

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”  
Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології  
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО  
Завідувач кафедри МАХНВ  
\_\_\_\_\_ Андрій СТЕПАНЮК  
“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**Магістерська дисертація  
на здобуття ступеня магістра  
за освітньо-професійною програмою «Інжиніринг та комп’ютерно-  
інтегровані  
технології проектування інноваційного галузевого обладнання»  
зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»  
на тему: Модернізація азотно-кисневої установки з розробкою  
ректифікаційної колони та теплообмінника**

**Виконав:**

студент 6 курсу, групи ЛМ-41мп  
Андрій СТАСЮК \_\_\_\_\_

**Науковий керівник:**

доцент, к.т.н. Сергій ГАЙДАЙ \_\_\_\_\_

**Консультанти:**

охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях  
ст. викл., к.т.н. Андрій КОВТУН \_\_\_\_\_

розробка стартап-проекту  
доцент, к.е.н. Наталія ЮДІНА \_\_\_\_\_

автоматичний контроль і керування процесом  
професор, д.т.н. Олексій ЖУЧЕНКО \_\_\_\_\_

комп’ютерне моделювання процесів взаємодії  
асистент Микита БИШКО \_\_\_\_\_

**Рецензент:** \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, ім’я та прізвище)

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць інших  
авторів без відповідних посилань.  
Студент \_\_\_\_\_ Андрій СТАСЮК

Київ – 2025 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології**

**Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**Рівень вищої освіти – другий (магістерський)**

**Освітньо-професійна програма: «Інжиніринг та комп’ютерно–інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання»**

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ Андрій Степанюк

“\_\_” \_\_\_\_\_ 2025 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

Стасюку Андрію Юрійовичу

1. **Тема дисертації:** «Модернізація азотно-кисневої установки з розробкою ректифікаційної колони та теплообмінника»

науковий керівник дисертації: доцент, к.т.н. Гайдай Сергій Сергійович.  
затверджені наказом по університету від “\_\_” \_\_\_\_\_ 2025 р. № \_\_\_\_\_

2. **Термін подання студентом дисертації:** «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р

3. **Вихідні дані до проекту:** Ректифікаційна колона: витрати вихідної суміші 0,8 кг/с, масові частки цільового компоненту: вихідної суміші  $x_F = 0,6$  кг<sub>A</sub>/кг<sub>AB</sub>; у дистиляті  $x_D$  не менше 0,99 кг<sub>A</sub>/кг<sub>AB</sub>; кубового залишку  $x_W$  не більше 0,05 кг<sub>A</sub>/кг<sub>AB</sub>. Теплообмінник: робочий тиск 0,6 МПа, продуктивність газоподібного азоту 3,2 кг/с, температура газоподібного азоту: початкова  $t_{1п} = 86,9$  К, кінцева  $t_{1к} = 93,5$  К.

4. **Зміст пояснювальної записки:** а) основна частина: розглянути існуючі конструкції апаратів, обґрунтувати вибір конструкції апарата; проаналізувати обрану конструкцію в порівнянні з кращими вітчизняними та світовими аналогами; здійснити розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції: параметричний, конструктивний та гідравлічний, розрахунки на міцність і надійність елементів конструкції апаратів.

5. **Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):** технологічна схема – А1; схема автоматичного керування – А1; складальні креслення: ректифікаційна колона – А1, теплообмінник – А1, корпус колони – А1, днище колони – А1, трубна решітка – А1, кришка теплообмінника – А1; плакати з модернізацією – 2 аркуші формату А1.

6. **Перелік публікацій:** три тези доповідей за темою магістерської дисертації.

7. **Консультанти розділів проєкту:**

Розділ	Ім'я ПРИЗВИЩЕ консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	Андрій КОВТУН		
Розробка стартап-проєкту	Наталія ЮДІНА		
Автоматичний контроль і керування процесом	Олексій ЖУЧЕНКО		
Комп'ютерне моделювання процесів взаємодії	Микита БИШКО		

**Дата видачі завдання:** 01 вересня 2025 р.

**Студент**

\_\_\_\_\_

(підпис)

Андрій СТАСЮК

**Керівник дипломного проєкту**

\_\_\_\_\_

(підпис)

Сергій ГАЙДАЙ

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Терміни виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Узгодження теми, вихідних даних та джерел інформації. Обґрунтування актуальності проекту.	01.09.2025	
2	Патентне дослідження. Формування змісту модернізації (на основі вдосконалення теплообмінної поверхні та контактних елементів колони).	05.10.2025	
3	Опис технологічного процесу. Розробка технологічної схеми. Обґрунтування вибору конструкцій ректифікаційної колони та теплообмінника. Технічна характеристика устаткування.	15.09. 2025	
4	Параметричні розрахунки: визначення основних конструктивних розмірів апаратів. Розрахунок гідравлічного опору.	15.10. 2025	
5	Розрахунки на міцність та стійкість. Розробка алгоритмів та програм розрахунку (Mathcad).	20.10. 2025	
6	Розробка складальних креслень апаратів та їх складальних одиниць. Добір конструктивних параметрів елементів устаткування.	25.10. 2025	
7	Виконання спеціальних розділів: охорона праці, автоматизація процесу, комп'ютерне моделювання взаємодії потоків.	20.11. 2025	
8	Розробка стартап-проекту. Обґрунтування економічної доцільності модернізації.	20.11. 2025	
9	Уточнення графічної частини проекту та оформлення специфікацій.	25.11. 2025	
10	Оформлення пояснювальної записки. Підготовка матеріалів до захисту (доповідь, презентація).	05.12. 2025	

**Студент**

**Керівник дипломного проекту**

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (підпис)

Андрій СТАСЮК

Сергій ГАЙДАЙ

## РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація на тему: «Модернізація азотно-кисневої установки з розробкою ректифікаційної колони та теплообмінника» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; Керівник С. С. Гайдай. – К., 2025. – 232 с.: іл.

Викон. – А. Ю. Стасюк – Бібліогр.: с. 174.

Пояснювальна записка складається із вступу, 8 розділів, висновків, переліку посилань із 66 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 173 с. основного тексту, 41 рисунок, 41 таблиця і 6 додатків.

Мета проєкту – модернізація теплообмінника та проєктування ректифікаційної колони для схеми азотно-кисневої установки.

Записка містить опис технологічного процесу, конструкцій ректифікаційної колони та теплообмінника, принцип дії їх основних деталей та складальних одиниць. Проведено обґрунтування вибору матеріалів, порівняння основних показників розроблених конструкцій з аналогами, а також патентні дослідження. Виконано конструктивні та параметричні розрахунки, а також перевірку колонного апарата на міцність у програмному середовищі Mathcad, результати яких підтверджують працездатність та надійність запроєктованого обладнання. Наведено рекомендації з монтажу та експлуатації, заходи щодо охорони праці. Визначено рівень стандартизації та уніфікації апаратів. Розроблено систему автоматизації азотно-кисневої установки та стартап-проєкт модернізації апарату.

Графічна частина проєкту включає 13 аркушів, а саме: схеми: технологічна схема – А1, схема автоматизації – А1; складальні креслення: ректифікаційна колона – А1, кожухотрубний теплообмінник – А1, корпус теплообмінника – А1, розподільча камера – А2, решітка трубна – А2, царга колони – А2, тарілка ковпачкова – А2, опора циліндрична – А3; плакати: схема модернізації – А1, результати моделювання – А1.

АЗОТНО-КИСНЕВА УСТАНОВКА, МОДЕРНІЗАЦІЯ,  
РЕКТИФІКАЦІЙНА КОЛОНА, ТЕПЛООБМІННИК, РОЗДІЛЕННЯ  
ПОВІТРЯ, КРІОГЕННА ТЕХНОЛОГІЯ.

## ABSTRACT

Master's dissertation on the topic: "Modernization of the Nitrogen-Oxygen Plant with the Development of a Rectification Column and Heat Exchanger" / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; Supervisor: S. S. Haidai. – Kyiv, 2025. – 231 p.: ill. Author: A. Yu. Stasiuk – Bibliogr.: p. 174.

The explanatory note consists of an introduction, 8 chapters, conclusions, and a list of references containing 66 items. The total volume of the work is 173 pages of the main text, 41 figures, 41 tables, and 6 appendices.

The note contains a description of the technological process, the designs of the rectification column and heat exchanger, and the operating principle of their main parts and assembly units. The selection of materials was substantiated, and a comparison of the main indicators of the developed designs with analogues was carried out, along with patent research. Constructive and parametric calculations were performed, as well as a strength check of the column apparatus in the Mathcad software environment, the results of which confirm the operability and reliability of the designed equipment. Recommendations for installation and operation, as well as measures for labor protection, are provided. The level of standardization and unification of the devices has been determined. An automation system for the nitrogen-oxygen plant and a startup project for the equipment modernization have been developed.

The graphic part of the project includes 13 sheets, namely: diagrams: technological scheme – A1, automation diagram – A1; assembly drawings: rectification column – A1, shell-and-tube heat exchanger – A1, heat exchanger shell – A1, distribution chamber – A2, tube sheet – A2, column shell section – A2, bubble-cap tray – A2, cylindrical support – A3; posters: modernization scheme – A1, simulation results – A1.

NITROGEN-OXYGEN PLANT, MODERNIZATION, RECTIFICATION COLUMN, HEAT EXCHANGER, AIR SEPARATION, CRYOGENIC TECHNOLOGY

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО”**

**Факультет автоматизації, промислової інженерії та екології  
Кафедра машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв**

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА  
ДО МАГІСТЕРСЬКОЇ ДИСЕРТАЦІЇ**

освітнього ступеня «магістр»

**зі спеціальності:** 133 Галузеве машинобудування

**освітня програма (спеціалізація):** Інжиніринг та комп'ютерно-інтегровані технології проектування інноваційного галузевого обладнання

**на тему: Модернізація азотно-кисневої установки з розробкою  
ректифікаційної колони та теплообмінника**

Київ – 2025

## ЗМІСТ

Перелік скорочень, умовних позначень та термінів.....	6
Вступ.....	7
1. Призначення та область використання апарата в технологічній схемі.....	8
1.1 Опис технологічного процесу.....	8
1.2 Вибір типу ректифікаційної колони у технологічній схемі.....	10
2 Технічні характеристика апаратів .....	13
3 Опис та обґрунтування конструкції .....	15
3.1 Конструкція і принцип дії апаратів, їх місце в технологічній схемі .....	15
3.2 Порівняння основних показників розробленої конструкції апарата з аналогами .....	17
3.3 Вибір матеріалів елементів конструкцій апарата (машини).....	21
3.4 Патентне дослідження .....	24
4 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції ректифікаційної колони .....	45
4.1 Параметричний розрахунок ректифікаційної колони .....	45
4.2 Розрахунок штуцерів .....	66
4.3 Розрахунок товщини циліндричної обичайки ректифікаційної колони ...	68
4.4 Розрахунок товщини еліптичного днища ректифікаційної колони.....	71
4.5 Розрахунок колони на вітрове навантаження ректифікаційної колони ....	75
4.6 Розрахунок колонного апарата на міцність.....	85
4.7 Розрахунок колонного апарата на стійкість .....	88
4.8 Розрахунок опорної обичайки колонного апарату .....	94
4.9 Розрахунок фланцевого з'єднання .....	103
4.10 Розрахунок геометричних розмірів деталей для кріплення поодинокого отвору .....	115

Відповідальна організація Кафедра МАХНВ	Технічне узгодження Новохат О.А	Вид документа Звіт	Статус документа			
Власник документа КПІ ім. Ігоря Сікорського	Розробник документа Стасюк А.Ю	Назва, додаткова назва  Звіт з переддипломної практики	ЛМ41мп.066114.001.ПЗ			
	Документ затверджено Гаїдай С.С		Інд. змін	Дата видання	Мова UA	Аркуш 4

4.11 Параметричний розрахунок теплообмінника.....	118
5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях.....	127
5.1 Електронезбезпека.....	128
5.2 Безпека устаткування та технологічних процесів.....	130
5.3 Виробничий шум і вібрація.....	132
5.4 Виробниче освітлення.....	133
5.5 Повітря робочої зони.....	135
5.6 Пожежна безпека.....	136
5.7 Безпека під час роботи установки.....	138
5.8 Надзвичайні ситуації.....	140
6 Рекомендації щодо монтажу та експлуатації апарата.....	144
7 Рівень стандартизації та уніфікації.....	147
8.1 Опис ідеї.....	149
8.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	152
8.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	154
8.4 Стратегічне планування виходу стартап-проекту на ринок.....	164
8.5 Розробка маркетингової стратегії стартап-проекту.....	167
8.6 Висновки до розділу.....	171
Висновки.....	173
Conclusion.....	174
Перелік посилань.....	175
Додаток А Автоматизація технологічного процесу азотно-кисневої установки.....	183
Додаток Б Документація до патентного дослідження.....	196
Додаток В Комп'ютерні розрахунки.....	200
Додаток Г Патенти, використані в патентному пошуку.....	203
Додаток Д Публікації автора.....	213
Додаток Е Комп'ютерне моделювання.....	225

## Перелік скорочень, умовних позначень та термінів

Умовні скорочення:

$G$  - масова продуктивність (витрата), кг/с;

$L$  - масова витрата рідини, кг/с;  $V$  - об'ємна витрата, м<sup>3</sup>/с;

$P$  - тиск, МПа;  $F$  - площа поверхні теплообміну, м<sup>2</sup>;

$t, T$  - температура, °С або К;

$r$  - термічний опір, м<sup>2</sup> · К/Вт;

$c$  - питома теплоємність, Дж/(кг · К);

$Q$  - теплове навантаження (тепловий потік), Вт;

$K$  - коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$S$  - товщина стінки, м;

$E$  - модуль пружності, МПа;

$N$  - потужність, Вт;

$\alpha$  - коефіцієнт тепловіддачі, Вт/(м<sup>2</sup> · К);

$\lambda$  - коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м · К);

$\mu$  - динамічний коефіцієнт в'язкості, Па · с;

$\rho$  - густина, кг/м<sup>3</sup>;

$\sigma$  - напруження в матеріалі, МПа;

$[\sigma]$  - допустиме напруження, МПа;

$\varphi$  - коефіцієнт міцності зварного шва;

$\omega$  - швидкість руху середовища, м/с.

Критерії:

$Nu$  - критерій Нуссельта;

$Pr$  - критерій Прандтля;

$Re$  - критерій Рейнольдса.

## Вступ

Азотно-киснева установка призначена для розділення повітря на його основні компоненти – кисень та азот. Ці продукти є критично важливими для багатьох галузей національної економіки.

Кисень широко застосовують у металургійній, хімічній та нафтопереробній промисловостях, а також у ракетній техніці та для зварювальних робіт. Азот використовують як чистий газ (з концентрацією до 99,998% і вище) для синтезу аміаку, виробництва етилену, пропілену, азотних добрив та в якості інертного середовища [1].

В основі роботи АКУ лежить метод, що базується на різниці температур кипіння компонентів повітря.

Головними апаратами установки є ректифікаційна колона та теплообмінник. У колоні відбувається масообмін: легкий азот збагачує парову фазу, а важчий кисень — рідину, що стікає вниз [2]. Таким чином, у верхній частині колони утворюється газ із високим вмістом азоту, а в нижній – рідина, збагачена киснем.

Теплообмінники (основні або регенератори) у схемі забезпечують попереднє охолодження повітря та регенерацію холоду вихідних потоків. Це ключовий елемент, що дозволяє знизити енергетичні витрати та досягти необхідних криогенних температур [3].

Метою даної дипломної роботи є модернізація азотно-кисневої установки шляхом вдосконалення ректифікаційної колони та теплообмінника для підвищення їхньої ефективності.

Для модернізації теплообмінника в основу було покладено задачу покращення теплообміну в обох просторах (трубному та міжтрубному) шляхом створення турбулентності завдяки використанню конструкції закручених труб.

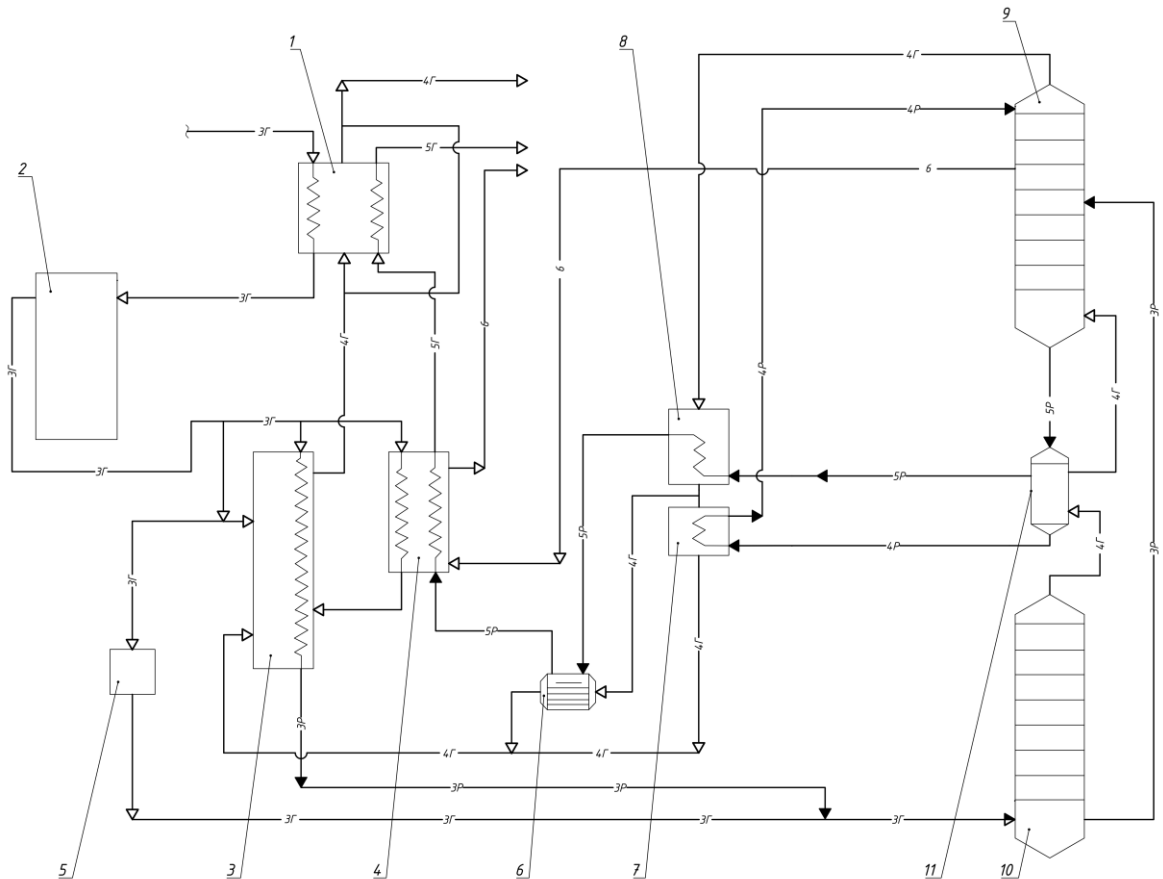
Завдання на проектування видано 1 вересня 2025 року.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 7
----------------------	---------------	-----------------	------	------------

# 1. Призначення та область використання апарата в технологічній схемі

## 1.1 Опис технологічного процесу

Технологічну схему азотно-кисневої установки наведено на рисунку 1.1.



1 – зріджувач; 2 – блок очищення повітря; 3 – теплообмінник азотний; 4 – теплообмінник киснево-фракційний; 5 – детандер (турбодетандер); 6 – насос рідкого кисню; 7 – переохолоджувач рідкого кисню; 8 – переохолоджувач рідкого азоту; 9 – колона ректифікаційна верхня; 10 – колона ректифікаційна нижня; 11 – конденсатор-випарник.

Рисунок 1.1 – Технологічна схема азотно-кисневої установки

В основу роботи установки покладено метод глибокого охолодження з подальшою низькотемпературною ректифікацією.

Атмосферне повітря, попередньо очищене від механічних домішок, піддається стисненню в компресорі до робочого тиску. Після стиснення потік спрямовується до блоку комплексного очищення (2), де відбувається видалення вологи, діоксиду вуглецю та вуглеводнів на молекулярних ситах, що забезпечує безпечну та тривалу експлуатацію кріогенного обладнання.

Підготовлене повітря розділяється на потоки і надходить до блоку теплообмінників для охолодження зворотними потоками продуктів розділення. Основна маса повітря охолоджується в азотному теплообміннику (3), віддаючи тепло газоподібному азоту. Інша частина потоку проходить через киснево-фракційний теплообмінник (4).

Для генерації необхідної холодопродуктивності установки частину повітряного потоку відбирають і направляють у турбодетандер (5). У цьому агрегаті відбувається ізоентропійне розширення газу з виконанням зовнішньої роботи, внаслідок чого температура повітря різко знижується. Охолоджений потік після детандера подається безпосередньо в середню частину верхньої ректифікаційної колони (9).

Решта повітря після попереднього охолодження в теплообмінниках (3, 4) дроселюється і вводиться в нижню ректифікаційну колону (10). У нижній колоні відбувається первинний процес масообміну, в результаті якого кубова рідина збагачується киснем, а у верхній частині колони накопичується газоподібний азот.

Теплова взаємодія між колонами забезпечується конденсатором-випарником (11). Газоподібний азот з нижньої колони конденсується в міжтрубному просторі конденсатора за рахунок кипіння рідкого кисню в трубному просторі (або навпаки, залежно від конструкції). Утворений рідкий азот використовується для флегмового зрошення нижньої колони, а частина його відводиться через переохолоджувач рідкого азоту (8) на зрошення верхньої ректифікаційної колони (9).

Кубова рідина (збагачене киснем повітря) з нижньої колони (10) також проходить процес переохолодження в теплообмінних апаратах для зменшення втрат на пароутворення при дроселюванні та подається на живлення верхньої колони (9). У верхній колоні відбувається остаточне розділення суміші на чистий азот (у верхній частині) та рідкий кисень (у кубі).

Рідкий кисень накопичується в нижній частині конденсатора-випарника (11). Частина продукційного рідкого кисню відбирається насосом (6), попередньо проходячи через переохолоджувач (7) для запобігання кавітації. Насос стискає кисень до необхідного тиску споживача, після чого продукт газифікується в теплообмінниках і подається в лінію нагнітання.

Газоподібний азот, відібраний з верху колони (9), послідовно проходить через переохолоджувачі (8, 7), де відбирає тепло від рідинних потоків, а потім надходить в азотний теплообмінник (3). Там він нагрівається до температури, близької до навколишнього середовища, охолоджуючи при цьому прямий потік повітря

## **1.2 Вибір типу ректифікаційної колони у технологічній схемі**

Ефективність азотно-кисневої установки значною мірою залежить від конструкції її ключових апаратів – ректифікаційної колони та теплообмінника. Саме вони забезпечують розділення повітря на азот і кисень, охолодження та енергетичну ефективність процесу.

Ректифікаційні апарати поділяються на насадкові, тарілчасті та плівкові. Насадкові колони, внутрішній простір яких заповнений насадками, створюють велику поверхню контакту фаз і є простими у виготовленні апаратами з високою питомою продуктивністю, але їх ефективність сильно залежить від рівномірності розподілу рідини [4].

Тарілчасті колони складаються з корпусу (царги), всередині якого розташовані тарілки – ковпачкові, клапанні або сітчасті, – і забезпечують

стабільний масообмін та добре працюють при змінних навантаженнях, тому на практиці саме тарілчасті колони застосовуються найчастіше, зокрема у виробництві кисню та азоту, де потрібна висока чистота продуктів, що обґрунтовує вибір тарілчастої колони для даної установки.

Плівкові колони використовуються рідко через складність конструкції та високу вартість. На рисунку 1.2 зображено конструкції тарілчастої ректифікаційної колони.

На рисунку 1.2 зображено конструкції тарілчастої ректифікаційної колони. Конструкція колони, що включає тарілки для ефективного контакту фаз та розподільчий пристрій для рівномірної подачі рідини, забезпечує високоякісне розділення суміші шляхом конденсації та повторного випаровування. Куб призначений для важких залишків.

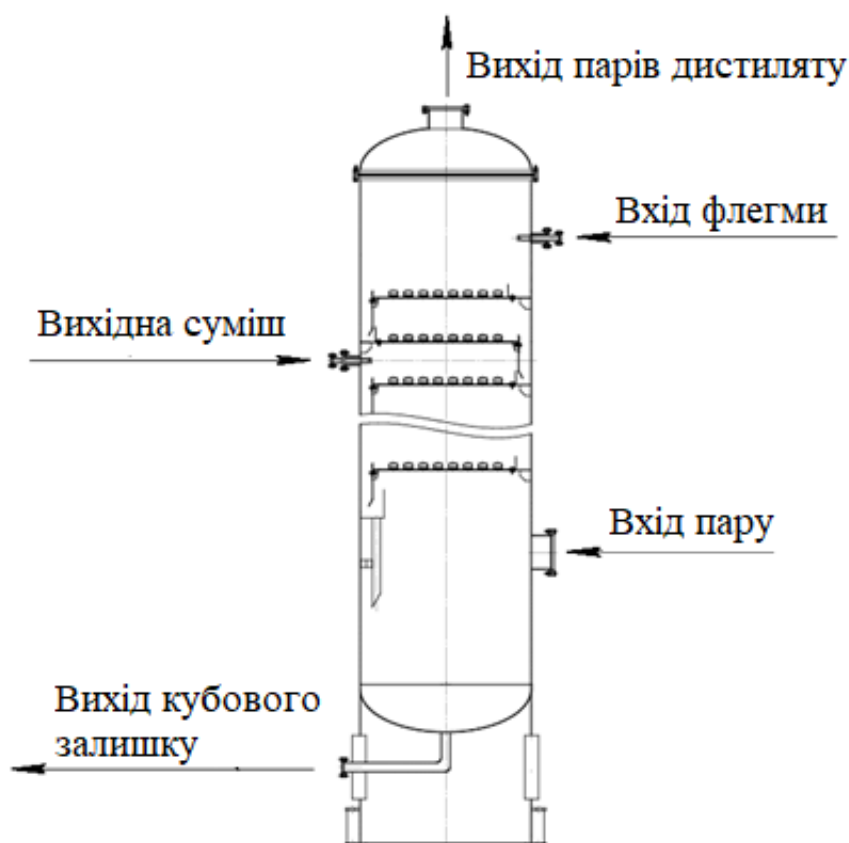


Рисунок 1.2 – Схема конструкції тарілчастої ректифікаційної колони

У кріогенних установках теплообмінники передають теплоту між потоками та підвищують енергоефективність, причому близько 80% усіх промислових теплообмінників становлять саме кожухотрубні, завдяки їх універсальності та надійності.

