом.

Розрахункове значення питомого опору ґрунту:

$$\rho_{расч} = \rho_{физич} \cdot \psi$$

де $\psi = 1,5$ - кліматичний коефіцієнт [10];

$$\rho_{физич} = 30 \text{ Ом} \cdot \text{м} [10];$$

$$\rho_{расч} = 30 \cdot 1,5 = 45 \text{ Ом} \cdot \text{м}.$$

Розраховуємо значення опору одного вертикального заземлювача

$$R = \frac{\rho_{расч}}{\pi \cdot l} \cdot \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4t+l}{4t-l} \right)$$

$$l = 2,5 \text{ м}$$

$$t_0 = 0,5 \text{ м}$$

$$d = 0,06 \text{ м}$$

$$t = \frac{2,5}{2} + 0,5 = 1,75 \text{ м}$$

$$R = \frac{45}{2 \cdot 3,14 \cdot 14 \cdot 2,5} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 2,5}{0,06} + \frac{1}{2} \cdot \ln \frac{4 \cdot 1,75 + 2,5}{4 \cdot 1,75 - 2,5} \right) = 13,75 \text{ Ом}.$$

Відстань між стрижнями $L = 7,5 \text{ м}$.

Кількість вертикальних заземлювачів:

$$n = \frac{R}{R_{дон}}$$

$$n = \frac{13,74}{4} = 3,43$$

Приймаємо $n = 4$ штук.

Загальний опір всіх вертикальних заземлювачів з урахуванням їх впливу друг на друга:

$$R_{одц} = \frac{R}{n \cdot \eta}$$

де $\eta = 0,89$ – коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів,

$$R_{одц} = \frac{13,74}{4 \cdot 0,89} = 3,86 \text{ Ом}$$

$3,86 = R_{обц} < R_{дон} = 40\text{М}$ – умова підбору заземлювачів виконується.

Виробнича санітарія

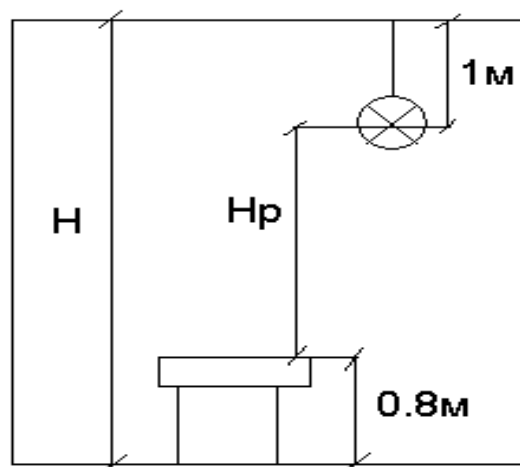
Поширюється на окрему галузь виробництва в масштабах усієї країни та містить гарантії безпеки та гігієни праці, специфічні для конкретної галузі

Розрахунок штучного освітлення на робочому місці

Метою розрахунку є підбір штучних джерел світла відповідно до норм освітленості та визначення потужності електроосвітлювальної установки.

Вибираючи систему освітлення необхідно враховувати, ефективніша система комбінованого освітлення, але у гігієнічному відношенні система загального освітлення більш досконала, оскільки створює рівномірний розподіл світлової енергії, використовуючи локалізоване загальне освітлення можна найпростіше досягти високого рівня освітленості на робочих місцях без значних витрат.

Розподіл світильників та їх кількість для забезпечення рівномірного розподілу освітленості досягається у тому випадку, якщо відношення відстані між центрами світильників L до висоти їхнього підвісу до робочої поверхні H_p становить певну кількість для світильників будь-якого типу



Розміри приміщення $A \times B \times H = (10 \times 14 \times 3,5)$ м. Світильники прийняті у пилозахищеному виконанні; лампи – безрозрядні; система висвітлення – загальна.