До стандартних конструкцій належать апарати з нерухомими трубними решітками (Н), з компенсатором на кожусі (К), з розширювачем (Р), з U-подібними трубами (У), з плаваючою головкою (П) та їх комбінації (ПК).

Для даної роботи обрано горизонтальний кожухотрубний теплообмінник, який забезпечує рівномірний розподіл потоків, простоту обслуговування і тривалу безпечну експлуатацію [3].

Схему кожухотрубного теплообмінника наведено на рисунку 1.3.

Конструкція включає пучок труб між двома трубними решітками, кожух із патрубками та сегментні поперечні перегородки для спрямування потоку. Основні вимоги до проектування: максимальна теплопередача, мінімальний гідравлічний опір, компактність та надійність та герметичність з'єднань.

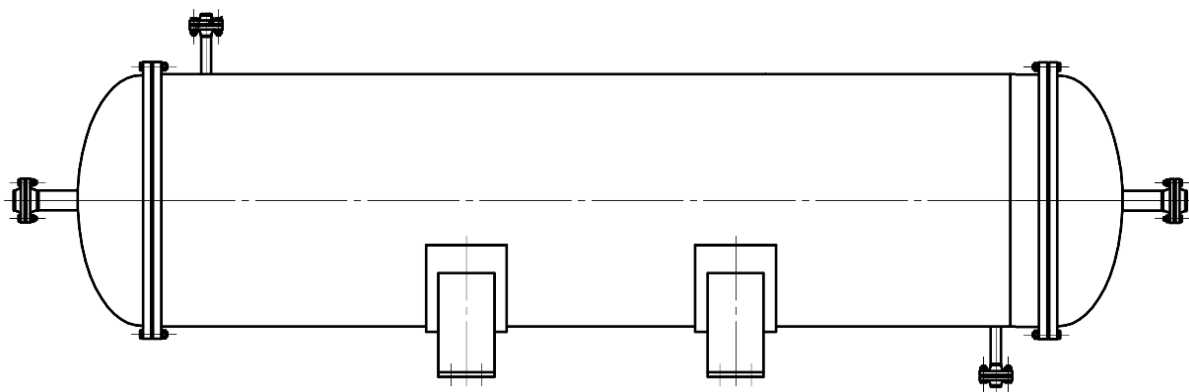


Рисунок 1.3 – Схема конструкції кожухотрубного теплообмінника

## 2 Технічні характеристики апаратів

Технічна характеристика ректифікаційної колони:

Робочий тиск, МПа	0,6;
Розрахунковий тиск, МПа	0,71;
Тиск гідравлічних випробувань, МПа	0,91;
Температура випробувального середовища, °С	5–40;
Максимальна робоча температура, К	90;
Клас небезпеки (робоче середовище)	2;
Пожежонебезпечність (робоче середовище)	1;
Прибавка на корозію та ерозію, мм	2;
Внутрішній об'єм, м <sup>3</sup>	5,3;
Кількість тарілок, одиниць	20;
Витрати вихідної суміші, кг/с	0,8;
Габаритні розміри: висота, м	16;
Габаритні розміри: діаметр, м	0,8.

**Технічна характеристика теплообмінника:**

Температура на вході (Трубний простір), К	96,1;
Температура на виході (Трубний простір), К	87,5;
Розрахунковий тиск (Трубний простір), МПа	0,6;
Тиск гідравлічних випробувань (Трубний простір), МПа	0,77;
Внутрішній об'єм (Трубний простір), м <sup>3</sup>	0,945;
Збільшення на корозію (Трубний простір), мм	2;
Температура на вході (Міжтрубний простір), К	86,9;
Температура на виході (Міжтрубний простір), К	93,5;
Розрахунковий тиск (Міжтрубний простір), МПа	0,6;

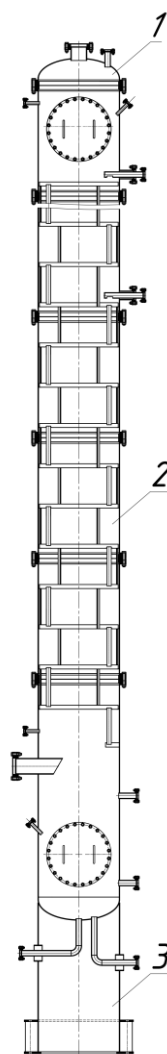
Тиск гідравлічних випробувань (міжтрубний простір), МПа	0,77;
Внутрішній об'єм (Міжтрубний простір), м <sup>3</sup>	1,91;
Збільшення на корозію (Міжтрубний простір), мм	2;
Поверхня теплообміну, м <sup>2</sup>	285;
Об'ємні витрати газу на вході, м <sup>3</sup> /с	3,7;
Тиск в апараті, МПа	0,6;
Габаритні розміри: Довжина, м	9;
Габаритні розміри: Діаметр, м	0,8.

### 3 Опис та обґрунтування конструкції

#### 3.1 Конструкція і принцип дії апаратів, їх місце в технологічній схемі

У магістерській дисертації розробляється конструкція ректифікаційної колони та кожухотрубного теплообмінника.

Схеми конструкцій апаратів, що проєктуються наведено на рисунках 3.1 та 3.2



1 – кришка; 2 – корпус; 3 – циліндрична опора.

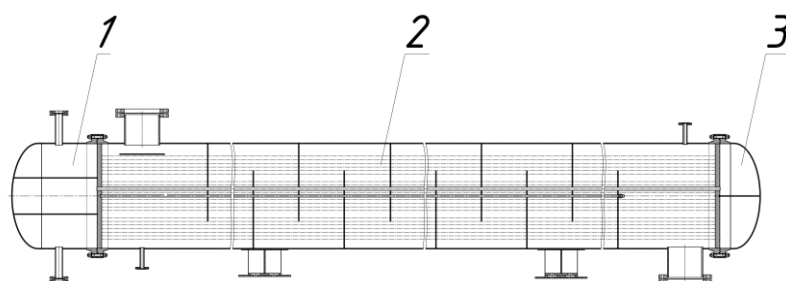
Рисунок 3.1 – Схема ректифікаційної колони, що проєктується

Ректифікаційна колона є ключовим вертикальним масообмінним апаратом, призначеним для фракційного розділення багатокomпонентних рідких сумішей. Принцип роботи ґрунтується на реалізації багаторазових процесів фракційної конденсації та випаровування (комплексного тепло- і масообміну) між зустрічними потоками рідини (флегми) і пари, що рухаються по колоні [2].

Основною метою є забезпечення інтенсивного та ефективного контакту між цими фазами, що дозволяє розділити компоненти суміші за їхньою відносною леткістю, тобто різницею в температурі кипіння.

Конструктивно ректифікаційна колона складається з корпусу (царги) та кришки з днищем, які формують герметичний простір для протікання процесу. Опора забезпечує надійне вертикальне положення конструкції на фундаменті.

Внутрішній простір апарату оснащений контактними пристроями – тарілками (клапанного, сітчастого чи ковпачкового типу) або насадками (регулярними чи нерегулярними), які створюють необхідну поверхню взаємодії фаз та формують теоретичні ступені розділення [4].



1 – розподільча камера; 2 – корпус; 3 – кришка.

Рисунок 3.2 – Схема кожухотрубного теплообмінника, що проєктується

Кожухотрубний теплообмінник є найпоширенішим і найважливішим типом теплообмінних апаратів у промисловості, зокрема у криогенних установках, де він забезпечує ефективну передачу теплоти між двома середовищами (холодним і гарячим потоками) з метою енергетичної рекуперації та досягнення необхідних температурних режимів.

Принцип його роботи ґрунтується на конвективному теплообміні через розділяючу стінку — пучок труб. Конструктивно такий апарат складається з горизонтального або вертикального кожуха (зовнішньої обичайки) та розташованого всередині пучка теплообмінних труб, закріпленого в трубних решітках [3].

Один теплоносій рухається всередині труб (трубний простір), а інший у просторі між трубами та кожухом (міжтрубний простір).

Сегментні поперечні перегородки (дефлектори), розміщені в міжтрубному просторі, слугують для збільшення швидкості потоку, що створює турбулентність, інтенсифікує теплообмін та запобігає застійним зонам.

Розподільчі камери (кришки) забезпечують вхід та вихід середовища, що рухається по трубах.

### **3.2 Порівняння основних показників розробленої конструкції апарата з аналогами**

Ректифікаційні колони являють собою вертикальні циліндричні апарати з корпусом суцільнозварного або царгового типу, що оснащуються опорними вузлами для стійкості конструкції.

За способом організації контакту фаз апарати поділяють на насадкові, плівкові та тарілчасті, причому останні можуть мати нероз'ємну або розбірну конструкцію залежно від умов експлуатації [2].

У рамках порівняння існуючих рішень доцільно розглянути специфічні типи контактних пристроїв, що є аналогами до апарату, що проектується [4].

Аналог 1 (Сітчаста тарілка): Конструкція являє собою простий перфорований диск з отворами діаметром 2...8 мм, що забезпечує низьку металоємність та малий гідравлічний опір. Головним недоліком є вузький

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 17
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

діапазон стійкої роботи та схильність до провалювання рідини при зниженні тиску газу.

Аналог 2 (Тарілка з тунельними ковпачками): Контактні елементи виконані у вигляді прямокутних жолобів, накритих довгими ковпаками, що спрощує їх очищення . Проте такі тарілки мають нижчу ефективність масообміну та значно вищу металоємність порівняно з круглими ковпачками .

Аналог 3 (Тарілка з S-подібними елементами): Використовує профільовані елементи, що організують прямоточний рух фаз, підвищуючи продуктивність на 20–30%. Ефективність роботи критично залежить від герметичності торців каналів та точності виготовлення складного профілю.

Аналог 4 (Пластинчаста тарілка): Складається з похилих пластин, що забезпечують рух фаз у прямотоці, мінімізуючи гідравлічний опір. Суттєвим недоліком є низька ефективність розділення при малих навантаженнях по рідині та складність відведення тепла.

Окрему групу технологічного обладнання становлять кожухотрубні теплообмінники, основою класифікації яких є конструктивне рішення щодо компенсації теплових деформацій. Відповідно до цього критерію виділяють апарати з жорстким кожухом, напівжорсткою конструкцією та апарати, що забезпечують вільне подовження труб.

У рамках порівняння існуючих рішень доцільно розглянути специфічні типи теплообмінного обладнання, що є аналогами до апарату, що проєктується [3]:

Аналог 1 (Апарат з лінзовим компенсатором — Тип К): Конструкція передбачає наявність пружних елементів (лінз) на корпусі, що дозволяє частково компенсувати температурні подовження. Суттєвим недоліком є обмеження робочого тиску в міжтрубному просторі через недостатню жорсткість компенсатора та зниження загальної надійності корпусу .

Аналог 2 (Апарат з плаваючою головкою — Тип П): Одна з трубних решіток має вільний хід, що забезпечує повну компенсацію деформацій та можливість виймання трубного пучка. Проте така конструкція є найбільш металоємною, складною у виготовленні та має високу вартість, що не завжди виправдано при помірних перепадах температур .

Аналог 3 (Апарат з U-подібними трубами — Тип У): Забезпечує вільне температурне подовження труб завдяки їхній формі, що дозволяє відмовитися від рухомих вузлів на корпусі. Головним недоліком є неможливість механічного очищення внутрішньої поверхні труб, що робить цей апарат непридатним для роботи із забрудненими середовищами.

Аналог 4 (Апарат з сальниковим компенсатором — Тип С): Компенсація деформацій здійснюється за рахунок переміщення трубної решітки, що ущільнюється сальниковою набивкою. Основною проблемою є низька надійність герметизації, ризик витоків продукту та необхідність частого обслуговування сальникового вузла.

Узагальнена порівняльна характеристика зазначених типів обладнання наведена у таблиці 3.2.

Висновки: Розроблена конструкція тарілчастої колони з ковпачками набрала найбільшу кількість балів (18), тому цей тип є доцільним у використанні, оскільки його домінування над аналогами забезпечується унікальною стабільністю гідравлічного режиму при змінних навантаженнях та вищою надійністю завдяки відсутності рухомих елементів.

Конструкція теплообмінника з нерухомими трубними решітками, що також отримала найвищу оцінку (20 балів), прийнята до розробки завдяки поєднанню максимальної герметичності корпусу з можливістю механічного очищення трубного простору, що є критичною експлуатаційною перевагою над альтернативними варіантами.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 19
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика колонних апаратів

Основні показники	Апарат, що проектується (Ковпачкова)	Аналог 2 (Тунельна)	Аналог 3 (S-подібна)	Аналог 4 (Пластинчаста)	Аналог 1 (Сітчаста)
Ефективність розділення (ККД), (бали)	Висока (0.75-0.8), (4)	Середня, (2)	Висока, (3)	Низька при малих навант., (1)	Середня, (2)
Діапазон стійкої роботи, (бали)	Широкий, (4)	Широкий, (3)	Середній, (2)	Вузький, (1)	Вузький, (1)
Експлуатаційна надійність, (бали)	Висока, (4)	Висока, (3)	Середня, (2)	Середня, (3)	Низька, (1)
Гідравлічний опір, (бали)	Підвищений, (2)	Середній, (2)	Низький, (4)	Низький, (4)	Низький, (4)
Універсальність застосування, (бали)	Висока, (4)	Середня, (3)	Середня, (2)	Низька, (1)	Низька, (1)
Сума балів	18	13	13	10	9

Таблиця 3.2 – Порівняльна характеристика теплообмінників

Показник	Апарат, що проектується (Тип Н - Нерухомі решітки)	Аналог 1 (Тип К - Компенсатор)	Аналог 2 (Тип П - Плаваюча головка)	Аналог 3 (Тип У - U-подібний)	Аналог 4 (Тип С - Сальниковий)
Простота конструкції, (бали)	Висока, (4)	Середня, (3)	Низька, (1)	Середня, (3)	Низька, (2)
Металоємність (Вартість), (бали)	Низька, (4)	Середня, (3)	Висока, (1)	Середня, (3)	Середня, (2)
Надійність герметизації, (бали)	Висока, (4)	Середня, (3)	Висока, (4)	Висока, (4)	Низька, (1)
Ремонтопридатність (очищення труб), (бали)	Висока, (4)	Висока, (4)	Висока, (4)	Низька, (1)	Висока, (4)
Жорсткість корпусу, (бали)	Висока, (4)	Низька, (2)	Висока, (4)	Висока, (4)	Середня, (3)
Сума балів	20	15	14	15	12

### 3.3 Вибір матеріалів елементів конструкцій апарата (машини)

Вибір матеріалів для елементів конструкцій ректифікаційної колони та кожухотрубного теплообмінника базується на необхідності забезпечення їх надійної експлуатації у специфічних умовах. Обрані матеріали повинні відповідати критеріям міцності, стійкості, зокрема хладостійкості, а також корозійної стійкості.

Оскільки процес ректифікації бінарної суміші азот-кисень відбувається за криогенних температур, визначальною вимогою до матеріалів є їхня хладостійкість (здатність зберігати ударну в'язкість та пластичність за низьких температур) [4].

При цьому враховується, що робоче середовище є корозійно неактивним.

Властивості обраних матеріалів наведено у таблиці 3.3.

Таблиця 3.3. Властивості використаних матеріалів для ректифікаційної колони [3].

Елемент	Рекомендований матеріал	Температура застосування	Обґрунтування
1	2	3	4
Корпус колони, Тарілки, Внутрішні пристрої	Нержавіюча сталь аустенітного класу (наприклад, 08X18H10T або 12X18H10T)	До $-253^{\circ}\text{C}$	Необхідна холодна стійкість і міцність при криогенних температурах, не піддається холодноламкості.
Опори колони	Низьколегована сталь (наприклад, 09Г2С)	До $-40^{\circ}\text{C}$ (або нижче для 09Г2С-6)	Обирається матеріал з достатньою міцністю та хладостійкістю відповідно до кліматичного району установки.

Продовження таблиці 3.3

1	2	3	4
Кріпильні елементи (Болти, гайки)	Низьколегована сталь (наприклад, 09Г2С) або Нержавіюча сталь	До $-40^{\circ}\text{C}$ (або нижче)	Вибір згідно з вимогами до міцності і холодостійкості при робочих навантаженнях.

Аналогічні критерії застосовуються при проектуванні кожухотрубного теплообмінника, що працює з криогенними теплоносіями (система азот-кисень) [3].

Пріоритетними характеристиками є холодостійкість та забезпечення необхідної механічної міцності за низьких температур, з урахуванням відсутності агресивного впливу робочого середовища.

Характеристики матеріалів подано у таблиці 3.4.

Таблиця 3.4. Властивості використаних матеріалів для кожухотрубного теплообмінника [3].

Елемент	Рекомендований матеріал	Обґрунтування вибору
1	2	3
Кожух, Трубні решітки, Теплообмінні труби	Нержавіюча сталь аустенітного класу (наприклад, 12X18Н10Т)	Оптимальний вибір для криогенної техніки, забезпечує високу холодну стійкість та корозійну стійкість, навіть при контактах з вологою.
Прокладки	Матеріали з хорошою еластичністю при низьких температурах (наприклад, фторопласт)	Забезпечення герметичності при наднизьких температурах, де звичайна гума втрачає еластичність.

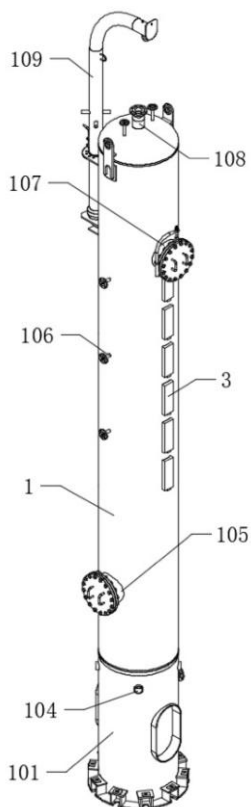
Продовження таблиці 3.4

1	2	3
Кріпильні деталі	Низьколегована сталь (наприклад, 09Г2С) або Нержавіюча сталь	Вибір згідно з вимогами до міцності та холодостійкості (важливо для зовнішніх елементів).
Опори (Сідлові)	Вуглецева сталь (наприклад, Ст3сп)	Опори не контактують з кріогенним середовищем; обирається матеріал з достатньою міцністю та є економічно вигідним.

### 3.4 Патентне дослідження

#### Обладнання та технологія ректифікації метиламіну з системою регулювання та очищення

На рисунку 3.3 наведено конструкцію ректифікаційної колони зі змінним кроком тарілок та системою самоочищення (CN 119971537 A, дата публікації 13.05.2025) [5].



1 – корпус колони; 3 – вузол регулювання (механізм зміни міжтарілчаної відстані); 101 – опорна спідниця; 104 – вентиляційний отвір; 105 – патрубок введення пари (паровий ввід); 106 – патрубок подачі рідини (ввід сировини); 107 – патрубок повернення флегми (рефлюксна труба); 108 – патрубок відведення пари; 109 – верхня підйомна стійка (вузол для стропування).

Рисунок 3.3 – Загальний вигляд корпусу ректифікаційної колони з елементами регулювання

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 24
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

Винахід пропонує ректифікаційну колону для розділення метиламінів, оснащenu системою активного керування гідродинамікою. Внутрішні контактні тарілки закріплені на рухомих елементах, що дозволяє змінювати відстань між ними в реальному часі для запобігання «захлинуванню» колони. Керування переміщенням внутрішніх вузлів здійснюється через розташовані на корпусі (1) вузли регулювання (3).

Додатково, під кожною тарілкою передбачено систему вібраційного очищення, яка складається з підпружинених ударників та збірних колекторів. При ініціюванні руху механізму відбувається збивання відкладень з отворів тарілок, а спеціальні колектори збирають рідину для детектування режиму «провалу». Подача теплоносія здійснюється через нижній патрубок (105), сировини через бічний патрубок (106), а відведення продуктів розділення через верхній патрубок (108).

#### Переваги конструкції:

- Можливість оперативного усунення режимів захлинування шляхом збільшення міжтарілчаної відстані без зупинки технологічного процесу.
- Автоматичне очищення парових отворів від полімерів та солей за допомогою вібраційного впливу, що подовжує міжремонтний цикл.
- Раннє виявлення режиму «провалу» рідини завдяки вбудованій системі моніторингу.
- Ефективне очищення переливних пристроїв від шламу за допомогою інтегрованих скребків.

#### Недоліки конструкції:

- Надзвичайна складність механічної частини (наявність гвинтових передач та шарнірів усередині агресивного середовища).
- Висока вартість виготовлення та технічного обслуговування

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 25
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

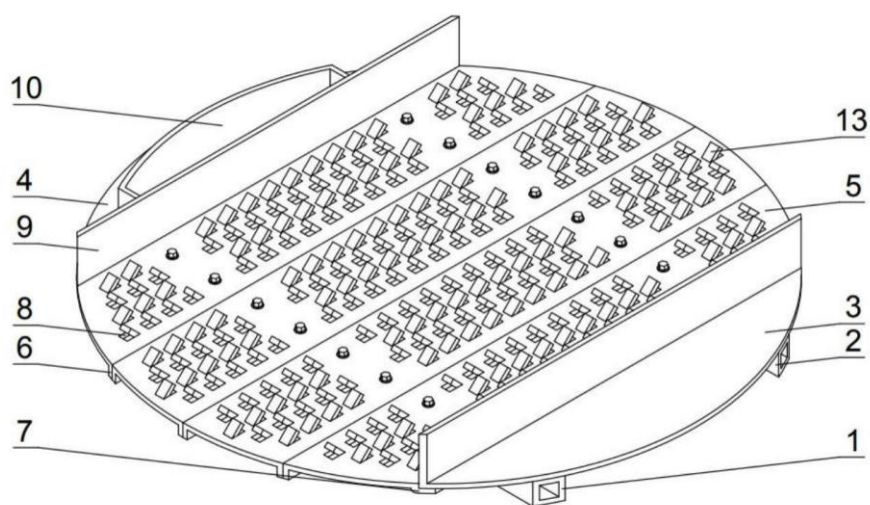
приводів регулювання.

– Ризик розгерметизації рухомих з'єднань між внутрішніми елементами та корпусом колони.

– Необхідність впровадження складної системи автоматичного керування для синхронізації руху всіх рівнів тарілок.

### **Модульна конструкція тарілки для ректифікаційної колони**

На рисунку 3.4 наведено розбірну конструкцію тарілки (CN 223516961 U, дата публікації 07.11.2025) [6].



1 – перша опорна балка; 2 – друга опорна балка; 3 – приймальна планка (сегмент); 4 – зливна планка (сегмент); 5 – робоча панель тарілки; 6 – обмежувальний борт; 7 – фіксуючий борт; 8 – фільтраційний отвір; 9 – переливна перегородка; 10 – зливна труба; 11 – обмежувальний паз; 12 – фіксуючий паз; 13 – фіксуючий язичок (відгиб).

Рисунок 3.4 – Розбірна тарілка ректифікаційної колони

Суть винаходу полягає у відмові від традиційної суцільної конструкції тарілки на користь модульної системи для полегшення обслуговування. Конструкція базується на використанні першої (1) та другої (2) опорних балок,

на яких монтуються окремі сегменти: приймальна планка (3), зливна планка (4) та набір робочих панелей (5).

З'єднання елементів забезпечується системою замків: обмежувальні (6) та фіксуючі (7) борти панелей входять у відповідні пази (11, 12) на опорних балках. Для інтенсифікації масообміну над фільтраційними отворами (8) виконані спеціальні фіксуючі язички (13), отримані методом вирубки та відгину, що подовжує час контакту рідини та газу.

#### Переваги конструкції:

- Значне спрощення монтажу та технічного обслуговування завдяки можливості розбирання тарілки на окремі сегменти (відсутність необхідності повного демонтажу колони).
- Зручність транспортування та заміни окремих пошкоджених робочих панелей.
- Збільшення ефективності масообміну завдяки конструкції язичків (13), які змінюють траєкторію руху парорідинного потоку.
- Надійна фіксація елементів та компенсація теплових розширень завдяки пазовій системі кріплення на балках.

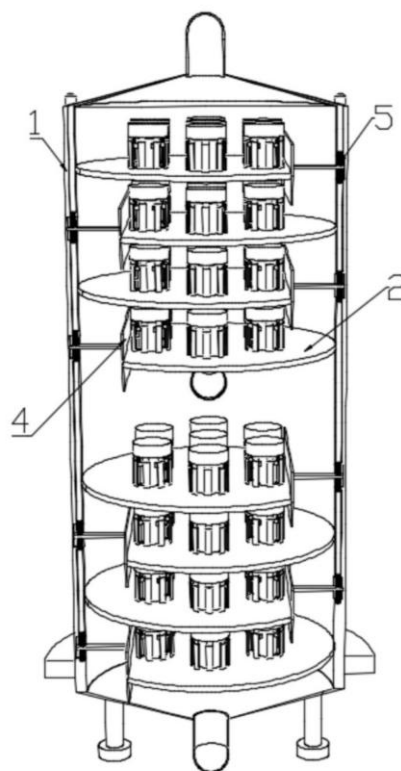
#### Недоліки конструкції:

- Збільшена кількість стикових з'єднань, що підвищує ризик протікання рідини повз робочі зони (байпасування) при неякісному монтажі.
- Підвищена трудомісткість виготовлення опорних балок з точними пазами та монтажних робіт усередині апарата.
- Ризик накопичення відкладень у пазах (11, 12), що може ускладнити демонтаж сегментів після тривалої експлуатації.
- Зниження загальної жорсткості конструкції порівняно із суцільнозварними тарілками.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 27
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

## Механічне обладнання для хімічної ректифікації

На рисунку 3.5 наведено схему ректифікаційної тарілки з інтегрованим механізмом руйнування піни (CN 120733373 А, дата публікації 03.10.2025) [7].



1 – корпус колони; 2 – полотно тарілки; 3 – паровий (газовий) канал; 6 – механізм очищення; 10 – напрямний циліндр; 13 – рухома верхня кришка (клапан); 15 – конічний руйнівник (шип); 61 – поплавець; 65 – штовхач; 66 – пластина штовхача; 67 – зубчасті елементи (профільовані виступи).

Рисунок 3.5 – Ректифікаційна тарілка з інтегрованим механізмом руйнування піни

Основним принципом роботи запропонованої конструкції є утилізація кінетичної енергії киплячого шару рідини на тарілці (2) для механічного руйнування газової плівки та піни, що утворюються у зоні парових каналів (3).

Поплавець (61), розміщений на поверхні рідини, здійснює вертикальні коливальні рухи, амплітуда яких залежить від інтенсивності кипіння та зміни рівня рідини. Через кінематичну систему зв'язків цей рух передається на

штовхач (65) і пластину (66), оснащену зубчастими елементами (67), що розташовані безпосередньо у прохідному перерізі парового каналу. Одночасно зусилля передається на верхню рухомию кришку (13), обладнану конічними руйнівниками (15). Така взаємодія забезпечує безперервне механічне руйнування поверхневого натягу бульбашок газу без використання зовнішніх джерел енергії, що сприяє інтенсифікації фазового контакту.

#### Переваги конструкції:

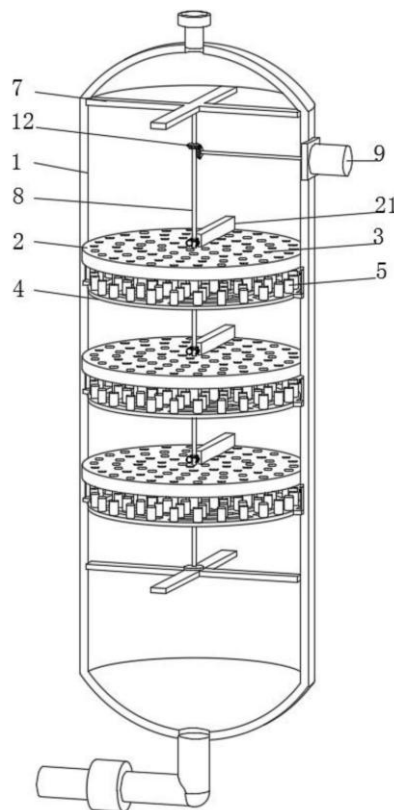
- Автономність роботи механізму очищення за рахунок використання гідродинамічної енергії барботажного шару (відсутність зовнішнього приводу).
- Підвищення ефективності масообміну завдяки примусовій деструкції газової плівки та піни в зоні контакту фаз.
- Саморегулювання процесу: інтенсивність механічного впливу прямо пропорційна інтенсивності кипіння рідини.
- Зниження експлуатаційних витрат та енергоємності технологічного процесу.

#### Недоліки конструкції:

- Висока конструктивна складність тарілки, зумовлена наявністю значної кількості дрібних рухомих вузлів.
- Знижена надійність через ризик механічного заклинювання, втому пружин або корозійного зносу елементів в агресивних середовищах.
- Зростання гідравлічного опору потоку пари (газу) через розміщення конструктивних елементів у прохідних перерізах каналів.
- Висока трудомісткість монтажних робіт та складність технічного обслуговування під час капітальних ремонтів колони.

## Захисний компонент для запобігання засміченню ректифікаційної колони

На рисунку 3.6 наведено конструкцію захисного компонента проти засмічення (CN 120884913 А, дата публікації 04.11.2025) [8].



1 – корпус колони; 2 – полотно тарілки; 3 – фільтрувальний канал (перфораційний отвір); 4 – рухома кільцева рама; 5 – очисний шток (плунжер); 6 – сполучний вузол; 21 – корпус вузла вивантаження; 22 – шнековий транспортер; 24 – ведений ролик; 25 – скребкова лопать; 30 – похила напрямна площина.

Рисунок 3.6 – Вузол механічного очищення та видалення твердих домішок

Вдосконалення полягає в інтеграції активної системи очищення перфорації контактної тарілки для роботи із забрудненими середовищами. Конструктивно система реалізована у вигляді набору концентричних кільцевих рам (4), на яких жорстко закріплені вертикальні очисні штоки (5).

Під дією приводного механізму рама здійснює періодичний вертикальний рух, внаслідок чого штоки входять у фільтрувальні канали (3), забезпечуючи механічне видалення (виштовхування) накопиченої твердої фази та осаду. Після циклу очищення штоки повертаються у вихідне положення, відновлюючи вільний прохідний переріз для потоку.

Відокремлені забруднення акумулюються на поверхні тарілки та, за допомогою системи оберткових скребкових лопатей (25) і похилої напрямної (30), транспортуються до приймального бункера шнекового транспортера (22), який забезпечує їх безперервне виведення за межі апарата.

#### Переваги конструкції:

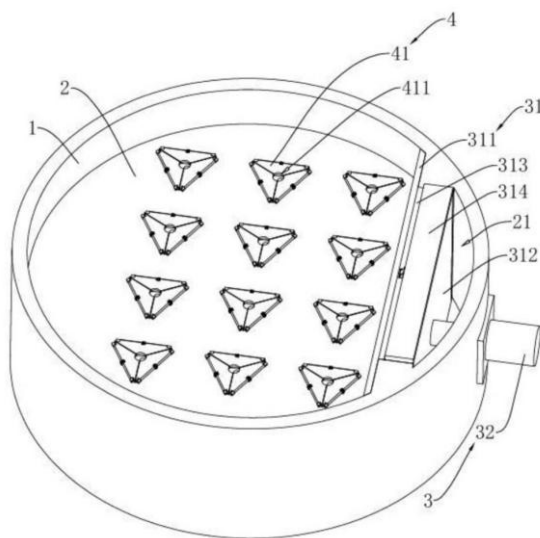
- Ефективне запобігання засміченню фільтрувальних каналів завдяки системі примусового механічного очищення.
- Забезпечення безперервності технологічного процесу: видалення твердих домішок відбувається без зупинки колони.
- Стабілізація гідродинамічного режиму роботи тарілки завдяки підтриманню постійного живого перерізу отворів.
- Автоматизація регламентних робіт та зниження трудовитрат на обслуговування.

#### Недоліки конструкції:

- Істотне ускладнення внутрішньої архітектури колони та конструкції тарілки.
- Зниження надійності системи через наявність рухомих кінематичних пар (шнек, лопаті, штоки) у корозійно-активному середовищі.
- Збільшення металоємності та собівартості виготовлення обладнання.
- Необхідність організації додаткових герметичних вводів обертання та поступального руху.

## Високо- та низьконапірна тарілка для ректифікації

На рисунку 3.7 зображено конструкцію масообмінної тарілки з адаптивною конфігурацією (CN 120919667 А, дата публікації 11.11.2025) [9].



1 – корпус колони; 2 – полотно приймальної тарілки; 3 – вузол регульованого переливу; 4 – механізм регулювання вільного перерізу (газових каналів); 5 – приводний механізм; 21 – переливний отвір; 41 – сегмент тарілки низького тиску; 42 – сегмент тарілки високого тиску; 51 – приводне кільце; 52 – виконавчий механізм (привід) контуру низького тиску; 53 – виконавчий механізм контуру високого тиску; 311 – перша переливна перегородка; 312 – друга переливна перегородка; 313, 314 – регулювальні пластини переливу.

Рисунок 3.7 – Конструкція масообмінної тарілки з адаптивною конфігурацією

Винахід дозволяє змінювати геометричну конфігурацію контактної тарілки для роботи в режимах високого або низького тиску без необхідності розгерметизації колони та демонтажу внутрішніх пристроїв.

Для переведення апарата в режим високого тиску приводний циліндр (32) зміщує другу переливну перегородку (312). Це зусилля через важільну систему передається на регулювальні пластини (313, 314), що призводить до

збільшення висоти переливного порога. Синхронно з цим приводний механізм (5) змінює положення сегментів тарілки (42), перекриваючи канали великого перерізу та вводячи в роботу газові патрубки меншого діаметра (для створення необхідного перепаду тиску).

У режимі низького тиску процес відбувається у зворотному порядку: висота переливу зменшується для зниження гідравлічного опору рідини, а вільний переріз для проходу газу збільшується шляхом відкриття сегментів низького тиску (41).

#### Переваги конструкції:

– Багатофункціональність апарата: реалізація концепції «одна колона – різні технологічні режими» (універсалізація під широкий діапазон робочих тисків).

– Експлуатаційна гнучкість: можливість оперативної зміни гідродинамічного режиму без тривалих простоїв на переобладнання.

– Оптимізація гідродинаміки потоків (швидкості пари та рідини) індивідуально під кожен режим, що забезпечує високий ККД розділення.

– Зниження капітальних витрат завдяки відсутності необхідності встановлення двох окремих колон для різних процесів.

#### Недоліки конструкції:

– Надмірна кінематична складність тарілки через велику кількість рухомих вузлів (важелі, шарніри, приводи) всередині апарата.

– Низька надійність системи перемикачів в умовах реальної експлуатації (ризик корозії, заклинювання продуктами розкладу).

– Проблематичність забезпечення повної герметичності рухомих засувок, що може призводити до байпасування (проскакування) газу повз контактну зону.

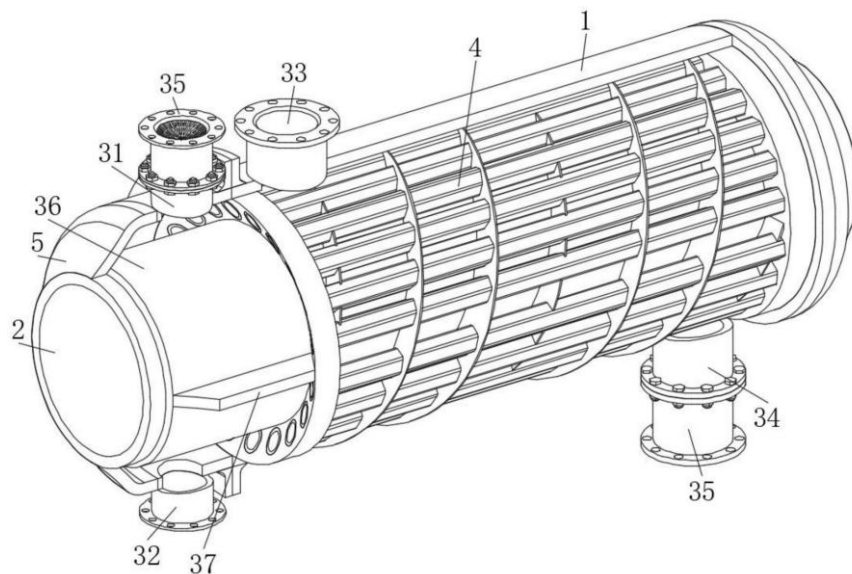
–

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 33
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

– Висока собівартість виготовлення та складність регламентного обслуговування.

### **Кожухотрубний теплообмінник (випарник) з системою керування потоком**

На рисунку 3.8 зображено конструкцію кільцевого кожухотрубного теплообмінника із вбудованою системою фільтрації та елементами турбулізації потоку (CN 120926778 А, дата публікації 11.11.2025) [10].



1 – зовнішній корпус (кожух); 2 – внутрішній циліндр; 4 – теплообмінний вузол (пучок труб); 5 – торцева кришка; 31 – вхідний патрубок трубного простору; 32 – вихідний патрубок трубного простору; 33 – вихідний патрубок міжтрубного простору; 34 – вхідний патрубок міжтрубного простору; 35 – фільтрувальний вузол; 36 – циліндрична вставка; 37 – розділова перегородка.

Рисунок 3.8 – Загальний вигляд кільцевого кожухотрубного теплообмінника

Винахід призначений для підвищення ефективності теплообміну та запобігання утворенню відкладень (накипу, бруду) у важкодоступних зонах апарата.

Робоче середовище трубного простору подається через вхідний патрубок (31), проходячи через фільтрувальний вузол (35) для попереднього очищення. Потік потрапляє у порожнину торцевої кришки (5), де розділова перегородка (37) спрямовує його у верхню частину пучка труб теплообмінного вузла (4). Пройшовши по трубах, рідина розвертається у задній частині апарата і повертається по нижній частині пучка, виходячи через патрубок (32).

Середовище міжтрубного простору подається через нижній патрубок (34), також оснащений фільтрувальним вузлом (35), проходить через кільцевий зазор між зовнішнім корпусом (1) та внутрішнім циліндром (2), омиваючи теплообмінний вузол (4), і виводиться через верхній патрубок (33).

Для запобігання засміченню трубні решітки мають вигнуту (сферичну) форму, що зменшує лобовий опір та накопичення бруду на вході в труби. Самі теплообмінні труби у вузлі (4) оснащені гільзами шестигранної форми та спіральними перегородками для створення турбулентності, що перешкоджає осадженню частинок.

#### Переваги конструкції:

- Зниження ймовірності накопичення відкладень на вході в труби завдяки дугоподібній (сферичній) формі трубних решіток, що зменшує лобовий удар потоку.
- Захист внутрішніх порожнин від механічних домішок шляхом інтеграції знімних фільтрувальних вузлів (35) безпосередньо на вхідних патрубках.
- Інтенсифікація теплообміну та створення ефекту самоочищення стінок за рахунок використання шестигранних гільз та спіральних перегородок, що викликають турбулізацію потоку.
- Реалізація системи самоочищення сіток без застосування зовнішніх джерел енергії (приводу).

– Подовження інтервалів між технічним обслуговуванням завдяки наявності конусних вставок у трубах, які локально прискорюють потік і перешкоджають адгезії накипу.

Недоліки конструкції:

– Підвищений гідравлічний опір апарата, зумовлений наявністю фільтрів та складних турбулізаторів (конусів) усередині потоку.

– Значна складність та висока вартість виготовлення внутрішніх елементів теплообмінника (шестигранні профілі, спіральні перегородки).

– Ускладнене механічне очищення міжтрубного простору у випадку потрапляння дрібних часток, які пройшли крізь фільтр, через складну геометрію каналів.

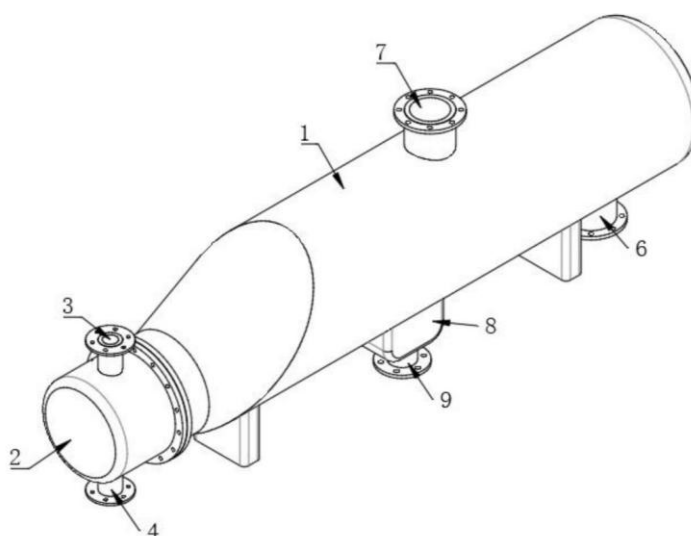
– Ризик порушення герметичності у ковзному з'єднанні між внутрішнім циліндром (2) та торцевою кришкою (5), яке необхідне для компенсації теплових розширень.

### **Пристрій для підвищення ефективності реакції диспропорціонування**

На рисунку 3.9 зображено реактор-ребойлер з інтенсифікованим масообміном (CN 120961110 А, дата публікації 18.11.2025) [11].

Принцип роботи апарата полягає в інтенсифікації процесу змішування рідких реагентів (зокрема, фенолу та диметилкарбонату) перед їх подачею у зону нагріву.

Вихідні компоненти надходять через патрубки (9) та (10) у камеру змішування (8). Конструкція камери, оснащеної вигнутими патрубками (19) та дугоподібною перегородкою (13), забезпечує організацію зустрічних потоків, їх зіткнення та подальшу турбулізацію суміші



1 – корпус ребойлера; 2 – торцева кришка; 3 – патрубок подачі теплоносія (пари); 4 – патрубок відведення конденсату; 6 – патрубок відведення кубового залишку (рідкої фази); 7 – патрубок відведення парогазової фази; 8 – камера змішування; 9 – патрубок введення першого реагенту; 10 – патрубок введення другого реагенту; 13 – дугоподібна перегородка; 14 – переливна пластина; 16 – стаціонарна сітка піногасника (перший ступінь); 18 – поплавець; 19 – вигнуті патрубки подачі; 20 – переливний отвір; 25 – з'єднувальна тяга (планка); 30 – рухома сітка піногасника (другий ступінь).

Рисунок 3.9 – Реактор-ребойлер з інтенсифікованим масообміном

Гомогенізована суміш надходить у робочий об'єм корпусу (1), де нагрівається за рахунок теплообміну з парою (вхід через патрубок 3). У процесі кипіння утворюється легка фракція, яка виводиться через патрубок (7).

Апарат оснащено адаптивною системою піногасіння. Рухома сітка (30) кінематично з'єднана з поплавцем (18), що дозволяє їй автоматично позиціонуватися відносно поточного рівня рідини. Вертикальне переміщення поплавця також приводить у дію механізм механічного очищення (скребкового типу) для стаціонарної сітки (16), що запобігає її кольматації (забрудненню) продуктами реакції.

#### Переваги конструкції:

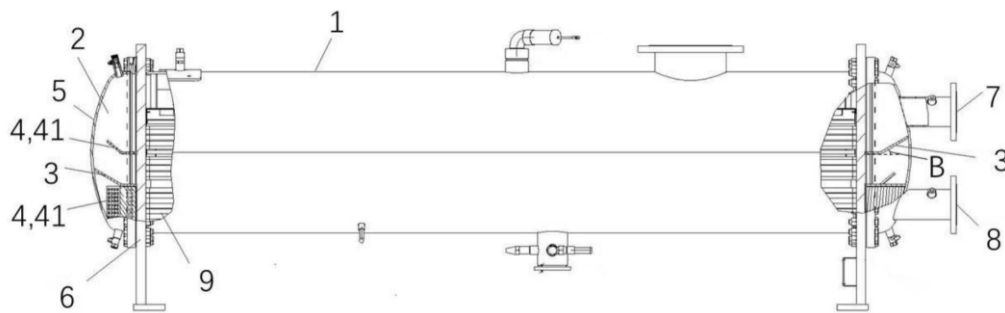
- Істотне скорочення часу гомогенізації та покращення контакту фаз завдяки гідродинамічним особливостям камери змішування.
- Підвищена ефективність сепарації піни за рахунок двоступеневої системи сітчастих елементів.
- Автоматичне регулювання робочого положення піногасника залежно від коливань рівня рідини.
- Реалізація системи самоочищення сіток без застосування зовнішніх джерел енергії (приводу).
- Мінімізація краплинного винесення рідини разом із газовою фазою.

#### Недоліки конструкції:

- Наявність усередині корпусу складних рухомих механічних вузлів (поплавцевий механізм, шарнірні з'єднання, направляючі).
- Ризик заклинювання рухомих елементів внаслідок корозії або накопичення твердих відкладень.
- Низька ремонтпридатність та складність доступу до внутрішніх механізмів для технічного обслуговування.
- Підвищений гідравлічний опір на лінії подачі реагентів, зумовлений складною геометрією змішувальної камери.

#### **Кожухотрубний теплообмінник із системою вирівнювання потоку**

На рисунку 3.10 зображено конструкцію кожухотрубного теплообмінника (наприклад, для використання як випарника з падаючою плівкою) з інтегрованими елементами керування потоком (CN 120252390 А, дата публікації 04.07.2025) [12].



1 – корпус (циліндр); 2 – рідинна камера; 3 – розділова перегородка; 4, 41 – компонент керування потоком (відбійна пластина/дефлектор); 5 – торцева кришка (днище); 6 – трубна решітка; 7 – вихідний патрубок трубного простору; 8 – вхідний патрубок трубного простору; 9 – пучок теплообмінних труб; В – кут нахилу направляючої секції.

Рисунок 3.10 – Загальний вигляд кожухотрубного теплообмінника

Винахід призначений для вирішення проблеми нерівномірного розподілу температури та швидкості рідини в трубах, що в холодильних машинах може призводити до локального переохолодження та замерзання (обледеніння) теплоносія всередині труб.

Робоче середовище (наприклад, технологічна вода) подається через вхідний патрубок (8) у нижню частину рідинної камери (2). Далі рідина проходить через пучок теплообмінних труб (9) до протилежного кінця апарата. У поворотних камерах, утворених торцевими кришками (5) та трубними решітками (6), встановлено розділові перегородки (3), які формують багатоходову схему руху.

Ключовою особливістю є наявність компонентів керування потоком (4, 41), розташованих між виходом з однієї групи труб (верхній потік) та входом у наступну групу (нижній потік). Ці компоненти виконані у вигляді перфорованих пластин, що мають осьову ділянку та нахилену під кутом (В) направляючу секцію. Рідина, виходячи з труб попереднього ходу, проходить крізь отвори та направляється дефлектором у наступний хід.

#### Переваги конструкції:

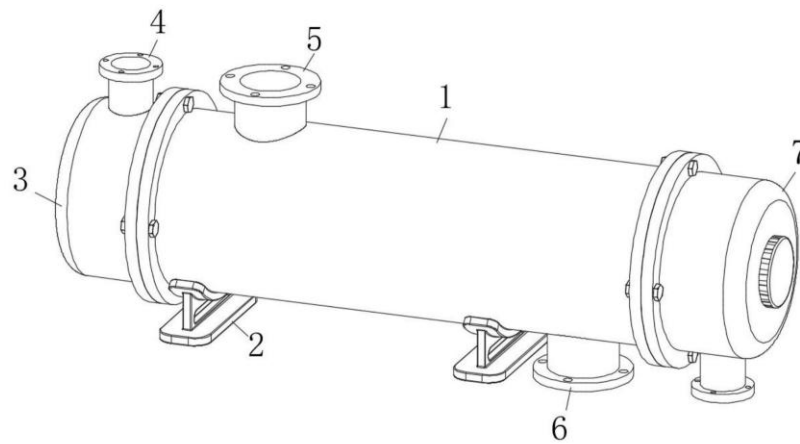
- Запобігання утворенню льодяних пробок та руйнуванню труб шляхом вирівнювання температурного поля рідини.
- Зменшення гідравлічного удару потоку об стінки торцевої кришки (5) завдяки наявності похилих направляючих секцій (кут В).
- Ліквідація застійних зон («мертвих зон») у кутах рідинних камер, що сприяє кращому змішуванню теплоносія.
- Підвищення загальної ефективності теплообміну за рахунок турбулізації потоку при проходженні через перфоровані пластини.
- Забезпечення рівномірного розподілу витрати рідини між окремими трубами пучка.

#### Недоліки конструкції:

- Ускладнення доступу до трубних решіток (6) для механічного чищення труб через наявність приварених або закріплених дефлекторів.
- Підвищений гідравлічний опір трубного простору через необхідність продавлювання рідини крізь перфорацію пластин.
- Збільшення металоємності та вартості виготовлення апарата через встановлення додаткових внутрішніх перегородок складної форми.
- Ризик засмічення отворів у пластинах (41) механічними домішками, якщо якість фільтрації теплоносія недостатня.

#### **Кожухотрубний теплообмінник зі зручним обслуговуванням**

На рисунку 3.11 зображено конструкцію кожухотрубного теплообмінника з вбудованими механізмами самоочищення теплообмінних труб та розподільчих камер (CN 120538348 А, дата публікації 26.08.2025) [13].



1 – основний корпус; 2 – опора; 3 – перша розподільча камера (вхідна); 4 – вхідний патрубок трубного простору; 5 – вхідний патрубок міжтрубного простору; 6 – патрубок для зливу забруднень; 7 – друга розподільча камера (вихідна).

Рисунок 3.11 – Загальний вигляд кожухотрубного теплообмінника

Винахід вирішує проблему складного обслуговування та очищення теплообмінних труб від накипу та бруду. Робоче середовище (холодна рідина) подається через вхідний патрубок (4) у першу розподільчу камеру (3), звідки розподіляється по теплообмінних трубах, що знаходяться всередині корпусу (1).