Визначимо відстань між центрами світильників виходячи з умови:

$$\frac{L}{H_p} = 1,5 \Rightarrow L = 1,5 \cdot H_p, \text{ м}$$

$$L = 1,5 \cdot 1,7 = 2,55 \text{ м}$$

Визначимо кількість світильників:

$$N = \frac{A \cdot B}{L^2}, \text{ Шт}$$

$$N = \frac{10 \cdot 14}{2,55^2} = 21,53 \approx 22 \text{ шт}$$

Визначимо світловий потік одного світильника:

$$\Phi = \frac{E_H \cdot k \cdot z \cdot S \cdot 100}{N \cdot \eta}, \text{ лм, де}$$

E_H – нормована мінімальна освітленість, $E_H = 400$ лк;

k – коефіцієнт запасу, $k = 1,5$;

z – коефіцієнт нерівномірності освітлення, $z = 1,1$;

S - площа приміщення, $S = 10 \cdot 14 = 140 \text{ м}^2$;

η – коефіцієнт використання світлового потоку залежить від:

ККД та кривої розподілу сили світла світильника,

коефіцієнта відображення від стелі та стін ($r_{ст}$, $r_{п}$),

висоти підвісу світильників над робочою поверхнею,

показника приміщення $i = \frac{A \cdot B}{H_p \cdot (A + B)}$

$$i = \frac{10 \cdot 14}{1,7 \cdot (10 + 14)} = 3,43$$

тоді $\eta = 17$

$$\Phi = \frac{400 \cdot 1,5 \cdot 1,1 \cdot 140 \cdot 100}{22 \cdot 17} = 24706 \text{ лм}$$

Компонуємо світильник:

Беремо 22 лампи марки ЛБ20 зі світловим потоком однієї лампи 1060 лм.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		92

Знаходимо сумарний світловий потік одного світильника

$$\sum \Phi = 23320 \text{ лм}$$

Допустиме відхилення у розрахунку (-10% ÷ +20%).

$$\Delta = \frac{|\Phi - \sum \Phi|}{\Phi} \cdot 100\% = \frac{|24706 - 23320|}{24706} \cdot 100\% = +5,61\%$$

Потужність освітлювальної установки:

$$P = N \cdot n \cdot p, \text{ Вт,}$$

де

n – кількість ламп у світильнику, $n = 4$ прим;

p – потужність лампи, $p = 20$ Вт;

$$P = 22 \cdot 4 \cdot 20 = 1760 \text{ Вт.}$$

Розрахунок вентиляції виробничого приміщення

Мета розрахунку – визначення кількості повітря, яке необхідно подати до приміщень для забезпечення підтримання норм стану повітряного середовища на відповідному рівні та визначення потужності електродвигуна вентилятора.

Кількість повітря визначимо за методом кратності повітрообміну:

$$L = k \cdot V$$

де $k = \frac{23}{\beta - 0,3}$ – кратність повітрообміну, [10]

де β – додаткова концентрація вуглекислого газу; для виробничих приміщень відповідає $1,25 \text{ л/м}^3$ [10]

V – обсяг виробничого приміщення.

$$k = \frac{23}{1,25 - 0,3} = 24,2$$

$$L = 24,2 \cdot 490 = 11858 \text{ м}^3/\text{ч}$$

Установча потужність електродвигуна вентилятора:

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		93

$$N = \frac{k \cdot L \cdot \Delta H \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot \eta_B \cdot \eta_n}$$

де $k = 1,05$ – коефіцієнт запасу, [10];

ΔH – повний тиск, що розвивається вентилятором (для типу ЦЧ-70 $\Delta H = 440 \text{ Па}$ [29]);

$\eta_B = 0,71$ – ККД вентилятора, що визначається за рис. 10 [10];

$\eta_n = 1$ – ККД приводу, при безпосередній установці колеса на валу електродвигуна [10].

Оскільки приміщення має значний обсяг, приймемо вентиляційну мережу, що складається з п'яти вентиляторів.