Усередині кожної теплообмінної труби встановлено механізм очищення, що складається з рухомої втулки, скребка та пружини. Під дією напору рідини втулка переміщується вздовж осі, штовхаючи скребок, який очищає внутрішню стінку труби, а при зменшенні тиску пружина повертає механізм у вихідне положення. Додатково встановлені турбулізатори створюють спіральний потік, що покращує теплообмін.

У другій розподільчій камері (7) встановлено обертовий механізм очищення з лопатями, які обертаються під дією потоку рідини або за допомогою електродвигуна, приводячи в рух щітки для очищення стінок камери та механізм збору сміття.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 41
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

#### Переваги конструкції:

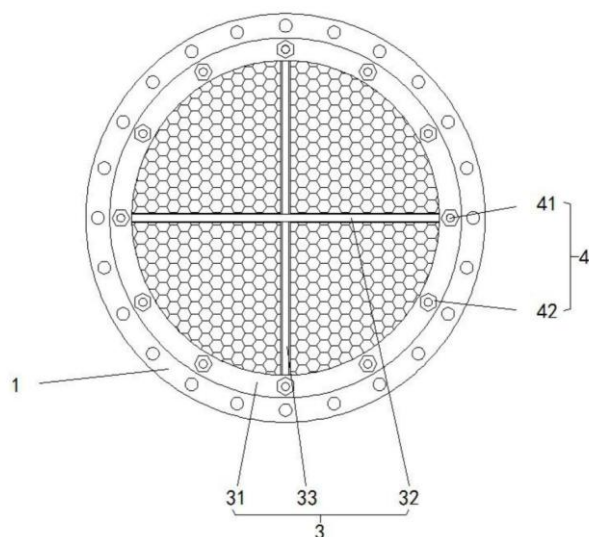
- Автоматичне очищення внутрішніх стінок теплообмінних труб за рахунок використання енергії потоку рідини, що рухає скребки.
- Інтенсифікація теплообміну завдяки руйнуванню прикордонного шару рідини спіральним потоком, який створюється турбулізаторами.
- Комплексне очищення розподільчої камери за допомогою обертових щіток, що запобігає накопиченню осаду в "мертвих зонах".
- Наявність системи збору та відокремлення домішок, що запобігає їх повторному потраплянню в контур циркуляції.
- Зниження частоти зупинок обладнання для технічного обслуговування та ручного чищення.

#### Недоліки конструкції:

- Висока складність внутрішньої конструкції труб через наявність великої кількості рухомих дрібних деталей (пружини, втулки, скребки).
- Підвищений гідравлічний опір потоку рідини через наявність турбулізаторів та механізмів очищення всередині труб.
- Ризик механічного заклинювання рухомих елементів всередині труб у разі потрапляння великих твердих частинок або поломки пружин.
- Складність ремонту окремих очисних механізмів усередині пучка труб у разі їх виходу з ладу.

#### **Титано-сталева композитна трубна решітка для випарника ЗПГ**

На рисунку 3.12 наведено композитну трубну решітку з посиленою конструкцією (CN 223447983 U, дата публікації 17.10.2025) [14].



1 – основа (корпус) трубної решітки; 2 – антикорозійне покриття; 3 – вузол механічного підсилення; 31 – армувальне кільце; 32 – перше ребро жорсткості (вертикальне); 33 – друге ребро жорсткості (горизонтальне); 4 – вузол фіксації; 41 – стяжний болт; 42 – фіксуюча гайка.

Рисунок 3.12 – Композитна трубна решітка випарного апарата з посиленою конструкцією

Корисна модель стосується вдосконалення конструктивних елементів теплообмінного обладнання, зокрема трубних решіток випарників зрідженого природного газу.

На зовнішні поверхні основного корпусу (1) нанесено захисний шар (2) на основі політетрафторетилену для запобігання хімічній корозії. Для підвищення несучої здатності та жорсткості конструкції, на фронтальній та тильній площинах решітки змонтовано підсилювальні вузли (3). Кожен вузол складається з армувального кільця (31) та системи перехресних ребер жорсткості (32, 33), що забезпечують щільний контакт із площиною корпусу. Механічна цілісність системи досягається шляхом з'єднання підсилювальних елементів з основним корпусом за допомогою наскрізних стяжних болтів (41) та гайок (42), що утворює єдиний напружений контур, стійкий до згинальних моментів.

#### Переваги конструкції:

- Підвищена конструкційна міцність та жорсткість завдяки інтеграції зовнішнього армуючого каркаса (кілець та ребер).
- Стійкість до деформацій при дії пікових динамічних навантажень (гідроударів) або надлишкового тиску.
- Покращена корозійна стійкість в агресивних середовищах завдяки використанню полімерного захисного покриття.
- Мінімізація ризику втомного руйнування та утворення мікротріщин у тілі решітки під час тривалої експлуатації.

#### Недоліки конструкції:

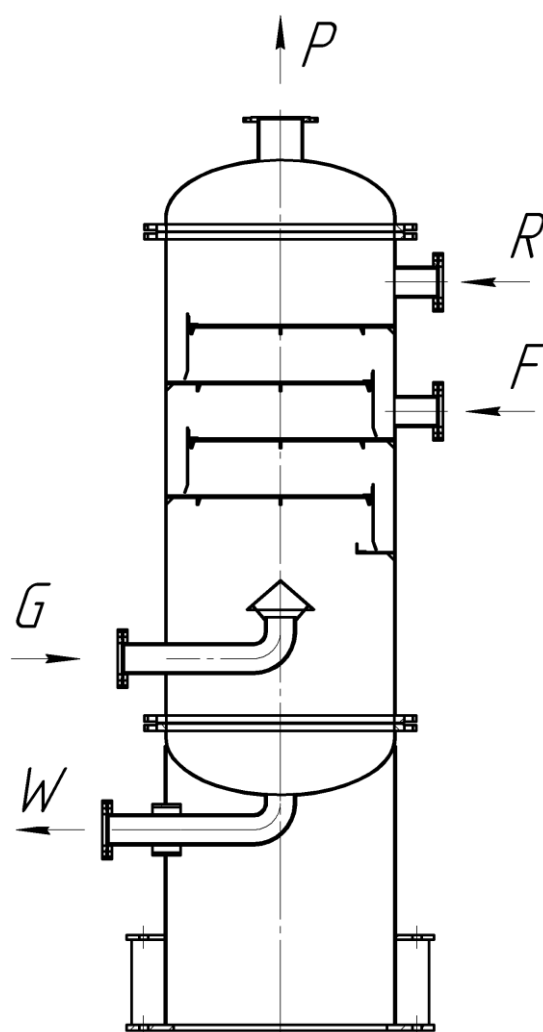
- Порушення суцільності матеріалу решітки через наявність наскрізних отворів для кріпильних елементів, що ускладнює забезпечення повної герметичності (ризик протікання між контурами).
- Підвищена металоємність виробу та збільшення загальної маси теплообмінника.
- Висока трудомісткість складання та технічного обслуговування через велику кількість різьбових з'єднань, що потребують контролю моменту затягування.

## 4 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкції ректифікаційної колони

### 4.1 Параметричний розрахунок ректифікаційної колони

Метою розрахунку є визначення кількості тарілок, конструктивних розмірів апарату та вибір конструкції апарату, яка задовольняє заданим технічним умовам.

Розрахункова схема параметричного розрахунку наведена на рисунку 4.1.



1 – кришка; 2 – корпус; 3 – днище; 4 – опора

Рисунок 4.1 – Розрахункова схема ректифікаційної колони

Вихідні дані:

Суміш, що підлягає розділенню азот-кисень;

Витрати вихідної суміші  $L_F$ , кг/с 0,8;

Масова концентрація цільового компонента:

- у початковій суміші  $x_F$ , кг<sub>A</sub>/кг<sub>AB</sub> 0,60;

- у кубовому залишку  $x_W$ , кг<sub>A</sub>/кг<sub>AB</sub> 0,05;

- у дистилляті  $x_D$ , кг<sub>A</sub>/кг<sub>AB</sub> 0,995.

Розрахунок тарілчастої ректифікаційної установки виконуємо згідно методики наведеною в [2].

Параметри та характеристики компонента А (азот) та В (кисень) взяті з [16].

Матеріальний баланс:

$$L_F = L_D + L_W$$

Матеріальний баланс за цільовим компонентом:

$$L_F \cdot \bar{x}_F = L_D \cdot \bar{x}_D + L_W \cdot \bar{x}_W,$$

де  $L_F$  – масова витрата вихідної суміші, кг/с;  $L_D$  – масова витрата дистилляту, кг/с;  $L_W$  – масова витрата кубового залишку, кг/с.

Продуктивність колони за кубовим залишком, кг/с:

$$L_W = L_F \cdot \frac{\bar{x}_D - \bar{x}_F}{\bar{x}_D - \bar{x}_W} = 0,80 \cdot \frac{0,995 - 0,60}{0,995 - 0,050} = 0,33,$$

де  $\bar{x}_F, \bar{x}_D, \bar{x}_W$  – середні мольні частки цільового компонента у вихідній суміші, дистилляті та кубовому залишку відповідно.

Перерахуємо фазові склади з молярних фракцій на масові за рівнянням:

$$x = \frac{\frac{\bar{x}}{M_A}}{\frac{\bar{x}}{M_A} + \frac{(1 - \bar{x})}{M_B}},$$

де  $M_A, M_B$  – мольна маса азоту і кисню відповідно, кг/кмоль.

Перерахунок масової концентрації у мольну,  $\frac{\text{моль А}}{\text{моль АВ}}$ :

- вихідної суміші:

$$x_F = \frac{\frac{\bar{x}_F}{M_F}}{\frac{\bar{x}_F}{M_F} + \frac{(1 - \bar{x}_F)}{M_B}} = \frac{\frac{0,60}{28,0}}{\frac{0,60}{28,0} + \frac{(1 - 0,60)}{32,0}} = 0,63;$$

- кубового залишку:

$$x_W = \frac{\frac{\bar{x}_W}{M_W}}{\frac{\bar{x}_W}{M_W} + \frac{(1 - \bar{x}_W)}{M_B}} = \frac{\frac{0,050}{28,0}}{\frac{0,050}{28,0} + \frac{(1 - 0,050)}{32,0}} = 0,05674;$$

- дистилляту:

$$x_D = \frac{\frac{\bar{x}_D}{M_D}}{\frac{\bar{x}_D}{M_D} + \frac{(1 - \bar{x}_D)}{M_B}} = \frac{\frac{0,995}{28,0}}{\frac{0,995}{28,0} + \frac{(1 - 0,995)}{32,0}} = 0,996.$$

Побудова діаграми рівноваги  $x$ ,  $y$  азот – кисень (рисунок 4.2) за довідковими даними, наведеними в таблиці 4.1 [16].

Таблиця 4.1. Рівноважні склади суміші азот – кисень ( $x$ ) і пари ( $y$ ) в моль, % і температурі кипіння  $t$ , К.

$x$	0	5	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
$y$	0	17,7	31,5	51,3	64,5	73,8	80,7	86,1	90,4	94,4	97,2	100
$T, K$	89,9	88,5	87,4	85,3	83,7	82,3	81,2	80,2	79,3	78,5	77,8	77,1

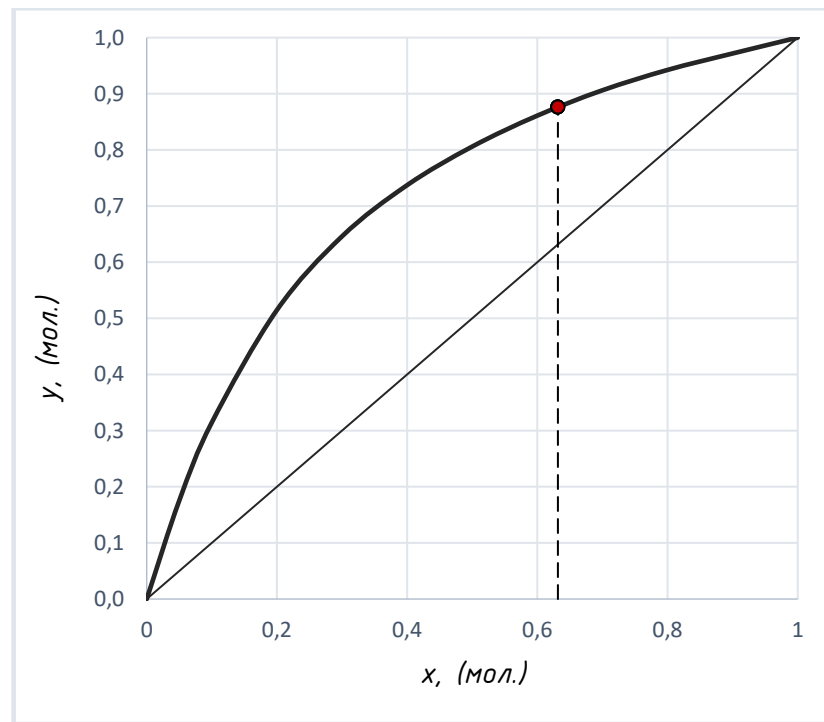


Рисунок 4.2 – Діаграма рівноваги пари і рідини суміші азот – кисень

### Мінімальне флегмове число

Для визначення робочого флегмового числа доцільно сформулювати критерій оптимальності, який характеризує об'єм ректифікаційної колони. З цією метою розглядають різні значення коефіцієнта надлишкового флегми та визначають відповідні значення дефлегмаційного числа  $\beta$ .

Визначення мінімального флегмового числа [12, с. 228]:

$$R_{min} = \frac{x_D - y_F^*}{y_F^* - x_F} = \frac{0,996 - 0,876}{0,876 - 0,63} = 0,488 ,$$

де  $y_F^*$  – рівноважна концентрація компонента у паровій фазі при складі  $x_F$ .

### Визначення робочого флегмового числа

Для визначення робочого флегмового числа доцільно сформулювати критерій оптимальності, який характеризує об'єм ректифікаційної колони. З цією метою розглядають різні значення коефіцієнта надлишкового флегми  $\beta$  і визначають відповідні значення флегмове число  $R$ .

Робоче флегмове число визначається за формулою [17, с. 228]:

$$R = \beta \cdot R_{min} ,$$

де  $\beta$  – коефіцієнт надлишку флегми.

Після цього будуються робочі лінії та графічно визначається кількість теоретичних тарілок. Далі обчислюється критерій оптимальності, оптимальне значення якого відповідає мінімальному значенню виразу  $N \cdot N(R + 1)$ .

Як приклад, розглянемо випадок, коли коефіцієнт надлишкової флегми:

$$R = \beta \cdot R_{min} = 1,3 \cdot 0,488 = 0,63 ,$$

де  $\beta = 1,3$  – прийняте значення коефіцієнта надлишку флегми.

Для підсилювальної (збагачувальної) частини колони рівняння робочої лінії має вигляд:

$$b = \frac{x_D}{R + 1} = \frac{0,996}{0,63 + 1} = 0,61$$

Діаграма парорідинної рівноваги для суміші азот–кисень та положення робочої лінії при робочому дефлегмаційному числі  $R = 0,63$  показано на рисунку 4.3.

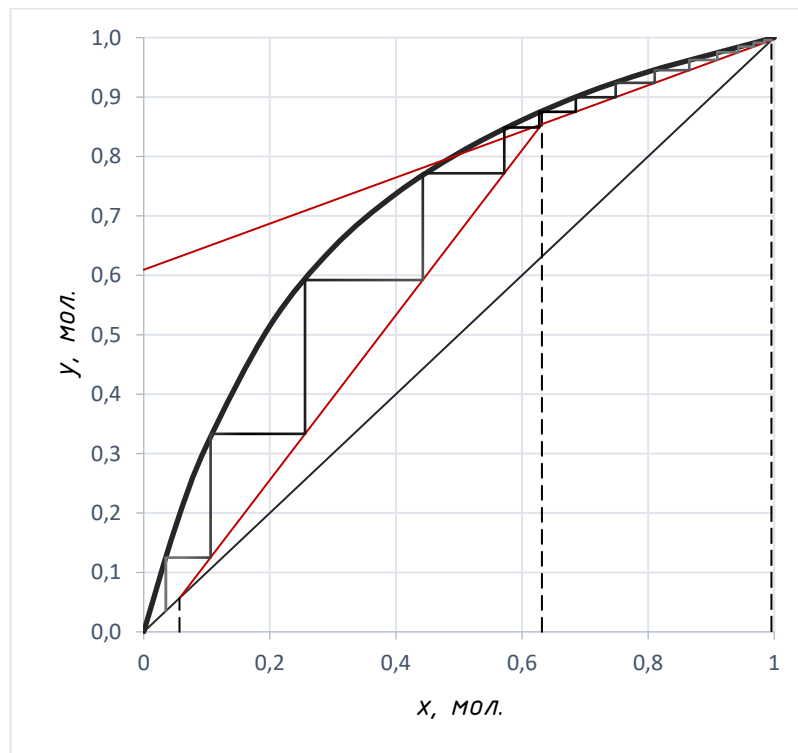


Рисунок 4.3 – Діаграма рівноваги  $x$ – $y$  для суміші азот–кисень та робочі лінії при коефіцієнті надлишкового флегми  $\beta = 1,3$

За даними рисунку 4.3 визначено, що кількість теоретичних тарілок становить:

$$N = 14$$

Далі виконується розрахунок конструктивних параметрів колони та перевірка відповідності отриманих значень критеріям оптимальності:

$$N(R + 1) = 14 \cdot (0,63 + 1) = 22,87$$

Діаграма рівноваги  $x$ – $y$  для суміші азот–кисень та положення робочої лінії при коефіцієнті надлишкового флегми  $\beta=1,5$  наведена на рисунку 4.4.

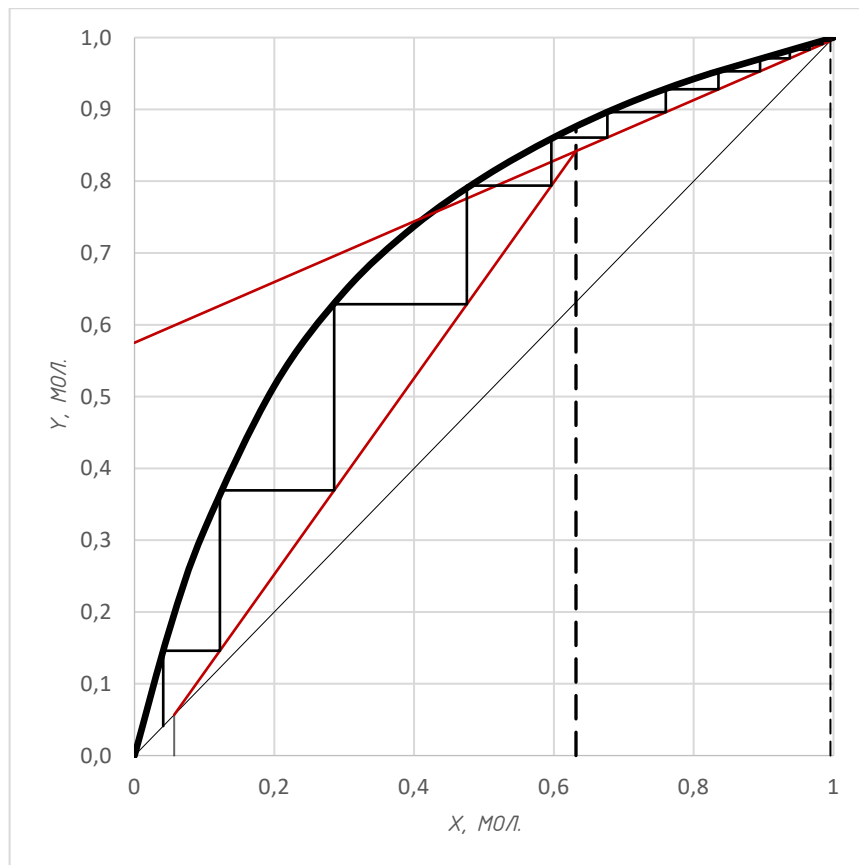


Рисунок 4.4 – Діаграма рівноваги  $x$ – $y$  для суміші азот–кисень та робочі лінії при коефіцієнті надлишкового флегми  $\beta = 1,5$

За даними рисунку 4.4 визначено, що кількість теоретичних тарілок становить:

$$N = 12$$

Після цього продовжуємо розрахунок:

$$N(R + 1) = 12 \cdot (0,73 + 1) = 20,78$$

Діаграма рівноваги  $x$ – $y$  для суміші азот–кисень та положення робочої лінії при коефіцієнті надлишкового флегми  $\beta=2$  наведена на рисунку 4.5.

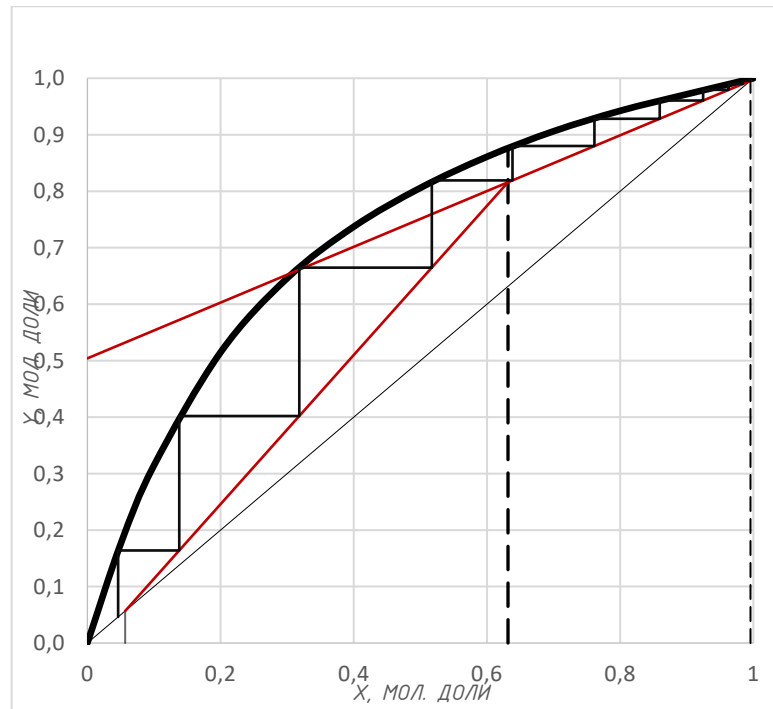


Рисунок 4.5 – Діаграма рівноваги  $x$ – $y$  для суміші азот–кисень та робочі лінії при коефіцієнті надлишкового флегми  $\beta = 2$

За рисунком 4.5 визначено, що кількість теоретичних тарілок дорівнює:

$$N = 10$$

Після цього продовжуємо розрахунок:

$$N(R + 1) = 10 \cdot (0,98 + 1) = 19,75$$

Діаграма рівноваги  $x$ – $y$  для суміші азот–кисень та положення робочої лінії при коефіцієнті надлишкового флегми  $\beta=2,5$  наведена на рисунку 4.6.

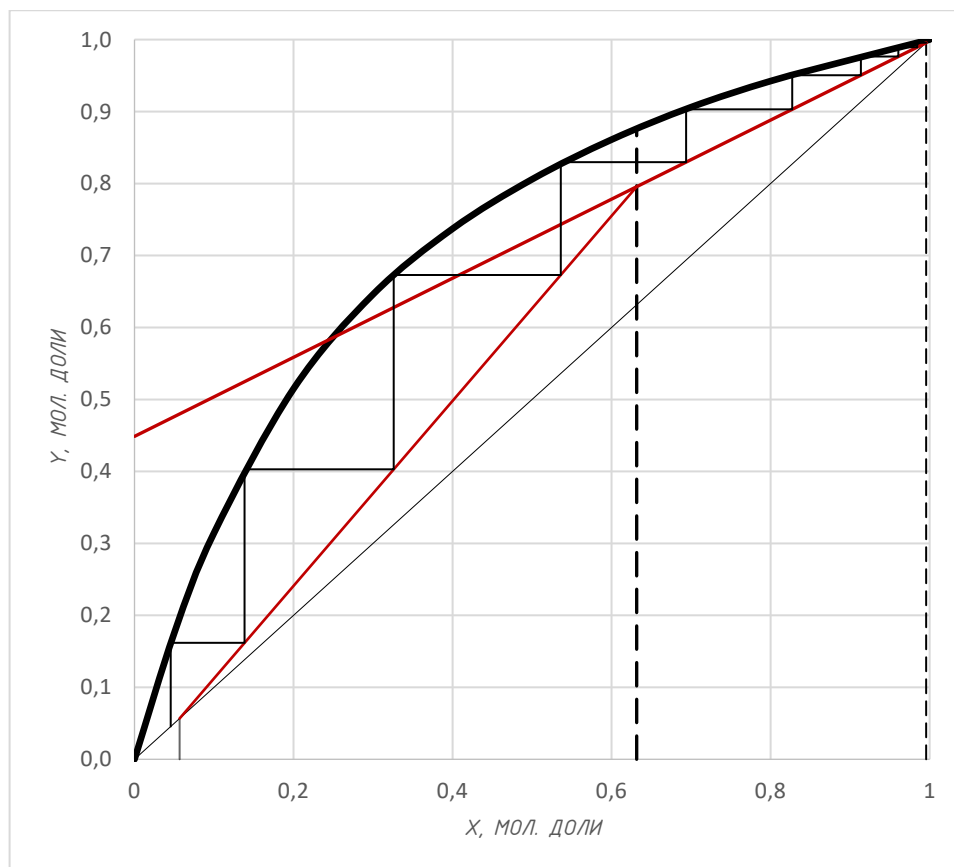


Рисунок 4.6 – Діаграма рівноваги  $x$ – $y$  для суміші азот–кисень та робочі лінії при коефіцієнті надлишкового флегми  $\beta = 2,5$

За рисунком 4.6 визначено, що кількість теоретичних тарілок становить:

$$N = 9$$

Після цього продовжуємо розрахунок:

$$N(R + 1) = 9 \cdot (1,22 + 1) = 19,97$$

Діаграма рівноваги  $x$ – $y$  для суміші азот–кисень та положення робочої лінії при коефіцієнті надлишкового флегми  $\beta=3$  наведена на рисунку 4.7.

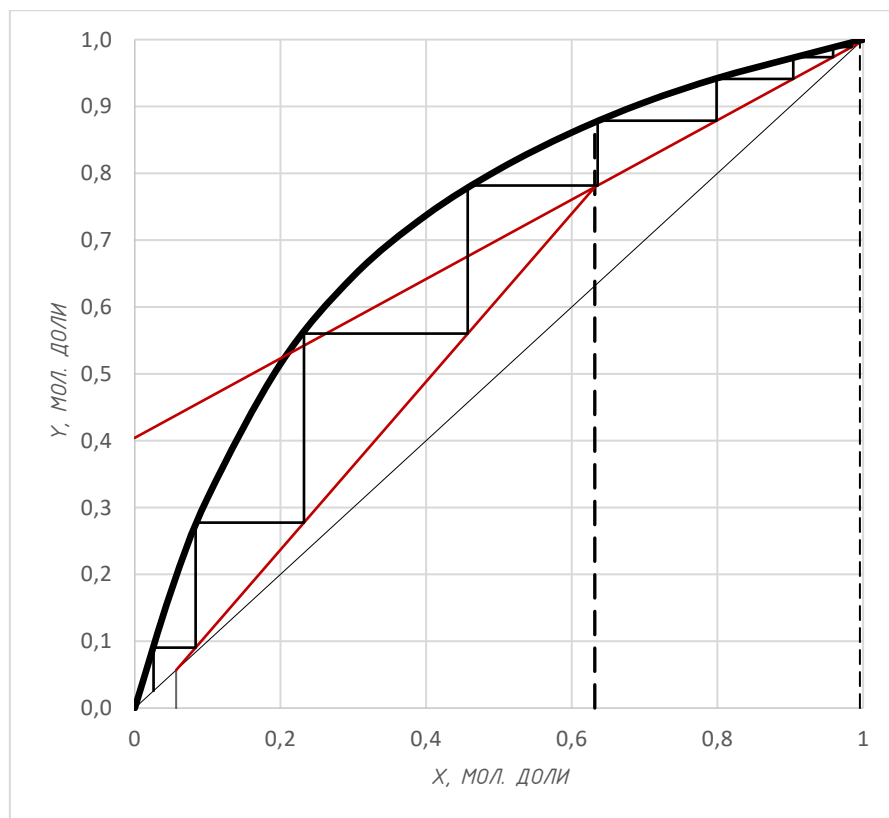


Рисунок 4.7 – Діаграма рівноваги  $x$ – $y$  для суміші азот–кисень та робочі лінії при коефіцієнті надлишкового флегми  $\beta = 3$

За рисунком 4.7 визначено, що кількість теоретичних тарілок становить:

$$N = 9$$

Обчислимо критерій оптимальності:

$$N(R + 1) = 9 \cdot (1,46 + 1) = 22,17$$

Результати розрахунків зведені у таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Дані для розрахунку робочого дефлегмаційного числа

$\beta$	$b$	$R$	$N$	$N(R+1)$
1,20	0,63	0,59	16,0	25,36
1,30	0,61	0,63	14,0	22,87
1,50	0,58	0,73	12,0	20,78
2,00	0,50	0,98	10,0	19,75
2,50	0,45	1,22	9,0	19,97
3,00	0,40	1,46	9,0	22,17

Графік залежності для визначення оптимального значення коефіцієнта флегми за даними таблиці  $N(R + 1) = f(R)$  наведено на рисунку 4.8.

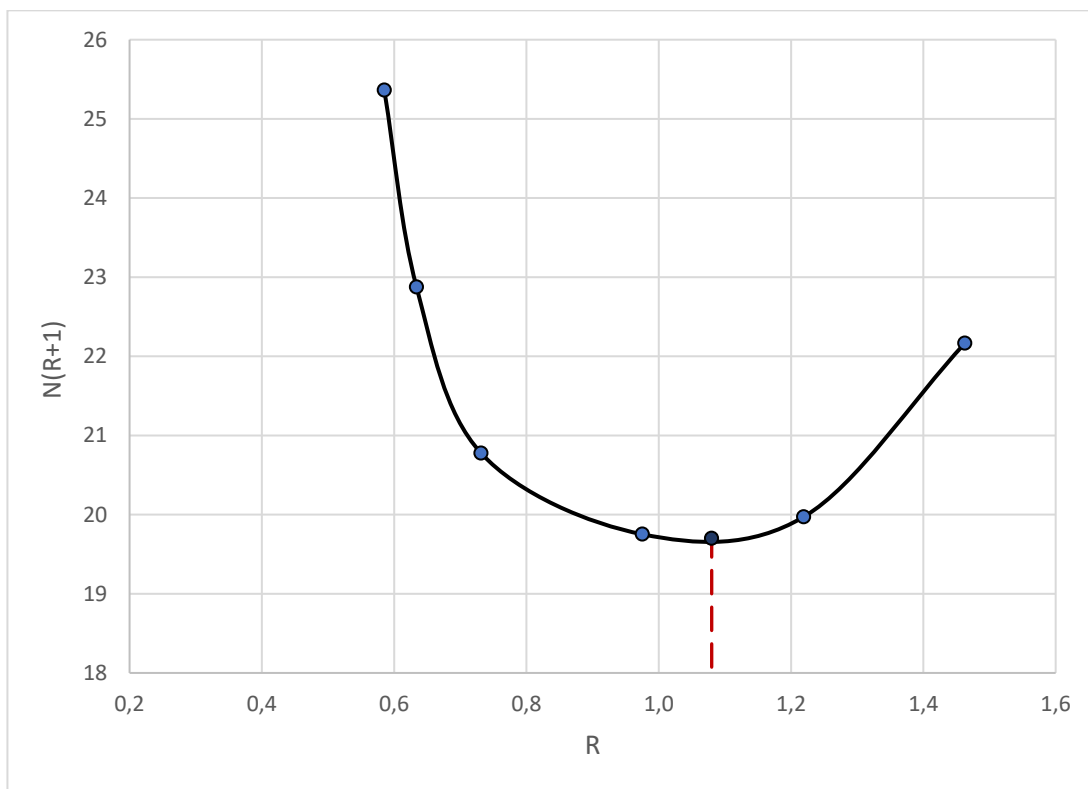


Рисунок 4.8 – Графік залежності критерію оптимальності від коефіцієнта надлишкового флегми  $N(R + 1) = f(R)$

Побудований графік залежності  $N(R + 1) = f(R)$  на основі даних таблиці 2.2 показує, що мінімальне значення об'єму ректифікаційної колони досягається при робочому флегмовому числі  $R = 1,08$ .

**Визначення об'ємів і об'ємних швидкостей пари та рідини, що проходять через колону**

Середня мольна частка рідини (цільового компонента) у верхній та нижній частинах колони,  $\frac{\text{кмоль } A}{\text{кмоль } AB}$ :

$$x_{\text{ср.в}} = \frac{x_F + x_D}{2} = \frac{0,63 + 0,996}{2} = 0,814;$$

$$x_{\text{ср.н}} = \frac{x_F + x_W}{2} = 0,344.$$

Середня масова частка рідини у верхній та нижній частинах колони,  $\frac{\text{кг}}{\text{кг АВ}}$ :

$$\bar{x}_{\text{ср.в}} = \frac{\bar{x}_F + \bar{x}_D}{2} = \frac{0,60 + 0,995}{2} = 0,798;$$

$$\bar{x}_{\text{ср.н}} = \frac{\bar{x}_F + \bar{x}_W}{2} = \frac{0,60 + 0,050}{2} = 0,325.$$

Рівняння робочої прямої:

$$y_F = \frac{R}{R+1} \cdot x_F + \frac{x_D}{R+1} = \frac{1,08}{1,08+1} \cdot 0,63 + \frac{0,996}{1,08+1} = 0,807$$

Середні мольні концентрації у паровій фазі у верхній та нижній частинах колони визначаються рівнянням робочої лінії,  $\frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль АВ}}$ :

$$y_{\text{ср.в}} = \frac{y_D + y_F}{2} = \frac{0,996 + 0,807}{2} = 0,90;$$

$$y_{\text{ср.н}} = \frac{y_F + y_W}{2} = \frac{0,807 + 0,05674}{2} = 0,432,$$

де  $y_F$  – рівняння робочої прямої [3].

Середні мольна масові частки рідини у верхній та нижній частинах колони,  $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$  [18]:

$$\begin{aligned} M'_{\text{ср.в}} &= M_{\text{НKK}} \cdot y_{\text{ср.в}} + M_{\text{ВKK}} \cdot (1 - y_{\text{ср.в}}) = \\ &= 28,0 \cdot 0,90 + 32,0 \cdot (1 - 0,90) = 28,40 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M'_{\text{ср.н}} &= M_{\text{НKK}} \cdot y_{\text{ср.н}} + M_{\text{ВKK}} \cdot (1 - y_{\text{ср.н}}) = \\ &= 28,0 \cdot 0,432 + 32,0 \cdot (1 - 0,432) = 30,27 \end{aligned}$$

Мольна маса дистилляту,  $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$  [2]:

$$\begin{aligned} M_D &= M_{\text{НKK}} \cdot x_D + M_{\text{ВKK}} \cdot (1 - x_D) = 28,0 \cdot 0,996 + 32,0 \cdot (1 - 0,996) = \\ &= 28,02 \end{aligned}$$

Мольна маса вихідної суміші,  $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$ :

$$M_F = M_{\text{НKK}} \cdot x_F + M_{\text{ВKK}} \cdot (1 - x_F) = 28,0 \cdot 0,63 + 32,0 \cdot (1 - 0,63) = 29,47$$

Масова витрата пари у верхній та нижній частинах колони, кг/с [17, с. 230]:

$$G_{п.в} = D \cdot (R + 1) \cdot \frac{M'_{ср.в}}{M_D} = 0,47 \cdot (1,08 + 1) \cdot \frac{28,40}{28,02} = 0,98;$$

$$G_{п.н} = D \cdot (R + 1) \cdot \frac{M'_{ср.н}}{M_D} = 0,47 \cdot (1,08 + 1) \cdot \frac{30,27}{28,02} = 1,05.$$

Масовий потік рідини у верхній та нижній частинах колони, кг/с [17, с.229]:

$$\bar{L}_в = D \cdot R \cdot \frac{M_{ср.в}}{M_D} = 0,47 \cdot 1,08 \cdot \frac{28,75}{28,02} = 0,52;$$

$$\bar{L}_н = D \cdot R \cdot \frac{M_{ср.н}}{M_D} + F \cdot \frac{M_{ср.н}}{M_F} = 0,47 \cdot 1,08 \cdot \frac{30,62}{28,02} + 0,80 \cdot \frac{30,62}{29,47} = 1,38.$$

Побудуємо діаграму t-x,y для суміші азот–кисень (криві кипіння та конденсації) за даними таблиці 4.1.

За діаграмою визначаємо середні температури рідкої та парової фаз у верхній і нижній частинах колони.

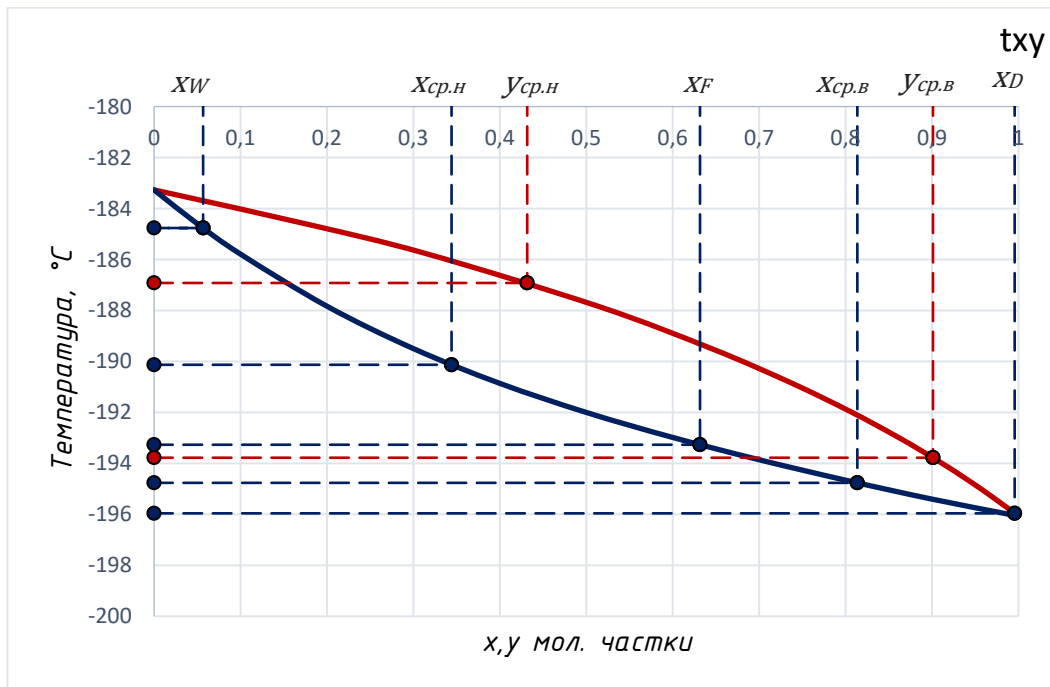


Рисунок 4.9 – Криві точок кипіння і конденсації парів суміші азот – кисень

Середня температура рідкої фази у верхній і нижній частинах колони:

$$t_{x_{\text{ср.в}}} = -195 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (з } x_{\text{ср.в}} = 0,814\text{)};$$

$$t_{x_{\text{ср.н}}} = -190 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (з } x_{\text{ср.н}} = 0,344\text{)}.$$

Середня температура парової фази у верхній і нижній частинах колони:

$$t_{y_{\text{ср.в}}} = -194 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (з } y_{\text{ср.в}} = 0,90\text{)};$$

$$t_{y_{\text{ср.н}}} = -187 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (з } y_{\text{ср.н}} = 0,432\text{)}.$$

Значення температур кипіння та конденсації матеріальних потоків наведені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Точки кипіння/конденсації матеріальних потоків

Матеріальний потік	Температура $^\circ\text{C}$
вихідна суміш, $t_F$	-193
дистилят $t_D$	-196,0
Кубовий залишок, $t_W$	-184,8

Щільність рідини у верхній і нижній частинах колони,  $\text{кг}/\text{м}^3$  [12, с. 231]:

$$\rho_{\text{ж.в}} = \frac{1}{\frac{\bar{x}_{\text{ср.в}}}{\rho_{\text{НKK}}} + \frac{1 - \bar{x}_{\text{ср.в}}}{\rho_{\text{ВKK}}}} = \frac{1}{\frac{0,798}{800} + \frac{1 - 0,798}{1196}} = 857;$$

$$\rho_{\text{ж.н}} = \frac{1}{\frac{\bar{x}_{\text{ср.н}}}{\rho_{\text{НKK}}} + \frac{1 - \bar{x}_{\text{ср.н}}}{\rho_{\text{ВKK}}}} = \frac{1}{\frac{0,325}{778} + \frac{1 - 0,325}{1373}} = 1100,$$

де  $\rho_{\text{НKK}}$ ,  $\rho_{\text{ВKK}}$  – густини азоту і кисню при середніх температурах у верхній та нижній частинах колони,  $\text{кг}/\text{м}^3$ .

Густина пару у верхній і нижній частині колони,  $\text{кг}/\text{м}^3$  [17, с. 231]:

$$\rho_{\text{п.в}} = \frac{M'_{\text{ср.в}}}{22,4} \cdot \frac{T_0}{(T_0 + t_{\text{ср.в}})} = \frac{28,40}{22,4} \cdot \frac{273}{(273 + (-194))} = 4,37;$$

$$\rho_{\text{п.н}} = \frac{M'_{\text{ср.н}}}{22,4} \cdot \frac{T_0}{(T_0 + t_{\text{ср.н}})} = \frac{30,27}{22,4} \cdot \frac{273 \cdot 0,6}{(273 + (-187))} = 4,29.$$

## Визначення швидкості пари та діаметра в колоні

Допустима швидкість пари у верхній та нижній частинах колони, м/с [17, с. 205]:

$$\omega_{\text{доп.в}} = \frac{0,0155}{d_K^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж.в}}}{\rho_{\text{п.в}}} \cdot (h_{\text{мт}} - h_k)} = \frac{0,0155}{0,08^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{\frac{857}{4,37} \cdot (0,4 - 0,055)} = 0,69;$$

$$\omega_{\text{доп.н}} = \frac{0,0155}{d_K^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{\text{ж.н}}}{\rho_{\text{п.н}}} \cdot (h_{\text{мт}} - h_k)} = \frac{0,0155}{0,08^{\frac{2}{3}}} \cdot \sqrt{\frac{1100}{4,29} \cdot (0,4 - 0,055)} = 0,786,$$

де  $d_K = 0,08$  м – діаметр ковпачка тарілки, м;  $h_{\text{мт}} = 0,4$  – відстань між тарілками, м;  $h_k = 0,055$  м – висота ковпачка.

Оптимальна швидкість пари у верхній та нижній частинах колони, м/с:

$$\omega_{\text{опт.в}} = 0,85 \cdot \omega_{\text{доп.в}} = 0,85 \cdot 0,69 = 0,58;$$

$$\omega_{\text{опт.н}} = 0,85 \cdot \omega_{\text{доп.н}} = 0,85 \cdot 0,786 = 0,67.$$

Діаметр ректифікаційної колони у верхній та нижній частинах колони, м [17]:

$$D_{\text{в}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{п.в}}}{\pi \cdot \omega_{\text{доп.в}} \cdot \rho_{\text{п.в}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,98}{3,14 \cdot 0,69 \cdot 4,37}} = 0,70;$$

$$D_{\text{н}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{п.н}}}{\pi \cdot \omega_{\text{доп.н}} \cdot \rho_{\text{п.н}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,05}{3,14 \cdot 0,786 \cdot 4,29}} = 0,68.$$

Для подальших розрахунків приймаємо стандартний діаметр корпусу ректифікаційної колони:

$$D_K = 0,80 \text{ м.}$$

Дійсна швидкість пари у верхній та нижній частинах колони, м/с [17, с. 205]:

$$\omega_{\text{к.в}} = \omega_{\text{доп.в}} \cdot \left(\frac{D}{D_K}\right)^2 = 0,69 \cdot \left(\frac{0,70}{0,80}\right)^2 = 0,45;$$

$$\omega_{К.н} = \omega_{доп.н} \cdot \left(\frac{D}{D_K}\right)^2 = 0,786 \cdot \left(\frac{0,68}{0,80}\right)^2 = 0,49.$$

Відношення площі поперечного перерізу пазів ковпачків до площі поперечного перерізу колони:

$$\varphi = \frac{S_0}{S_K} = \frac{0,04}{0,28} = 0,13$$

Згідно з ОСТ 26-01-66-86 для колони обрано розбірний дисковий ковпачок ТСК, конструктивні розміри якого, а також розрахункові значення допустимих та оптимальних швидкостей пари і діаметра колони наведені у таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 – Конструктивні розміри кришки ТСК

Параметр	Розмірність	Значення
Діаметр колони, $D_K$	м	0,80
Вільний переріз колони, $S_K$	м <sup>2</sup>	0,50
Периметр зливу, $l_c$	м	0,57
Робоча секція тарілки, $S_T$	м <sup>2</sup>	0,40
Відносний вільний переріз, $F_c$	м <sup>2</sup> /м <sup>2</sup>	0,092
Діаметр ковпачка, $d_K$	мм	80
Кількість ковпачків	од.	13

Швидкість руху пари в робочій частині тарілки, м/с:

$$\omega_0 = \frac{\omega_{К.в}}{0,1} = \frac{0,47}{0,13} = 8,3$$

Швидкість руху пари в робочій частині тарілки, Па:

$$\Delta P_{сух.в} = \frac{\xi \cdot \omega_0^2 \cdot \rho_{п.в}}{2} = \frac{4,5 \cdot 8,3^2 \cdot 4,37}{2} = 682;$$

$$\Delta P_{сух.н} = \frac{\xi \cdot \omega_0^2 \cdot \rho_{п.н}}{2} = \frac{4,5 \cdot 8,3^2 \cdot 4,29}{2} = 670 ,$$

де  $\xi = 4,5$  – коефіцієнт опору тарілки.

Гідравлічний опір тарілки, Па:

$$\Delta P = \Delta P_{\text{сух}} + \Delta P_{\sigma} + \Delta P_{\text{пж}}$$

де  $\Delta P_{\text{сух}}$  – гідравлічний опір сухої тарілки, Па;  $\Delta P_{\sigma}$  – опір за рахунок сил поверхневого натягу, Па;  $\Delta P_{\text{пж}}$  – опір парорідинного шару, Па.

Площа поперечного перерізу колони, м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{к}} = 0,785 \cdot D^2 = 0,785 \cdot 0,6^2 = 0,28$$

Площа поперечного перерізу всіх пазів, м<sup>2</sup>:

$$S_0 = n_{\text{ковп}} \cdot n_{\text{пр}} \cdot S_{\text{пр}} = 13 \cdot 36 \cdot 0,00008 = 0,04,$$

де  $n_{\text{ковп}} = 13$  – кількість ковпачків;  $n_{\text{пр}}$  – кількість пазів у ковпачку

Відношення площі поперечного перерізу пазів ковпачків до площі поперечного перерізу колони:

$$\varphi = \frac{S_0}{F_{\text{к}}} = \frac{0,04}{0,28} = 0,13$$

Швидкість руху пари в робочій частині тарілки, м/с

$$\omega_0 = \frac{\omega_{\text{к}}}{\varphi} = \frac{0,47}{0,13} = 8,3$$

Гідравлічний опір сухої тарілки зверху і знизу, Па:

$$\Delta P_{\text{сух.в}} = \frac{\xi \cdot \omega_0^2 \cdot \rho_{\text{п}}}{2} = \frac{4,5 \cdot 8,3^2 \cdot 4,37}{2} = 682;$$

$$\Delta P_{\text{сух.н}} = \frac{\xi \cdot \omega_0^2 \cdot \rho_{\text{п}}}{2} = \frac{4,5 \cdot 8,3^2 \cdot 4,29}{2} = 670,$$

де  $\xi = 4,5$  – коефіцієнт опору тарілки;  $\omega_0$  – швидкість руху пари в отворах тарілки, м/с.

Еквівалентний діаметр отвору:

$$d_{\text{э}} = \frac{4 \cdot S_{\text{пр}}}{2 \cdot (h_{\text{пр}} + b)} = \frac{4 \cdot 0,00008}{2 \cdot (0,02 + 0,004)} = 0,00667,$$

де  $h_{\text{пр}}$  – висота прорізу, м;  $b$  – ширина щілини, м.

Поверхневий натяг рідини за середньої температури відповідної частини колони з азотом в  $t_D = -196,0$  °С, Н/м:

$$\sigma_A = 0,012$$

Поверхневий натяг рідини за середньої температури відповідної частини колони з киснем при  $t_w = -184,8$  °С, Н/м:

$$\sigma_B = 0,014$$

Опір за рахунок сил поверхневого натягу, Па:

$$\Delta P_{\sigma.B} = \frac{4 \cdot \sigma_{AB}}{d_3} = \frac{4 \cdot 0,012}{0,00667} = 9,4;$$

$$\Delta P_{\sigma.H} = \frac{4 \cdot \sigma_B}{d_3} = \frac{4 \cdot 0,014}{0,00667} = 11,5.$$

Об'ємна витрата рідини у верхній та нижній частинах колони, м<sup>3</sup>/с:

$$V_{ж.в} = \frac{G_D \cdot R \cdot M_{ср.в}}{M_D \cdot \rho_{ж.в}} = \frac{0,47 \cdot 1,08 \cdot 28,75}{28,02 \cdot 805} = 0,00066;$$

$$V_{ж.н} = \left( \frac{G_D \cdot R}{M_D} + \frac{G_F}{M_F} \right) \cdot \frac{M_{ср.н}}{\rho_{ж.н}} \left( \frac{0,47 \cdot 1,08}{28,02} + \frac{0,80}{29,47} \right) \cdot \frac{30,62}{752} = 0,00177.$$

Висота переливної перегородки зверху і знизу колони, м:

$$\Delta h_B = \left( \frac{V_{ж.в}}{1,85 \cdot 2 \cdot (h_{пр} + b) \cdot k} \right)^{\frac{2}{3}} = \left( \frac{0,00066}{1,85 \cdot 0,57 \cdot 0,5} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,0114;$$

$$\Delta h_H = \left( \frac{V_{ж.н}}{1,85 \cdot 2 \cdot (h_{пр} + b) \cdot k} \right)^{\frac{2}{3}} = \left( \frac{0,00177}{1,85 \cdot 0,57 \cdot 0,5} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,0220.$$

Висота парорідинного шару зверху і знизу колони, м:

$$h_{пжв} = h_{пр} + \Delta h_B = 0,04 + 0,0114 = 0,051;$$

$$h_{пжн} = h_{пр} + \Delta h_H = 0,04 + 0,0220 = 0,062.$$

Опір парорідинного шару у верхній частині, Па:

$$\Delta P_{\text{пж.в}} = 1,3 \cdot h_{\text{пж.в}} \cdot k \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g = 1,3 \cdot 0,051 \cdot 0,5 \cdot 805 \cdot 9,81 = 264;$$

$$\Delta P_{\text{пж.н}} = 1,3 \cdot h_{\text{пж.н}} \cdot k \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot g = 1,3 \cdot 0,062 \cdot 0,5 \cdot 752 \cdot 9,81 = 298,$$

де  $h_{\text{пж.в}}$ ,  $h_{\text{пж.н}}$  – висота парорідинного шару рідини, м;  $k = 0,5$  – коефіцієнт, що враховує вплив піни;  $\rho_{\text{ж}}$  – густина рідини, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння;  $V_{\text{ж}}$  – об'ємна витрата рідини для верхньої і нижньої частини колони, м<sup>3</sup>/с.