Тоді:

$$L_{\text{сети}} = 11858 \div 5 = 2372 \text{ м}^3/\text{ч}$$

$$N_{\text{вент}}^{1-20} = \frac{1,05 \cdot 2372 \cdot 440 \cdot 10^{-6}}{3,6 \cdot 0,71 \cdot 1} = 0,43 \text{ кВт.}$$

Долікарська допомога

При криогенному обмороженні необхідно перш за все зняти одяг, що утруднює кровообіг у ураженій ділянці. Необхідно зробити теплу ванну ураженого місця за температури води $40-45^\circ\text{C}$. Не слід проводити сухе відігрівання або використовувати воду вище 46°C , так як у цьому випадку можливе посилення ураження тканин, що постраждали. Якщо вражена більшість поверхні тіла, чим викликано загальне зниження температури тіла, то потерпілому необхідно створити загальну ванну, що зігріває. При цьому необхідно мати на увазі, що постраждалий може впасти у шоківий стан.

Заходи першої медичної допомоги постраждалому електричного струму залежить від його стану. Якщо потерпілий у свідомості, але до цього непритомний або тривалий час перебував під струмом, йому необхідно забезпечити повний спокій до прибуття лікарів або терміново доставити до лікувального закладу. При відсутності свідомості, але диханні, що зберіглося, і роботі серця потрібно рівно укласти постраждалого на м'яку підстилку,

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		94

розтиснути пояс та одяг, забезпечити приплив свіжого повітря. Слід давати нюхати нашатирний спирт, оббризкувати обличчя холодною водою, розтирати та зігрівати тіло

Якщо потерпілий погано дихає – рідко, судомно або якщо дихання поступово погіршується, тоді як у всіх цих випадках продовжується нормальна робота серця, необхідно робити штучне дихання. За відсутності ознак життя необхідно робити штучне дихання та зовнішній масаж серця.

Висновок

Зазначені у цьому розділі заходи з техніки безпеки дозволяє уникнути нещасних випадків під час роботи на ПРУ. Використання вентиляції покращить санітарно-гігієнічні умови роботи обслуговуючого персоналу.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		95

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Covid-19: рятуємося киснем «вдома» <https://www.ukrinform.ua/rubric-society/3120038-covid19-ratueomos-kisnem-na-domu.html>
2. V. L. Bondarenko, Yu. M. Simonenko. Cryogenic Technologies of Rare Gases Extraction: monograph. — Odesa : Astroprint, 2014. — 312 p.
3. В. М. Арсеньєв, В. М. Козін. Кріогенна техніка: основи теорії і розрахунку циклів кріогенних установок: навч. посіб.. — Суми : СумДУ, 2021. — 272 с.
4. Б. Г. Грудка, А. М. Басов. Повітророздільні установки : конспект лекцій. — Одеса : ОНАХТ, 2022. — 57 с.
5. М. Kravchenko. Air separation units for cryogenic products : lecture notes. — Odesa : ONAFT, 2022. — 73 p.
6. Castle W. F. Air separation and liquefaction: Recent developments and prospects for the beginning of the new millennium // International Journal of Refrigeration. – 2002. – Vol. 25. – P. 158-172.
7. М. Kravchenko. Cryogenic technology and low-temperature machines : lecture notes. — Odesa : ONAFT, 2022. — 105 p.
8. Alsultanny Y. A., Al-Shammari N. N. Oxygen Specific Power Consumption Comparison for Air Separation Units // Engineering Journal. —2014. —Vol. 18 (2). —P. 68–80.
9. Harald Klein, Philipp Fritsch, Patrick Haider Flexible Operation of Air Separation Units // ChemBioEng Reviews. —2021. —Vol. 8. —P. 1-19.
10. Kumar, M., Panda, D., Behera, S. K. & Sahoo, R. K. Experimental investigation and performance prediction of a cryogenic turboexpander using artificial intelligence techniques. // Applied Thermal Engineering. —2019. —P.15-29.
11. Sam, A. A. & Ghosh, P. Flow field analysis of high-speed helium turboexpander for cryogenic refrigeration and liquefaction cycles. // Cryogenics. —2017. —Vol. 82. —P. 5-13.
12. Дем'яненко Ю.І. Охорона праці під час роботи на установках розділення повітря. Навчальний посібник. – 2006.

					КРБ.КТ.1.490-03.2.15	Лист
Зм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		96