Загальний гідравлічний опір тарілки, Па:

$$\Delta P_{\text{в}} = \Delta P_{\text{сух.в}} + \Delta P_{\sigma.\text{в}} + \Delta P_{\text{пж.в}} = 682 + 9,4 + 264 = 956;$$

$$\Delta P_{\text{н}} = \Delta P_{\text{сух.н}} + \Delta P_{\sigma.\text{н}} + \Delta P_{\text{пж.н}} = 670 + 11,5 + 298 = 979,$$

де  $\Delta P_{\text{сух.в}}$ ,  $\Delta P_{\text{сух.н}}$  – гідравлічний опір сухої тарілки, Па;  $\Delta P_{\sigma.\text{в}}$ ,  $\Delta P_{\sigma.\text{н}}$  – опір за рахунок сил поверхневого натягу, Па;  $\Delta P_{\text{пж.в}}$ ,  $\Delta P_{\text{пж.н}}$  – опір парорідинного шару, Па.

Перевірка прийнятої відстані,  $h = 0,4$  м до необхідних вимог нормальної роботи тарілок, м:

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

$$0,4 > 1,8 \cdot \frac{979}{752 \cdot 9,81} = 0,231$$

Для тарілок нижньої частини колони, що мають більший опір, ця умова також виконується

Перевірка однорідності роботи тарілки, м/с:

$$\omega_{0,\text{min}} = 0,67 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \rho_{\text{ж.н}} \cdot h_{\text{пж.н}}}{\xi \cdot \rho_{\text{у.н}}}} = 0,67 \cdot \sqrt{\frac{9,81 \cdot 752 \cdot 0,062}{4,5 \cdot 4,29}} = 3,26$$

Перевіряємо умови на проникання рідини через отвори:

$$\omega_0 > \omega_{0,\text{min}}$$

$$8,3 > 3,26$$

Умова виконується.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 63
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

### Визначення висоти колони

Для визначення висоти колони спочатку будуємо робочі лінії збагачувальної та вичерпної частин на діаграмі  $x$ – $y$  за робочого дефлегмаційного числа  $R = 1,08$  (рисунок 4.10).

Число теоретичних тарілок визначаємо графічним методом МакКейба—Тієле (вписуванням ламаних між робочими лініями та кривою рівноваги).

За даними рисунка 4.10 визначено число теоретичних тарілок:

а) у верхній (збагачувальній) частині колони:

$$n_{Т.В} = 5$$

б) у нижній (вичерпній) частині колони:

$$n_{Т.Н} = 4$$

Значення тисків насиченої пари при середній температурі визначаються за номограмою [18, рис. 14].

Тиск насичених парів азоту, мм.рт.ст:

$$P_A = 1357$$

Діаграма  $x$ – $y$  за робочого дефлегмаційного числа  $R = 1,08$ , наведена на рисунку 4.10

Тиск насичених парів кисню, мм.рт.ст:

$$P_B = 320.$$

Таким чином, відносна леткість компонентів становить:

$$\alpha = \frac{P_A}{P_B} = \frac{1357}{320} = 4,24.$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості азоту при  $t_{cp} = -190$  °С, мПа·с:

$$\mu_A = 0,153.$$

Динамічний коефіцієнт в'язкості кисню при  $t_{cp} = -190$  °С, мПа·с:

$$\mu_B = 0,243.$$

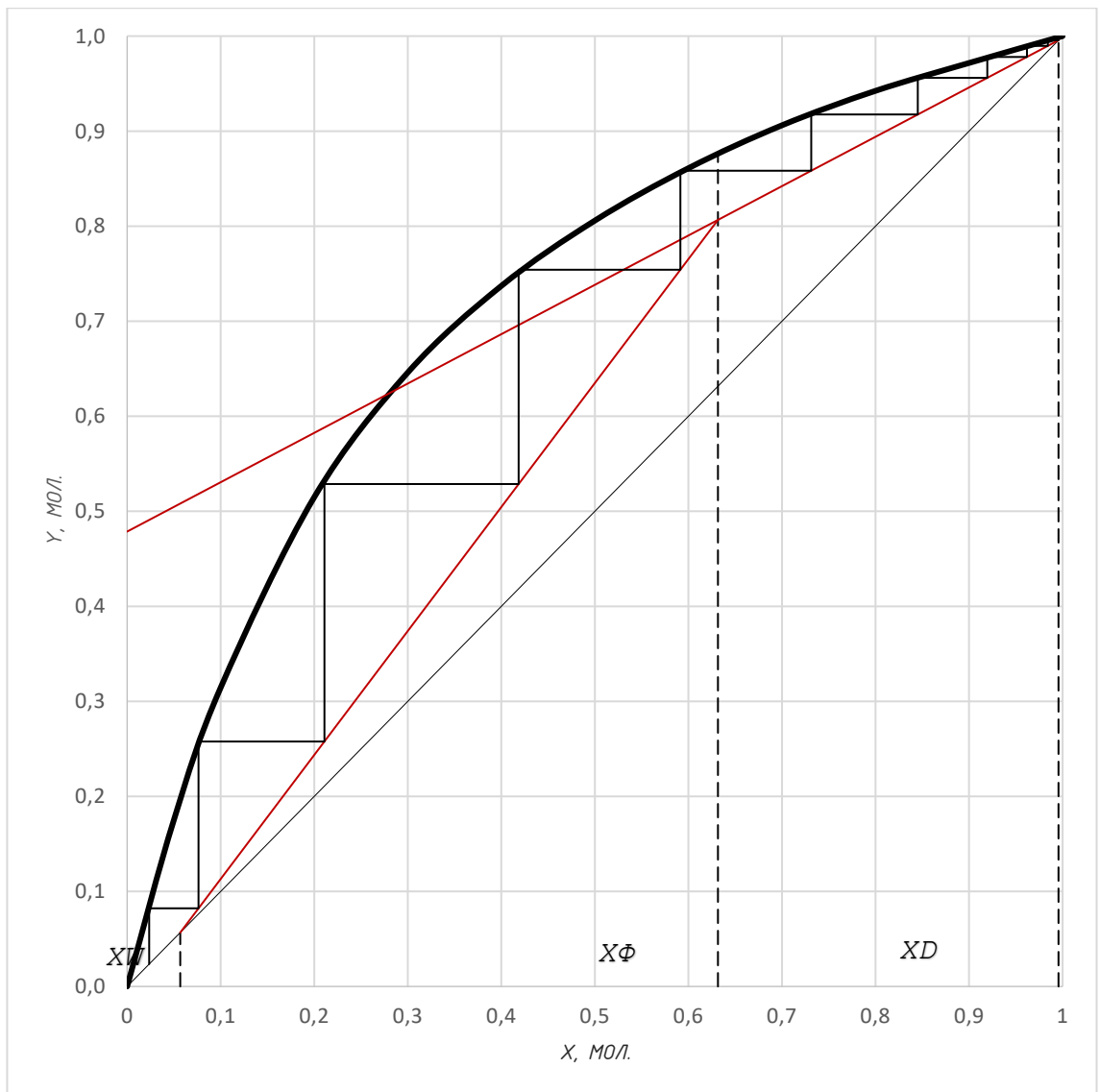


Рисунок 4.10 – Діаграма рівноваги пари–рідина для суміші азот–кисень і положення робочих ліній при  $R_{роб} = 1,08$

Середнє значення коефіцієнту динамічної в'язкості вихідної суміші, мПа·с:

$$\mu_{см} = \frac{\mu_A + \mu_B}{2} = \frac{0,153 + 0,243}{2} = 0,198.$$

Середній ККД тарілок залежить від параметра  $\alpha \cdot \mu$  :

Згідно з графіком (див. додаток В):

$$\alpha \cdot \mu = 0,198 \cdot 4,24 = 0,84.$$

Відповідно, середній ККД тарілок дорівнює:

$$\eta = 0,49.$$

Кількість дійсних тарілок в колоні:

а) у верхній (збагачувальній) частині:

$$n_B = \frac{n_{T.B}}{\eta} = \frac{8}{0,49} = 11.$$

б) у нижній (вичерпній) частині:

$$n_H = \frac{n_{T.H}}{\eta} = \frac{7}{0,49} = 9.$$

де  $n_{T.B}$ ,  $n_{T.H}$  – кількість теоретичних пластин;  $\eta$  – К.П.Д тарілок.

Загальна кількість дійсних тарілок у колоні:

$$n_{\text{заг}} = n_B + n_H = 11 + 9 = 20.$$

Загальна висота ректифікаційної колони, м:

$$\begin{aligned} H_K &= (n_{\text{заг}} - 1) \cdot h_{\text{м.т}} + H_B + H_H = \\ &= (20 - 1 - 2) \cdot 0,4 + 0,8 \cdot 2 + 1,5 + 2 = 10,6, \end{aligned}$$

де  $h_{\text{м.т}} = 0,4$  м – відстань між тарілками;  $H_B = 0,80$  м – простір між верхньою тарілкою і кришкою колони;  $H_H = 3,5$  м – простір між нижньою частиною колони і нижньою тарілкою, вибираються відповідно до рекомендацій. [19, с. 235].

Загальний гідравлічний опір в колоні, Па:

$$\Delta P_{\text{общ}} = \Delta P_B \cdot n_B + \Delta P_H \cdot n_H = 956 \cdot 11 + 979 \cdot 9 = 19319$$

## 4.2 Розрахунок штуцерів

Діаметр штуцера для відведення пари зверху колони, м:

$$d_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{п.в}}}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_{\text{п.в}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,98}{3,14 \cdot 30 \cdot 4,37}} = 0,107 \text{ м}$$

Приймаємо сталеву трубу з розміром 125 × 5 мм

Діаметр штуцера для подачі пари в нижню частину колони, м:

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 66
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot G_{\text{п.н}}}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_{\text{п.н}}}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,05}{3,14 \cdot 25 \cdot 4,29}} = 0,112 \text{ м}$$

Приймаємо сталеву трубу з розміром 125 × 5 мм.

Для подачі вихідної суміші приймаємо швидкість  $\omega = 1,5 \text{ м/с}$ .

Густина вихідної суміші при температурі  $t_F = -193 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\text{кг/м}^3$ :

$$\rho_F = \frac{1}{\frac{\bar{x}_F}{\rho_{\text{НKK}}} + \frac{1 - \bar{x}_F}{\rho_{\text{ВKK}}}} = \frac{1}{\frac{0,60}{793} + \frac{1 - 0,60}{1189}} = 915,$$

де  $\rho_{\text{НKK}}, \rho_{\text{ВKK}}$  – густина азоту та кисню відповідно при  $t_F = -193 \text{ }^\circ\text{C}^3$ ,  $\text{кг/м}^3$ .

Діаметр штуцера для подачі вихідної суміші, м:

$$d_3 = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_F}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,80}{3,14 \cdot 1,5 \cdot 915}} = 0,027$$

Приймаємо сталеву трубу з розміром 25 × 2,5 мм.

Для подачі флегми приймаємо швидкість  $\omega = 1 \text{ м/с}$

Витрата флегмової рідини,  $\text{кг/с}$ :

$$G_R = R \cdot G_D = 1,08 \cdot 0,47 = 0,50$$

Діаметр штуцера для подачі флегми, м:

$$d_4 = \sqrt{\frac{4 \cdot G_R}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_D}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,50}{3,14 \cdot 1 \cdot 805}} = 0,040$$

Приймаємо сталеву трубу з розміром 40 × 3,0 мм

Для відведення кубового продукту приймаємо швидкість [19, табл. 1.1]:

$$\omega = 0,5 \text{ м/с}$$

Діаметр штуцера для відведення кубового продукту, м:

$$d_5 = \sqrt{\frac{4 \cdot \bar{L}_H}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_W}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,38}{3,14 \cdot 0,5 \cdot 752}} = 0,057$$

Вибираємо сталеву трубу з розміром 50 × 2,5 мм

Всі прийняті діаметри штуцерів внесені в таблицю 4.5

Таблиця 4.5 – Номінальні діаметри прийнятих приєднувальних патрубків

Призначення	Номінальний діаметр DN
Штуцер для вводу вихідної суміші	25
Штуцер для відводу парів дистилляту	125
Штуцер для введення пари в колону	125
Штуцер для вводу флегми	50
Штуцер відведення кубового продукту	50

### 4.3 Розрахунок товщини циліндричної обичайки ректифікаційної колони

Мета розрахунку: Визначення товщини стінки циліндричної обичайки корпусу колони, яка б витримувала внутрішній тиск і забезпечувала необхідну міцність та стійкість конструкції.

Розрахункова схема обичайки зображена на рисунку 4.11.

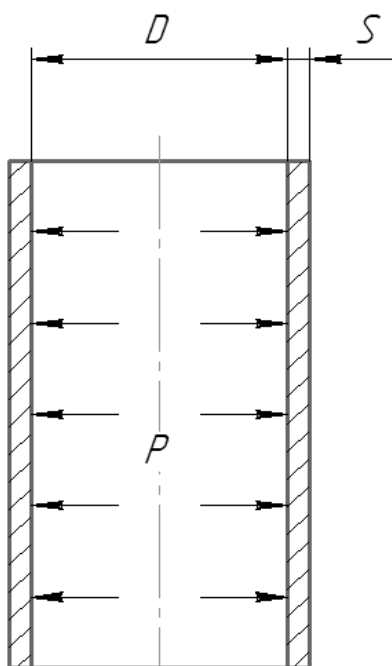


Рисунок 4.11 – Розрахункова схема обичайки, навантаженої внутрішнім тиском

Вихідні дані до розрахунку:

Розрахункова температура $t_p$ , °C	100;
Внутрішній (абсолютний) тиск $p$ , МПа	0,6;
Допустиме напруження матеріалу стінки $[\sigma]$ , МПа	174;
Внутрішній діаметр сталевієї циліндричної обичайки $D$ , м	0,8;
Матеріал стінки	12X18H10T.

Розрахунок здійснюється за методикою [20].

Розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва  $\varphi_p$ :

Для стикового шва з підварюванням кореня, що виконується вручну, коли довжина контрольованих зварних швів становить 100 % від загальної довжини  $\varphi_p = 1$ .

Розрахункова товщина стінки циліндричної обичайки, м:

$$S_R = \frac{p \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - p} = \frac{0,6 \cdot 0,8}{2 \cdot 174 \cdot 1 - 0,6} = 0,0014$$

Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії, м:

$$C_e = 0$$

Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії, м:

Оскільки у довідковій літературі не було знайдено точних даних щодо швидкості корозії у при даних умовах, то приймається:

$$C_1 = 0,002$$

Виконавча товщина стінки циліндричної обичайки у першому наближенні, м:

$$S^1 = S_R + C_1 + C_0 = 0,0014 + 0,002 + 0,00014 = 0,0035$$

Обираємо  $C_0 = 0,00014$  м через те, що найближча товщина листового прокату становить 3 мм

Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску, м:

Граничне відхилення по товщині прокату листового холоднокатаного 3 мм нормальної точності при його ширині від 1000 до 1500 включно становить 0,19 мм, тобто  $C_2 = 0,00019$  м.

Технологічний додаток до розрахункової товщини, м:

$$C_3 = 0$$

Сума додатків до розрахункової товщини, м:

$$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S^1} \leq 0,05; \\ C_1 + C_2 + C_3, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S^1} > 0,05. \end{cases}$$

$$\frac{C_2 + C_3}{S^1} = \frac{0,00019 + 0}{0,0035} = 0,054 > 0,05, \text{ тому}$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = 0,002 + 0,00019 + 0 = 0,00219$$

Виконавча товщина стінки обичайки, м:

$$S = S_R + C + C_0 = 0,0014 + 0,00219 + 0,00014 = 0,0037$$

Найближче значення товщини стінки виконавчої  $S = 0,004$ .

Перевірка умов застосування розрахункових формул, м:

$$\frac{S - C}{D} \leq 0,1 \text{ для обичайок і труб при } D \geq 0,2.$$

$$\frac{S - C}{D} = \frac{0,004 - 0,00219}{0,8} = 0,0023 \leq 0,1$$

$S \geq 2,5 \cdot 10^{-3}$  м для обичайок із сталей аустенітного і аустенітно-феритного класів.

$$0,004 \geq 2,5 \cdot 10^{-3}$$

Умови застосування розрахункових формул виконуються.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск, МПа:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S - C)}{D + S - C} = \frac{2 \cdot 174 \cdot 1 \cdot 0,004 - 0,00219}{0,8 + 0,004 - 0,00219} = 1,73$$

Перевірка умови міцності, МПа:

$$p \leq [p]$$

$$0,6 \leq 1,73$$

Умова міцності виконується.

Висновок: у результаті проведеного розрахунку встановлено, що мінімальна товщина стінки циліндричної обичайки повинна бути не меншою ніж 4 мм, що забезпечує необхідну міцність апарата при дії внутрішнього тиску. Товщина еліптичного днища також має бути не меншою 4 мм

#### 4.4 Розрахунок товщини еліптичного днища ректифікаційної колони

Мета розрахунку: Визначення необхідної товщини еліптичного днища ректифікаційної колони для забезпечення міцності та стійкості конструкції при заданому внутрішньому тиску.

Розрахункова схема днища зображена на рисунку 4.12.

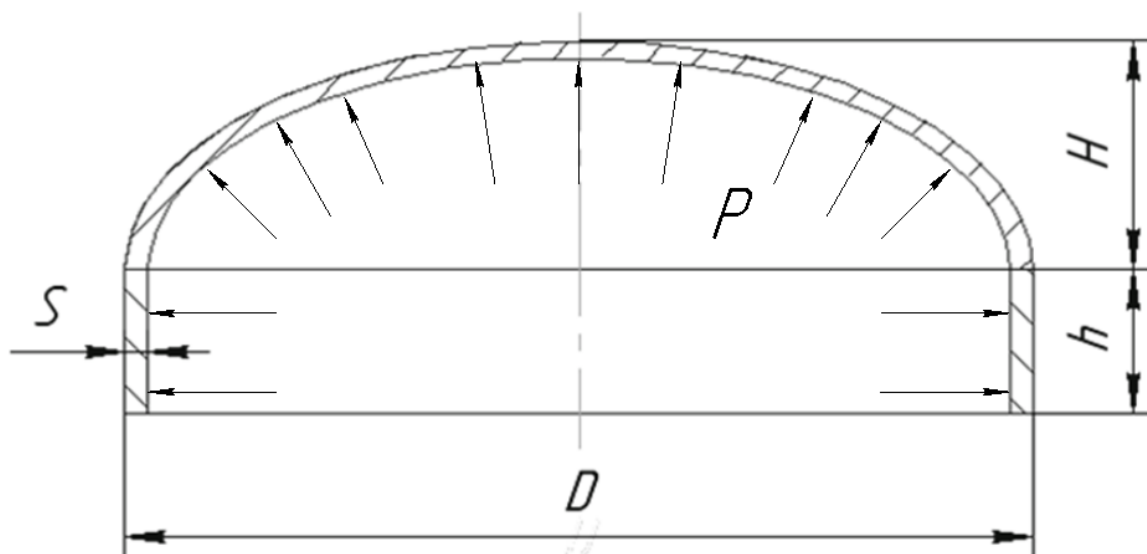


Рисунок 4.12 – Розрахункова схема днища, навантаженого внутрішнім тиском

Вихідні дані:

Розрахунковий тиск $p$ , МПа	0,6;
Виконавча товщина стінки посудини $S$ , м	0,005;
Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	0,003;
Розрахункова температура $t$ , °С	100;
Зовнішній діаметр фланця $D$ , м	0,92;
Середній діаметр прокладки $D_{cp}$ , м	0,828;
Внутрішній діаметр $D$ , м	0,8;
Діаметр болта , шпильки $d$ , м	0,02;
Кількість болтів, шпильок $n$ , шт	40;
Товщина фланця $h$ , м	0,055;
Товщина прокладки $h_n$ , м	0,002;
Ширина прокладки $b_n$ , м	0,012;
Ефективна довжина болта , шпильки $L_b$ , м	0,248;
Товщина втулки фланця $S_0$ , м	0,012;
Діаметр кола розташування болтів, шпильок $D_b$ , м	0,88.

Розрахунок здійснюється за методикою, наведеною в літературному джерелі [15].

Оскільки для проектування розглядається стандартне днище  $h_b = 0,25D = 0,2$  м, то внутрішній радіус кривизни у вершині днища  $R_e = D = 0,8$  м.

Розрахунковий коефіцієнт міцності зварного шва:

$$\varphi_p = 1.$$

Розрахункова товщина стінки днища, м:

$$S_{R_{\text{дн}}} = \frac{p \cdot R_e}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p - 0,5 \cdot p} = \frac{0,6 \cdot 0,8}{2 \cdot 174 \cdot 1 - 0,5 \cdot 0,6} = 0,0014$$

Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії, м:

$$C_e = 0,00095$$

Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії, м:

$$C_1 = 0,002$$

Виконавча товщина стінки обичайки у першому наближенні, м:

$$S_{\text{дн}}^1 = S_{R_{\text{дн}}} + C_1 + C_0 = 0,0014 + 0,002 + 0,00014 = 0,00354$$

Приймаємо  $S_{\text{дн}}^1 = 0,004$

Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску, м:

$$C_2 = 0,00019$$

Сума додатків до розрахункової товщини, м:

$$\frac{C_2 + C_3}{S_{\text{дн}}^1} = \frac{0,00019 + 0}{0,004} = 0,0475 \leq 0,05, \text{ тому}$$

$$C = C_1 = 0,002$$

Виконавча товщина стінки днища, що виконується без відбортовки, м:

$$S_{\text{дн}} = S_{R_{\text{дн}}} + C + C_e = 0,0014 + 0,002 + 0,00095 = 0,00435 \text{ м.}$$

Приймаємо  $S_{\text{дн}} = 0,004 \text{ м}$

Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску, м:

$$C_2 = 2,3 \cdot 10^{-4}$$

Сума додатків до розрахункової товщини, м:

$$C = \begin{cases} C_1, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_{\text{дн}}} \leq 0,05; \\ C_1 + C_2 + C_3, \text{ якщо } \frac{C_2 + C_3}{S_{\text{дн}}} > 0,05. \end{cases}$$

$$\frac{C_2 + C_3}{S_{\text{дн}}} = \frac{2,3 \cdot 10^{-4} + 0}{0,004} = 0,0575 > 0,05, \text{ тому}$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3 = 0,002 + 2,3 \cdot 10^{-4} + 0 = 0,00223$$

Виконавча товщина стінки днища, що виконується без відбортовки, м:

$$S_{\text{дн}} = S_{R\text{дн}} + C + C_e = 0,0014 + 0,00223 + 0,00095 = 0,00458$$

Приймаємо  $S_{\text{дн}} = 0,005$  м

Перевірка умов застосування розрахункових формул, м:

$$\begin{cases} 0,002 \leq \frac{S_{\text{дн}} - C}{D} \leq 0,1; \\ 0,2 \leq \frac{h_{\text{в}}}{D} \leq 0,5. \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0,002 \leq \frac{0,005 - 0,00223}{0,8} \leq 0,1; \\ 0,2 \leq \frac{0,2}{0,8} \leq 0,5. \end{cases}$$

$$\begin{cases} 0,002 \leq 0,00035 \leq 0,1; \\ 0,2 \leq 0,25 \leq 0,5. \end{cases}$$

Умови застосування виконуються.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск, МПа:

$$[p] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S_{\text{дн}} - C)}{D + 0,5 \cdot (S_{\text{дн}} - C)} = \frac{2 \cdot 174 \cdot 1 \cdot (0,005 - 0,00223)}{0,8 + 0,5 \cdot (0,005 - 0,00223)} = 1,2$$

Перевірка умови міцності, МПа:

$$p \leq [p]$$

$$0,6 \leq 1,2$$

Умова міцності виконується.

Висновок: в результаті проведеного розрахунку визначено мінімальну товщину еліптичного днища ректифікаційної колони, яка становить 5 мм та забезпечить необхідну міцність та стійкість конструкції за заданих умов експлуатації.

## 4.5 Розрахунок колони на вітрове навантаження ректифікаційної

### КОЛОНИ

Мета розрахунку: Перевірка колони навантаженою вітровим навантаженням на умови стійкості та міцності.

Розрахункова схема колонного апарату представлена на рисунку 4.13.

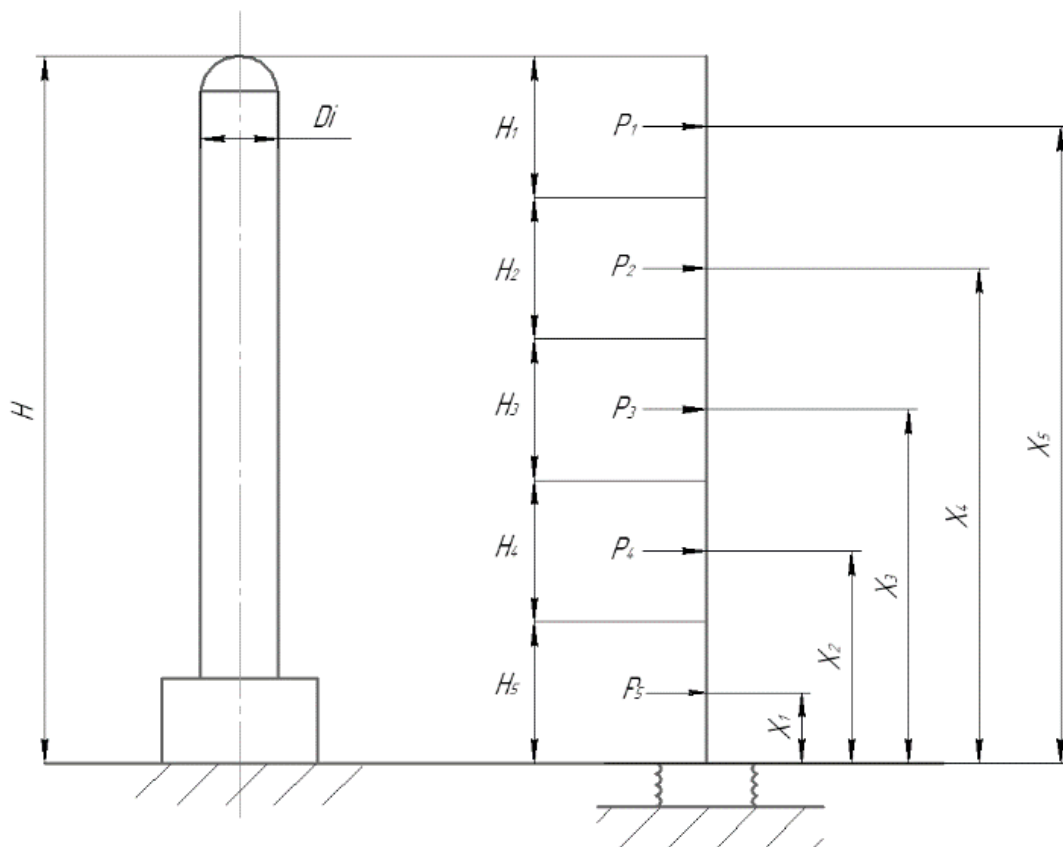


Рисунок 4.13 – Розрахункова схема до розрахунку дії вітрового навантаження

Колона виконується суцільнозварною. Висота колони поділена на 5 ділянок. На висоті  $x_{j1} = 14$  та  $x_{j2} = 8$  м розташовані 2 площадки обслуговування, що мають площі  $4,4 \text{ м}^2$  кожна. Згинаючий момент від дії ексцентричних вагових навантажень  $M_G$  відсутній. Колона має однаковий переріз впродовж усієї висоти колони.

Вихідні дані:	
Розрахунковий зовнішній тиск $p$ , МПа	0,6;
Поперечна сила $Q$ , МПа	0;
Розрахункова температура стінки $t_p$ , °С	100;
Матеріал корпусу	12Х18Н10Т;
Коефіцієнт нерівномірності стиснення ґрунту $S_k$ , МН/м <sup>3</sup>	60;
Висота колони $H$ , м	16;
Внутрішній діаметр колони $D$ , м	0,8;
Діаметр фундаментного кільця опори $D_k$ , м	4,2.
Розрахунок виконаний відповідно до алгоритму наведеному у [21].	

В результаті декількох ітерацій було визначено, що для виконання усіх умов товщина обичайки має бути не меншою від 5 мм. Тому розрахунок виконаний для 5 мм, при яких колона витримає усі необхідні навантаження.

### Маса колони

Маса циліндричної обичайки, кг:

$$D_{\text{зовн}} = D + 2 \cdot S = 0,8 + 2 \cdot 0,05 = 0,9.$$

$$m_1 = H \cdot \rho_{\text{сталі}} \cdot \pi \cdot \left( \frac{D_{\text{зовн}}^2 - D^2}{4} \right) = 16 \cdot 7700 \cdot 3,14 \cdot \left( \frac{0,9^2 - 0,8^2}{4} \right) = 16441$$

Маса теплоізоляції, кг:

$$D_{\text{зовн.із}} = D_{\text{зовн}} + 2 \cdot S_{\text{із}} = 0,9 + 2 \cdot 0,05 = 1$$

$$m_2 = H \cdot \rho_{\text{ізоляції}} \cdot \pi \cdot \left( \frac{D_{\text{зовн.із}}^2 - D_{\text{зовн}}^2}{4} \right) = 16 \cdot 70 \cdot 3,14 \cdot \left( \frac{1^2 - 0,9^2}{4} \right) = 167,$$

де  $\rho_{\text{ізоляції}} = 70 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  [22].

Маса тарілок, кг:

$$m_3 = n_d \cdot m_{\text{тар}} = 20 \cdot 27 = 540$$

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 76
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

де  $m_{\text{тар}}$  – маса однієї тарілки [25].

Маса фланців, кг:

$$m_4 = n_d \cdot m_{\text{фл}} = 24 \cdot 72,3 = 1\,735,2,$$

де  $m_{\text{фл}}$  – маса фланця без втулки.

Маса днищ, кг:

$$m_5 = n_d \cdot m_{\text{дн}} = 2 \cdot 30,1 = 60,2,$$

де  $m_{\text{дн}}$  – маса одного днища.

Маса колони, кг:

$$\begin{aligned} m &= (m_1 + m_2 + m_3 + m_4 + m_5) \cdot 1,1 = \\ &= (16441 + 167 + 540 + 1\,735,2 + 60,2) \cdot 1,1 = 20838 \end{aligned}$$

Вага колони, Н:

$$G = m \cdot g = 20838 \cdot 9,81 = 204421.$$

Вага кожної ділянки колони, Н:

$$G_i = \frac{G}{5} = \frac{204421}{5} = 40884,2.$$

Відстань від рівня кріплення колони до середини  $i$ -ї ділянки колони, м

$$x = \frac{H}{5} = \frac{16}{5} = 3,2$$

$$x_1 = 4,5 \cdot x = 4,5 \cdot 3,2 = 14,4;$$

$$x_2 = 3,5 \cdot x = 3,5 \cdot 3,2 = 11,2;$$

$$x_3 = 2,5 \cdot x = 2,5 \cdot 3,2 = 8;$$

$$x_4 = 1,5 \cdot x = 1,5 \cdot 3,2 = 4,8;$$

$$x_5 = 0,5 \cdot x = 0,5 \cdot 3,2 = 1,6.$$

Висота  $i$ -ї ділянки колони, м

$$h_i = \frac{H}{5} = \frac{16}{5} = 3,2$$

Мінімальний момент інерції підшви фундаменту,  $\text{м}^4$ :

$$I_F = \frac{1,3 \cdot \pi \cdot D_k^4}{64} = \frac{1,3 \cdot 3,14 \cdot 1,28^4}{64} = 0,171.$$

Момент інерції верхнього металевого перерізу і-ї ділянки колони щодо центральної осі, м<sup>4</sup>:

$$I_i = I = \pi \cdot \frac{(D_{\text{зовн}} - 2 \cdot C)^4 - D^4}{64} = 3,14 \cdot \frac{(1 - 2 \cdot 0,003)^4 - 0,8^4}{64} = 0,028.$$

Модуль пружності в умовах розтягу, МПа [28]:

$$E = 1,913 \cdot 10^5.$$

Період власних коливань стрижня постійного перерізу з жорстким закріпленням, с

$$T_0 = 1,8 \cdot H \cdot \sqrt{\frac{G \cdot 10^{-6} \cdot H}{g \cdot E \cdot I}} = 1,8 \cdot 16 \cdot \sqrt{\frac{40884,2 \cdot 10^{-6} \cdot 16}{9,81 \cdot 1,913 \cdot 10^5 \cdot 0,028}} = 0,2.$$

Розрахунковий період власних коливань колони, с

$$T = 0,372 \cdot \sqrt{1 + \frac{4 \cdot E \cdot I}{H \cdot C_F \cdot I_F}} = 0,372 \cdot \sqrt{\frac{4 \cdot 1,913 \cdot 10^5 \cdot 0,028}{16 \cdot 60 \cdot 0,171}} = 4,24.$$

Допоміжний коефіцієнт  $\Delta$ :

$$\Delta = \frac{1}{3}.$$

Допоміжний коефіцієнт  $\lambda$ :

$$\lambda = 0.$$

Допоміжний коефіцієнт  $\mu$ :

$$\mu = 0.$$

Допоміжний коефіцієнт  $\gamma$ :

$$\gamma = \frac{2}{3}$$

Коефіцієнти:

$$\beta_1 = \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{x_1}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_1}{H} \right)^3 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{14,4}{16} \right)^2 - \left( \frac{14,4}{16} \right)^3 \right] = 0,8505;$$

$$\beta_2 = \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{x_2}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_2}{H} \right)^3 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{11,2}{16} \right)^2 - \left( \frac{11,2}{16} \right)^3 \right] = 0,563; 5$$

$$\beta_3 = \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{x_3}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_3}{H} \right)^3 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{8}{16} \right)^2 - \left( \frac{8}{16} \right)^3 \right] = 0,3125;$$

$$\beta_4 = \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{x_4}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_4}{H} \right)^3 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{4,8}{16} \right)^2 - \left( \frac{4,8}{16} \right)^3 \right] = 0,1215;$$

$$\beta_5 = \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{x_5}{H} \right)^2 - \left( \frac{x_5}{H} \right)^3 \right] = \frac{1}{2} \cdot \left[ 3 \cdot \left( \frac{1,6}{16} \right)^2 - \left( \frac{1,6}{16} \right)^3 \right] = 0,0145.$$

Відносні переміщення центрів тяжіння, відповідно, і- х ділянок, що виникають при власних коливаннях, 1/МН·м:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \gamma \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_i} \beta_1 + \frac{x_1}{H \cdot C_F \cdot I_F} = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \frac{16}{2 \cdot 1,913 \cdot 10^5 \cdot 0,028} \cdot 0,8505 + \frac{14,4}{16 \cdot 60 \cdot 0,171} = 0,0885; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_2 &= \gamma \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_i} \beta_2 + \frac{x_2}{H \cdot C_F \cdot I_F} = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \frac{16}{2 \cdot 1,913 \cdot 10^5 \cdot 0,028} \cdot 0,5635 + \frac{11,2}{16 \cdot 60 \cdot 0,171} = 0,0688; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_3 &= \gamma \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_i} \beta_3 + \frac{x_3}{H \cdot C_F \cdot I_F} = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \frac{16}{2 \cdot 1,913 \cdot 10^5 \cdot 0,028} \cdot 0,3125 + \frac{8}{16 \cdot 60 \cdot 0,171} = 0,0490; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_4 &= \gamma \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_i} \beta_3 + \frac{x_3}{H \cdot C_F \cdot I_F} = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \frac{16}{2 \cdot 1,913 \cdot 10^5 \cdot 0,028} \cdot 0,1215 + \frac{4,8}{16 \cdot 60 \cdot 0,171} = 0,0294; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_5 &= \gamma \cdot \frac{H}{2 \cdot E \cdot I_i} \beta_3 + \frac{x_3}{H \cdot C_F \cdot I_F} = \\ &= \frac{2}{3} \cdot \frac{16}{2 \cdot 1,913 \cdot 10^5 \cdot 0,028} \cdot 0,0145 + \frac{1,6}{16 \cdot 60 \cdot 0,171} = 0,0098. \end{aligned}$$

Коефіцієнт, що враховує зміну вітрового навантаження по висоті  
КОЛОНИ:

$$\theta_1 = \left(\frac{x_1}{10}\right)^{0,3} = \left(\frac{14,4}{10}\right)^{0,3} = 1,116;$$

$$\theta_2 = \left(\frac{x_2}{10}\right)^{0,3} = \left(\frac{11,2}{10}\right)^{0,3} = 1,035;$$

$$\theta_3 = \left(\frac{x_3}{10}\right)^{0,3} = \left(\frac{8}{10}\right)^{0,3} = 0,935;$$

$$\theta_4 = \left(\frac{x_4}{10}\right)^{0,3} = \left(\frac{4,8}{10}\right)^{0,3} = 0,803;$$

$$\theta_5 = \left(\frac{x_5}{10}\right)^{0,3} = \left(\frac{1,6}{10}\right)^{0,3} = 0,577.$$

Нормативне значення вітрового тиску, Па:

$$q_0 = 370.$$

Середня складова вітрового навантаження на і-й ділянці апарата, Н:

$$P_{st1} = K \cdot q_0 \cdot \theta_1 \cdot D_{зОВН} \cdot h_i = 0,7 \cdot 370 \cdot 1,116 \cdot 0,9 \cdot 3,2 = 833;$$

$$P_{st2} = K \cdot q_0 \cdot \theta_2 \cdot D_{зОВН} \cdot h_i = 0,7 \cdot 370 \cdot 1,035 \cdot 0,9 \cdot 3,2 = 772;$$

$$P_{st3} = K \cdot q_0 \cdot \theta_3 \cdot D_{зОВН} \cdot h_i = 0,7 \cdot 370 \cdot 0,935 \cdot 0,9 \cdot 3,2 = 697;$$

$$P_{st4} = K \cdot q_0 \cdot \theta_4 \cdot D_{зОВН} \cdot h_i = 0,7 \cdot 370 \cdot 0,803 \cdot 0,9 \cdot 3,2 = 601;$$

$$P_{st5} = K \cdot q_0 \cdot \theta_5 \cdot D_{зОВН} \cdot h_i = 0,7 \cdot 370 \cdot 0,577 \cdot 0,9 \cdot 3,2 = 430.$$

Коефіцієнт пульсації тиску вітру для середини і-ї ділянки апарата на  
висоті:

$$m_1 = 0,76 \cdot \left(\frac{x_1}{10}\right)^{-0,15} = 0,76 \cdot \left(\frac{14,4}{10}\right)^{-0,15} = 0,72;$$

$$m_2 = 0,76 \cdot \left(\frac{x_2}{10}\right)^{-0,15} = 0,76 \cdot \left(\frac{11,2}{10}\right)^{-0,15} = 0,747;$$

$$m_3 = 0,76 \cdot \left(\frac{x_3}{10}\right)^{-0,15} = 0,76 \cdot \left(\frac{8}{10}\right)^{-0,15} = 0,786;$$

$$m_4 = 0,76 \cdot \left(\frac{x_4}{10}\right)^{-0,15} = 0,76 \cdot \left(\frac{4,8}{10}\right)^{-0,15} = 0,848;$$

$$m_5 = 0,76 \cdot \left(\frac{x_5}{10}\right)^{-0,15} = 0,76 \cdot \left(\frac{1,6}{10}\right)^{-0,15} = 1,001.$$

Зведене відносне прискорення центра ваги  $i$ -ї ділянки:

$$\eta_i = \alpha_i \cdot \frac{\sum_{i=1}^5 (\alpha_i \cdot m_i \cdot P_{sti})}{\sum_{i=1}^5 (\alpha_i^2 \cdot G_i)}.$$

В результаті розрахунку отримано наступні значення:

$$\eta_1 = 0,0189;$$

$$\eta_2 = 0,0146;$$

$$\eta_3 = 0,0105;$$

$$\eta_4 = 0,0063;$$

$$\eta_5 = 0,0021.$$

Безрозмірний параметр, що залежить від періоду власних коливань апарата колонного типу:

$$\varepsilon = T \cdot \frac{\sqrt{q_0}}{790} = 4,24 \cdot \frac{\sqrt{370}}{790} = 0,103.$$

Коефіцієнт:

$$\nu = 0,968 - 0,025 \cdot \sqrt{H} = 0,968 - 0,025 \cdot \sqrt{16} = 0,868.$$

Коефіцієнт динамічності:

$$\xi = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot \varepsilon} = 1,1 + \sqrt{15,5 \cdot 0,103} = 2,36.$$

Пульсаційна складова вітрового навантаження на  $i$ -й ділянці апарата,  $H$ :

$$P_{din1} = \nu \cdot G_i \cdot \xi \cdot \eta_1 = 0,868 \cdot 40884,2 \cdot 2,36 \cdot 0,0189 = 1584;$$

$$P_{din2} = \nu \cdot G_i \cdot \xi \cdot \eta_2 = 0,868 \cdot 40884,2 \cdot 2,36 \cdot 0,0146 = 1223;$$

$$P_{din3} = \nu \cdot G_i \cdot \xi \cdot \eta_3 = 0,868 \cdot 40884,2 \cdot 2,36 \cdot 0,0105 = 879;$$

$$P_{din4} = \nu \cdot G_i \cdot \xi \cdot \eta_4 = 0,868 \cdot 40884,2 \cdot 2,36 \cdot 0,0063 = 523;$$

$$P_{din5} = \nu \cdot G_i \cdot \xi \cdot \eta_5 = 0,868 \cdot 40884,2 \cdot 2,36 \cdot 0,0021 = 176.$$

Розрахункове вітрове навантаження, що діє на  $i$ -у ділянку апарата при його власних коливаннях в напрямку горизонтальної дії вітру:

$$P_1 = P_{st1} + P_{din1} = 833 + 1584 = 2417;$$

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 81
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

$$P_2 = P_{st2} + P_{din2} = 772 + 1223 = 1995;$$

$$P_3 = P_{st3} + P_{din3} = 697 + 879 = 1576;$$

$$P_4 = P_{st4} + P_{din4} = 601 + 523 = 1124;$$

$$P_5 = P_{st5} + P_{din5} = 430 + 176 = 606.$$

Коефіцієнт, що враховує зміну середньої складової вітрового тиску для висоти колони:

$$\theta_{j1} = \left(\frac{x_{j1}}{10}\right)^{0,3} = \left(\frac{14}{10}\right)^{0,3} = 1,106;$$

$$\theta_{j2} = \left(\frac{x_{j2}}{10}\right)^{0,3} = \left(\frac{8}{10}\right)^{0,3} = 0,935.$$

Допоміжний коефіцієнт для j-ї площадки на висоті колони:

$$\chi_{j1} = 1,56 \cdot \left(\frac{x_{j1}}{H}\right)^{1,6} = 1,56 \cdot \left(\frac{14}{16}\right)^{1,6} = 1,26;$$

$$\chi_{j2} = 1,56 \cdot \left(\frac{x_{j2}}{H}\right)^{1,6} = 1,56 \cdot \left(\frac{8}{16}\right)^{1,6} = 0,515;$$

Коефіцієнт пульсації тиску вітру для j-ї площадки колони на висоті:

$$m_{j1} = 0,76 \cdot \left(\frac{x_{j1}}{10}\right)^{-0,15} = 0,76 \cdot \left(\frac{14}{10}\right)^{-0,15} = 0,722;$$

$$m_{j2} = 0,76 \cdot \left(\frac{x_{j2}}{10}\right)^{-0,15} = 0,76 \cdot \left(\frac{8}{10}\right)^{-0,15} = 0,786.$$

Середня складова вітрового навантаження, прикладена на обслуговуючу j-ю площадку, розташовану на висоті над рівнем кріплення колони, Н·м:

$$\begin{aligned} M_{Vj1} &= 0,85 \cdot q_0 \cdot \theta_{j1} \cdot (x_{j1} - x_0) \cdot (1 + 0,75 \cdot \xi \cdot x_{j1} \cdot m_{j1}) \cdot A_{j1} = \\ &= 0,85 \cdot 370 \cdot 1,106 \cdot (14 - 1,5) \cdot (1 + 0,75 \cdot 2,36 \cdot 1,26 \cdot 0,722) \cdot 1,28 = \\ &= 14566; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M_{Vj2} &= 0,85 \cdot q_0 \cdot \theta_{j2} \cdot (x_{j2} - x_0) \cdot (1 + 0,75 \cdot \xi \cdot x_{j2} \cdot m_{j2}) \cdot A_{j2} = \\ &= 0,85 \cdot 370 \cdot 0,935 \cdot (8 - 1,5) \cdot (1 + 0,75 \cdot 2,36 \cdot 0,515 \cdot 0,786) \cdot 1,28 = 4192. \end{aligned}$$

Розрахунковий згинаючий момент від дії вітрового навантаження в розрахунковому перерізі апарата на висоті, Н·м:

$$M_V = \sum_{i=1}^5 P_1 \cdot (x_i - x_0) + \sum_{i=1}^2 M_{Vj} = 82405$$

Перша умова виконання розрахунку на резонансне вихрове збудження, м:

$$\frac{H}{D_{min}} > 10;$$

$$\frac{16}{0,9} = 17,7 > 10;$$

Умова виконується, тоді потрібно здайснити подальший розрахунок на резонансне вихрове збудження.

Критична швидкість вітру, яка викликає резонансні коливання  $V_{cr}$ , м/с:

$$V_{cr} = \frac{5D_H}{T} = \frac{5 \cdot 0,9}{4,24} = 1,06$$

Висота визначення максимальної розрахункової швидкості вітру, м:

$$x_{экв} = 0,8H = 0,8 \cdot 16 = 12,8$$

Коефіцієнт:

$$\theta = (x_{экв} / 10)^{0,3} = (12,8 / 10)^{0,3} = 1,08$$

Максимальна розрахункова швидкість вітру на висоті, м/с:

$$V_{max} = 1,5\sqrt{q_0 \cdot (\theta)} = 1,5\sqrt{370 \cdot 1,08} = 29,98$$

Друга умова виконання розрахунку на резонансне вихрове збудження, м/с:

$$V_{cr} < V_{max}$$

$$1,06 < 29,98$$

Максимальне відносне переміщення колони, що виникає при власних коливаннях, 1/(МН.м):

$$\alpha_H = \gamma \frac{H}{2E \cdot I_1} + \frac{1}{2C_F \cdot I_F} = \frac{2}{3} \cdot \frac{16}{2 \cdot 1,913 \cdot 10^5 \cdot 0,028} + \frac{1}{2 \cdot 60 \cdot 0,171} = 0,05$$

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 83
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

Аеродинамічна сила при резонансному вихровому збудженні, що викликає поперечні коливання в площині, перпендикулярній напрямку вітрового потоку, на і-й ділянці колони, Н:

$$R_{VRi} = 4,5\pi \cdot V_{cr}^2 \cdot D_i \cdot h_i \frac{\alpha_i}{\alpha_H}$$

$$P_{VR1} = 4,5\pi \sqrt{V_{cr}^2} \cdot D_1 \cdot h_1 \cdot \frac{\alpha_1}{\alpha_H} = 4,5 \cdot 3,1416 \cdot 1,06 \cdot 0,9 \cdot 3,2 \cdot \frac{0,0885}{0,05} = 76,3;$$

$$P_{VR2} = 4,5\pi \sqrt{V_{cr}^2} \cdot D_2 \cdot h_2 \cdot \frac{\alpha_2}{\alpha_H} = 4,5 \cdot 3,1416 \cdot 1,06 \cdot 0,9 \cdot 3,2 \cdot \frac{0,0688}{0,05} = 59,3;$$

$$P_{VR3} = 4,5\pi \sqrt{V_{cr}^2} \cdot D_3 \cdot h_3 \cdot \frac{\alpha_3}{\alpha_H} = 4,5 \cdot 3,1416 \cdot 1,06 \cdot 0,9 \cdot 3,2 \cdot \frac{0,0490}{0,05} = 42,3;$$

$$P_{VR4} = 4,5\pi \sqrt{V_{cr}^2} \cdot D_4 \cdot h_4 \cdot \frac{\alpha_4}{\alpha_H} = 4,5 \cdot 3,1416 \cdot 1,06 \cdot 0,9 \cdot 3,2 \cdot \frac{0,0294}{0,05} = 25,3;$$

$$P_{VR5} = 4,5\pi \sqrt{V_{cr}^2} \cdot D_5 \cdot h_5 \cdot \frac{\alpha_5}{\alpha_H} = 4,5 \cdot 3,1416 \cdot 1,06 \cdot 0,9 \cdot 3,2 \cdot \frac{0,0098}{0,05} = 8,45.$$

Розрахунков е вітрове навантаження, що діє на і - у ділянку колони в напрямку вітрового потоку, Н:

$$P_{cri} = \left( \frac{V_{cr}}{V_{max}} \right)^2 P_i$$

$$P_{cr1} = \left( \frac{1,06}{29,98} \right)^2 \cdot 76,3 = 0,00125 \cdot 76,3 = 0,095;$$

$$P_{cr2} = \left( \frac{1,06}{29,98} \right)^2 \cdot 59,3 = 0,00125 \cdot 59,3 = 0,074;$$

$$P_{cr3} = \left( \frac{1,06}{29,98} \right)^2 \cdot 42,3 = 0,00125 \cdot 42,3 = 0,053;$$

$$P_{cr4} = \left( \frac{1,06}{29,98} \right)^2 \cdot 25,3 = 0,00125 \cdot 25,3 = 0,032;$$

$$P_{cr5} = \left( \frac{1,06}{29,98} \right)^2 \cdot 8,45 = 0,00125 \cdot 8,45 = 0,011.$$

Розрахунковий згинаючий момент в розрахунковому перерізі колони на висоті  $x_0$  від спільної дії аеродинамічної сили при резонансному вихровому збудженні і вітрового навантаження, Н.м:

$$M_{VR} = \sum_{i=1}^n \left[ \left( \sqrt{P_{VRi}^2 + P_{cri}^2} \right) (x_i - x_0) \right]$$

$$M_{VR1} = \left( \sqrt{P_{VR1}^2 + P_{cr1}^2} \right) (x_1 - x_0) = \sqrt{76,3^2 + 0,095^2} \cdot (14,4 - 1,5) = 984,3;$$

$$M_{VR2} = \left( \sqrt{P_{VR2}^2 + P_{cr2}^2} \right) (x_2 - x_0) = \sqrt{59,3^2 + 0,074^2} \cdot (11,2 - 1,5) = 575,2;$$

$$M_{VR3} = \left( \sqrt{P_{VR3}^2 + P_{cr3}^2} \right) (x_3 - x_0) = \sqrt{42,3^2 + 0,053^2} \cdot (8 - 1,5) = 274,95;$$

$$M_{VR4} = \left( \sqrt{P_{VR4}^2 + P_{cr4}^2} \right) (x_4 - x_0) = \sqrt{25,3^2 + 0,032^2} \cdot (4,8 - 1,5) = 83,5;$$

$$M_{VR5} = \left( \sqrt{P_{VR5}^2 + P_{cr5}^2} \right) (x_5 - x_0) = \sqrt{8,45^2 + 0,011^2} \cdot (1,6 - 1,5) = 0,845.$$

$$\begin{aligned} M_{VR} &= M_{VR1} + M_{VR2} + M_{VR3} + M_{VR4} + M_{VR5} = \\ &= 984,3 + 575,2 + 274,95 + 83,5 + 0,845 = 1918,8 \end{aligned}$$

Висновок: в результаті розрахунків було визначено, що для забезпечення необхідних умов міцності та стійкості колони при дії вітрових навантажень, мінімальна товщина її обичайки повинна становити 16 мм. Для підвищення стійкості колони та зменшення її деформацій під впливом вітру, необхідно встановити 12 ребер жорсткості. Ребра повинні бути рівномірно розташовані по периметру колони з кроком 3 м.

#### 4.6 Розрахунок колонного апарату на міцність

Мета розрахунку: Перевірка колони, навантаженої вітровим навантаженням, на умови стійкості та міцності.

Розрахункова схема колонного апарату представлена на рисунку 4.13.

Вихідні дані:

Розрахунковий тиск $p$ , МПа	0,6;
Виконавча товщина стінки посудини $S$ , м	0,005;
Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	0,003;
Розрахункова температура $t$ , °С	100;
Зовнішній діаметр фланця $D$ , м	0,92;
Середній діаметр прокладки $D_{cp}$ , м	0,828;
Внутрішній діаметр $D$ , м	0,8;
Діаметр болта, шпильки $d$ , м	0,02;
Кількість болтів, шпильок $n$ , шт	40;
Товщина фланця $h$ , м	0,055;
Товщина прокладки $h_n$ , м	0,002;
Ширина прокладки $b_n$ , м	0,012;
Ефективна довжина болта, шпильки $L_b$ , м	0,136;
Товщина втулки фланця $S_0$ , м	0,012;
Діаметр кола розташування болтів, шпильок $D_b$ , м	0,88.

Розрахунок виконаний відповідно до алгоритму, наведеного в літературному джерелі [21].

Розрахункові навантаження, які діють на колону, МНм :

$$F = G = 0,204421;$$

$$M_V = 0,082405;$$

$$M = M_G + \max(M_V, M_{VR}) = 0 + \max(82405, 1918,8) = 0,082405.$$

Загальне мембранне меридіональне напруження в циліндричній обичайці колонного апарата, включаючи опору, в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинаючий момент викликає розтяг, МПа:

$$\begin{aligned}\sigma_{x1} &= \frac{-p \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (S - C)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C)} = \\ &= \frac{-0,6 \cdot (0,8 + 0,005)}{4 \cdot (0,005 - 0,00)} - \frac{0,204421}{\pi \cdot 0,8 \cdot (0,005 - C)} + \frac{4 \cdot 0,082405}{\pi \cdot 0,8^2 \cdot (0,005 - C)} = \\ &= -19,06\end{aligned}$$

Загальне мембранне меридіональне напруження в циліндричній обичайці колонного апарата, включаючи опору, в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинаючий момент викликає стиск, МПа:

$$\begin{aligned}\sigma_{x2} &= \frac{-p \cdot (D + S)}{4 \cdot (S - C)} - \frac{F}{\pi \cdot D \cdot (S - C)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D^2 \cdot (S - C)} = \\ &= \frac{-0,6 \cdot (0,8 + 0,005)}{4 \cdot (0,005 - 0,003)} - \frac{0,204421}{\pi \cdot 0,8 \cdot (0,005 - 0,003)} - \frac{4 \cdot 0,082405}{\pi \cdot 0,8^2 \cdot (0,005 - 0,003)} = \\ &= -183\end{aligned}$$

Загальні мембранні кільцеві напруження, МПа:

$$\sigma_y = \frac{-p \cdot (D + S)}{2 \cdot (S - C)} = \frac{0,6 \cdot (0,8 + 0,005)}{2 \cdot (0,005 - 0,003)} = -120,75$$

Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинальний момент викликає розтяг, МПа:

$$\begin{aligned}\sigma_{E1} &= \max(|\sigma_{x1} - \sigma_y|, |\sigma_{x1}|, |\sigma_y|) = \\ &= \max(|-19,06 - (-120,75)|, |-19,06|, |-120,75|) = 120,75\end{aligned}$$

Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинальний момент викликає стиск, МПа:

$$\begin{aligned}\sigma_{E2} &= \max(|\sigma_{x2} - \sigma_y|, |\sigma_{x2}|, |\sigma_y|) = \\ &= \max(|-183 - (-120,75)|, |-183|, |-120,75|) = 183\end{aligned}$$

Умова міцності апарата колонного типу при спільній дії навантажень:

$$\begin{aligned}\max(\sigma_{E1}, \sigma_{E2}) &\leq 1,2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \\ \max(120,75, 183) &\leq 1,2 \cdot 174 \cdot 1 \\ 183 &\leq 208,8\end{aligned}$$

Умова міцності виконується.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 87
----------------------	---------------	-----------------	------	-------------

Висновок: в результаті розрахунків було визначено, що колонний апарат повністю відповідає вимогам та нормам щодо здатності витримувати очікувані вітрові навантаження. Це означає, що конструкція апарата має достатній запас міцності, щоб протистояти силам вітру без ризику руйнування чи втрати несучої здатності. Таким чином, забезпечується необхідний рівень безпеки та надійності експлуатації колонного апарата навіть за несприятливих погодних умов.

#### 4.7 Розрахунок колонного апарата на стійкість

Мета розрахунку: Перевірка колонного апарата на міцність при спільній дії навантажень, таких як внутрішній тиск, вітрове навантаження та вага конструкції.

Розрахункова схема колонного апарату представлена на рисунку 4.13.

Вихідні дані:

Розрахунковий тиск $p$ , МПа	0,6;
Виконавча товщина стінки посудини $S$ , м	0,005;
Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	0,003;
Розрахункова температура $t$ , °C	100;
Зовнішній діаметр фланця $D$ , м	0,92;
Середній діаметр прокладки $D_{cn}$ , м	0,828;
Внутрішній діаметр $D$ , м	0,8;
Діаметр болта, шпильки $d$ , м	0,02;
Кількість болтів, шпильок $n$ , од.	40;
Товщина фланця $h$ , м	0,055;
Товщина прокладки $h_n$ , м	0,002;
Ширина прокладки $b_n$ , м	0,012;

Ефективна довжина болта , шпильки $L_b$ , м	0,136;
Товщина втулки фланця $S_0$ , м	0,012;
Діаметр кола розташування болтів, шпильок $D_b$ , м	0,88.

Розрахунок виконаний відповідно до алгоритму, наведеного в літературному джерелі [21].

Коефіцієнт запасу стійкості  $n_y$ :

$$n_y = 2,4.$$

Розрахункова довжина обичайки корпусу колони, м:

через те, що колона має два днища

$$l = l_0 + 2 \cdot l_B + 2 \cdot \frac{h_{\text{дн}}}{3} = 14 + 2 \cdot 0 + 2 \cdot \frac{0,55}{3} = 14,4.$$

Коефіцієнт:

$$B_1 = \min \left( 1; 9,45 \cdot \frac{D}{l} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (S - C)}} \right) =$$

$$= \min \left( 1; 9,45 \cdot \frac{0,8}{14,4} \cdot \sqrt{\frac{0,8}{100 \cdot (0,005 - 0,003)}} \right) = \min(1; 1,05) = 1$$

Допустимий зовнішній тиск з умови міцності, МПа:

$$[p]_{\sigma} = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (S - C)}{D + S - C} = \frac{2 \cdot 174 \cdot (0,005 - 0,003)}{0,8 + 0,005 - 0,003} = 0,87$$

Допустимий зовнішній тиск з умови стійкості в границях пружності  $[p]_E$ , МПа:

$$[p]_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot E \cdot D}{n_y \cdot B_1 \cdot l} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right]^{2,5} =$$

$$= \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,913 \cdot 10^5 \cdot 0,8}{2,4 \cdot 1 \cdot 14,4} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,005 - 0,003)}{0,8} \right]^{2,5} = 0,0029.$$

Допустимий зовнішній тиск, МПа:

$$[p] = \frac{[p]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[p]_{\sigma}}{[p]_E}\right)^2}} = \frac{0,87}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,87}{0,0029}\right)^2}} = 0,0029.$$

Допустима осьова стискуюча сила з умови міцності, МН:

$$\begin{aligned} [F]_{\sigma} &= \pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot [\sigma] = \\ &= 3,14 \cdot (0,8 + 0,005 - 0,003) \cdot (0,005 - 0,003) \cdot 174 = 0,88. \end{aligned}$$

Допустима осьова стискуюча сила з умови місцевої стійкості в границях пружності, МН:

$$\begin{aligned} [F]_{E1} &= \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (S - C)}{D}\right]^{2,5} = \\ &= \frac{31 \cdot 1,913}{2,4} \cdot 0,8^2 \cdot \left[\frac{100 \cdot (0,005 - 0,003)}{0,8}\right]^{2,5} = 0,49. \end{aligned}$$

Зведена розрахункова довжина, м:

$$\frac{l}{D} = \frac{14,5}{0,8} = 18,25 > 10,$$

тому:

$$l_{зв} = 1,12l = 1,12 \cdot 14,5 = 16,24 \text{ м.}$$

Гнучкість:

$$\lambda_r = \frac{2,83 \cdot l_{зв}}{D + S - C} = \frac{2,83 \cdot 16,24}{0,8 + 0,005 - 0,003} = 57,3.$$

Допустима осьова стискуюча сила з умови загальної стійкості в границях пружності, МН:

$$\begin{aligned} [F]_{E2} &= \frac{\pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot E}{n_y} \cdot \left(\frac{\pi}{\lambda_r}\right)^2 = \\ &= \frac{3,14 \cdot (0,8 + 0,005 - 0,003) \cdot (0,005 - 0,003) \cdot 1,93 \cdot 10^5}{2,4} \cdot \left(\frac{3,14}{57,3}\right)^2 = 1,21. \end{aligned}$$

Допустиме осьове стискуюче зусилля з умови стійкості, МН:

$$[F]_E = \begin{cases} [F]_{E1} \text{ якщо } \frac{l}{D} \leq 10 \\ \min([F]_{E1}; [F]_{E2}) \text{ якщо } \frac{l}{D} > 10 \end{cases};$$
$$\frac{l}{D} = \frac{14,5}{0,8} = 18,125 > 10,$$

тому:

$$[F]_E = \min([F]_{E1}; [F]_{E2}) = \min(0,49; 1,21) = 0,49.$$

Допустиме осьове стискуюче зусилля МН:

$$[F] = \frac{[F]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[F]_{\sigma}}{[F]_E}\right)^2}} = \frac{0,88}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,88}{0,49}\right)^2}} = 0,43.$$

Допустимий згинаючий момент з умови міцності, МН·м:

$$[M]_{\sigma} = 0,25 \cdot D \cdot [F]_{\sigma} = 0,25 \cdot 0,8 \cdot 0,88 = 0,176.$$

Допустимий згинаючий момент з умови стійкості в границях пружності,

Н·м:

$$[M]_E = \frac{D \cdot [F]_{E1}}{3,5} = \frac{0,8 \cdot 0,49}{3,5} = 0,112$$

Допустимий згинаючий момент, МН·м:

$$[M] = \frac{[M]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\sigma}}{[M]_E}\right)^2}} = \frac{0,176}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,176}{0,112}\right)^2}} = 0,0945.$$

Умова стійкості колони (поперечна сила  $Q$  на колону не діє), МН·м:

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1;$$
$$\frac{0,6}{0,0029} + \frac{0,2}{0,43} + \frac{0,082}{0,0945} = 4,968 \leq 1.$$

Умова стійкості не виконується, тому, що значення допустимого зовнішнього тиску є недостатнім і не задовольняє умову стійкості апарата.

Для забезпечення рівномірного розподілу навантаження та підвищення ефективності посилення конструкції було прийнято рішення збільшити товщину стінки корпусу, а також додати 20 ребер жорсткості. Завдяки цим заходам забезпечується досягнення умови стійкості та підвищення надійності роботи апарата.

$$n_p = 20.$$

Розрахункова довжина обичайки колони, м:

$$l = \frac{l_0}{n_p - 1} = \frac{14}{20 - 1} = 1,4.$$

Коефіцієнт:

$$B_1 = \min \left( 1; 9,45 \cdot \frac{D}{l} \cdot \sqrt{\frac{D}{100 \cdot (S - C)}} \right) =$$

$$= \min \left( 1; 9,45 \cdot \frac{0,8}{1,4} \cdot \sqrt{\frac{0,8}{100 \cdot (0,01 - 0,003)}} \right) = \min(1; 5,77) = 1$$

Допустимий зовнішній тиск з умови міцності, МПа:

$$[p]_\sigma = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot (S - C)}{D + S - C} = \frac{2 \cdot 174 \cdot (0,01 - 0,003)}{0,8 + 0,01 - 0,003} = 3$$

Допустимий зовнішній тиск з умови стійкості в границях пружності, МПа:

$$[p]_E = \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot E \cdot D}{n_y \cdot B_1 \cdot l} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right]^{2,5} =$$

$$= \frac{2,08 \cdot 10^{-5} \cdot 1,913 \cdot 10^5 \cdot 0,8}{2,4 \cdot 1 \cdot 1,4} \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,01 - 0,003)}{0,8} \right]^{2,5} = 0,74.$$

Допустимий зовнішній тиск, МПа:

$$[p] = \frac{[p]_\sigma}{\sqrt{1 + \left( \frac{[p]_\sigma}{[p]_E} \right)^2}} = \frac{3}{\sqrt{1 + \left( \frac{3}{0,74} \right)^2}} = 0,718.$$

Допустима осьова стискуюча сила з умови міцності, МН:

$$\begin{aligned} [F]_{\sigma} &= \pi \cdot (D + S - C) \cdot (S - C) \cdot [\sigma] = \\ &= 3,14 \cdot (0,8 + 0,01 - 0,003) \cdot (0,01 - 0,003) \cdot 174 = 3,08. \end{aligned}$$

Допустима осьова стискуюча сила з умови місцевої стійкості в границях пружності  $[F]_{E1}$ , МН:

$$\begin{aligned} [F]_{E1} &= \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S - C)}{D} \right]^{2,5} = \\ &= \frac{31 \cdot 1,913}{2,4} \cdot 0,8^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,01 - 0,003)}{0,8} \right]^{2,5} = 11,32. \end{aligned}$$

Розрахункова довжина обичайки колонного апарата не перевищує внутрішній діаметр  $D$  колони більше ніж у 10 разів:

$$\frac{l}{D} = \frac{1,4}{0,8} = 1,75 < 10$$

Тому допустиме осьове стискуюче зусилля з умови стійкості, МН

$$[F]_E = [F]_{E1} = 11,32$$

Допустиме осьове стискуюче зусилля, МН:

$$[F] = \frac{[F]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_{\sigma}}{[F]_E} \right)^2}} = \frac{3,08}{\sqrt{1 + \left( \frac{3,08}{11,32} \right)^2}} = 2,97.$$

Допустимий згинаючий момент з умови міцності, МН·м:

$$[M]_{\sigma} = 0,25 \cdot D \cdot [F]_{\sigma} = 0,25 \cdot 0,8 \cdot 3,08 = 0,616.$$

Допустимий згинаючий момент з умови стійкості в границях пружності, Н·м:

$$[M]_E = \frac{D \cdot [F]_{E1}}{3,5} = \frac{0,8 \cdot 11,32}{3,5} = 2,58$$

Допустимий згинаючий момент, МН·м:

$$[M] = \frac{[M]_{\sigma}}{\sqrt{1 + \left(\frac{[M]_{\sigma}}{[M]_E}\right)^2}} = \frac{0,616}{\sqrt{1 + \left(\frac{0,616}{2,58}\right)^2}} = 0,6.$$

Умова стійкості колони (поперечна сила  $Q$  на колону не діє), МН·м:

$$\frac{p}{[p]} + \frac{F}{[F]} + \frac{M}{[M]} \leq 1;$$
$$\frac{0,6}{0,718} + \frac{0,2}{2,97} + \frac{0,082}{0,6} = 1 \leq 1.$$

Висновок: Розрахунки показали, що для забезпечення необхідної стійкості колони потрібно збільшити товщину стінки корпусу до 10 мм, а також встановити 20 ребер жорсткості. Таке конструктивне рішення дозволяє підвищити опір оболонки дії зовнішнього тиску, забезпечити рівномірний розподіл навантаження та запобігти втраті стійкості конструкції. У результаті вдосконалення конструкції досягається необхідний запас міцності.

#### 4.8 Розрахунок опорної обичайки колонного апарату

Мета розрахунку: Перевірка опорної обичайки на міцність та стійкість.

Розрахункова схема зображена на рисунку 4.14.

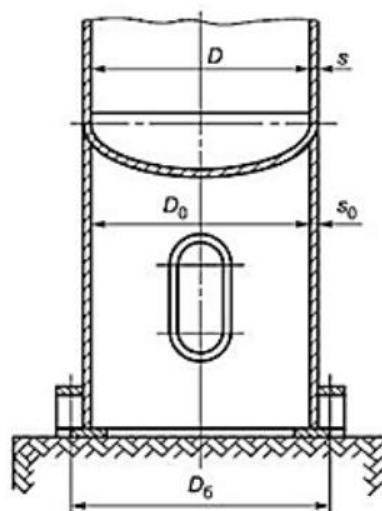


Рисунок 4.14 – Розрахункова схема опорної обичайки

Вихідні дані:

Внутрішній діаметр опорної обичайки $D_o$ , м	0,8
Виконавча товщина опорної обичайки $S_o$ , м	0,01
Сума додатків до розрахункової товщини стінки опорної обичайки $C_o$ , м	0,002
Сумарний додаток на корозію до діаметра фундаментного болта $C_b$ , м	0,002
Кількість фундаментних болтів $n$ , од	6
Діаметр кола фундаментних болтів $D_b$ , м	0,88

Розрахунок виконаний відповідно до алгоритму наведеному у [21].

Допустиме напруження та модуль пружності матеріалу опорної обичайки, МПа:

$$[\sigma] = 174$$

Розрахункові навантаження, які діють на колону, МНм :

$$F = G = 0,204421;$$

$$M_V = 0,082405;$$

$$M = M_G + \max(M_V, M_{VR}) = 0 + \max(0,082405; 0,001918) = 0,082405.$$

Загальне мембранне меридіональне напруження в опорній обичайці колонного апарата, МПа:

$$\begin{aligned}\sigma_{x1} &= \frac{p \cdot (D_o + S_o)}{4 \cdot (S_o - C_o)} - \frac{F}{\pi \cdot D_o \cdot (S_o - C_o)} + \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D_o^2 \cdot (S_o - C_o)} = \\ &= \frac{-0,6 \cdot (0,8 + 0,01)}{4 \cdot (0,01 - 0,002)} - \frac{0,2}{3,14 \cdot 0,8 \cdot (0,01 - 0,002)} + \frac{4 \cdot 0,082405}{\pi \cdot 0,8^2 \cdot (0,01 - 0,002)} = \\ &= -4,64.\end{aligned}$$

Загальне мембранне меридіональне напруження в опорній обичайці колонного апарата, МПа:

$$\begin{aligned}\sigma_{x2} &= \frac{p \cdot (D_o + S_o)}{4 \cdot (S_o - C_o)} - \frac{F}{\pi \cdot D_o \cdot (S_o - C_o)} - \frac{4 \cdot M}{\pi \cdot D_o^2 \cdot (S_o - C_o)} = \\ &= \frac{-0,6 \cdot (0,8 + 0,01)}{4 \cdot (0,01 - 0,002)} - \frac{0,2}{3,14 \cdot 0,8 \cdot (0,01 - 0,002)} - \frac{4 \cdot 0,082405}{\pi \cdot 0,8^2 \cdot (0,01 - 0,002)} = \\ &= -45,6.\end{aligned}$$

Загальні мембранні кільцеві напруження, Па:

$$\sigma_y = \frac{p \cdot (D_o + S_o)}{2 \cdot (S_o - C_o)} = \frac{-0,6 \cdot (0,8 + 0,01)}{2 \cdot (0,01 - 0,002)} = -30,37.$$

Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинальний момент викликає розтяг, МПа:

$$\begin{aligned}\sigma_{E1} &= \max(|\sigma_{x1} - \sigma_y|, |\sigma_{x1}|, |\sigma_y|) \\ &= \max(|-4,64 - (-30,37)|, |-4,64|, |-30,37|) = 30,37.\end{aligned}$$

Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі апарата на стороні, де згинальний момент викликає стиск, МПа:

$$\begin{aligned}\sigma_{E2} &= \max(|\sigma_{x2} - \sigma_y|, |\sigma_{x2}|, |\sigma_y|) = \\ &= \max(|-45,6 + (-30,37)|, |-45,6|, |-30,37|) = 75,97.\end{aligned}$$

Умова міцності обичайки при спільній дії навантажень:

$$\begin{aligned}\max(\sigma_{E1}, \sigma_{E2}) &\leq 1,2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi; \\ \max(30,37; 75,97) &\leq 1,2 \cdot 174 \cdot 1; \\ 75,97 &\leq 208,8;\end{aligned}$$

Умова міцності виконується.

Перевірка міцності зварного шва, що з'єднує корпус апарата з опорною обичайкою

$$\begin{aligned}\frac{1}{\pi \cdot D_o \cdot S_o} \cdot \left( \frac{4 \cdot M}{D_o} + F \right) &< 0,8 \cdot [\sigma]; \\ \frac{1}{3,14 \cdot 0,8 \cdot 0,02} \cdot \left( \frac{4 \cdot 0,082405}{0,8} + 0,2 \right) &< 0,8 \cdot 174;\end{aligned}$$

$$12,2 < 139,2;$$

Умова міцності зварного шва виконується.

Перевірка умови для проведення розрахунку фундаментних болтів:

$$M > 0,44 \cdot F \cdot D_6;$$

$$0,082405 > 0,44 \cdot 0,2 \cdot 0,88;$$

$$0,082405 > 0,077.$$

Необхідно проводити розрахунок діаметра і кількості фундаментних болтів

Коефіцієнт:

Оскільки

$$\frac{F \cdot D_6}{M} = \frac{0,2 \cdot 0,88}{0,082405} = 2,15 \geq 0,5,$$

то

$$\begin{aligned} \chi_6 &= 2,7 - 2 \frac{F \cdot D_6}{M} + 3,7 \left( \frac{F \cdot D_6}{M} \right)^2 - 2,5 \left( \frac{F \cdot D_6}{M} \right)^3 + 0,65 \left( \frac{F \cdot D_6}{M} \right)^4 = \\ &= 2,7 - 2 \frac{0,2 \cdot 0,88}{0,082405} + 3,7 \left( \frac{0,2 \cdot 0,88}{0,082405} \right)^2 - 2,5 \left( \frac{0,2 \cdot 0,88}{0,082405} \right)^3 \\ &\quad + 0,65 \left( \frac{0,2 \cdot 0,88}{0,082405} \right)^4 = 4,48 \end{aligned}$$

Кількість фундаментних болтів  $n$

Конструктивно приймаємо  $n = 6$ .

Мінімальне значення умовної границі плинності за температури 20 °С,

МПа:

$$R_{0,2}^{20} = 165,6$$

Допустиме напруження для фундаментних болтів при температурі 20 °С,

МПа:

$$\begin{aligned} n_T &= 1,65 \\ [\sigma]_B &= \frac{R_{0,2}^{20}}{n_T} = \frac{165,6}{1,65} = 100,36 \end{aligned}$$

Внутрішній діаметр різьби фундаментних болтів, м:

Оскільки

$$M > 0,44 \cdot F \cdot D_6;$$

$$0,082405 > 0,44 \cdot 0,2 \cdot 0,88;$$

$$0,082405 > 0,7744 ,$$

то

$$d_6 = \chi_6 \cdot \sqrt{\frac{M - 0,44 \cdot F \cdot D_6}{n \cdot [\sigma]_B \cdot D_6}} = 4,48 \cdot \sqrt{\frac{0,082405 - 0,44 \cdot 0,2 \cdot 0,88}{6 \cdot 100,36 \cdot 0,88}} = 0,014$$

Обираємо номінальний діаметр різьби

$$d_6 = 14 \text{ мм}$$

Площа найбільш ослабленого поперечного перерізу А, м<sup>2</sup>:

$$A = \pi \cdot D_o \cdot (S_o - C_o) - d_1 \cdot S_o = 3,14 \cdot 0,8 \cdot (0,01 - 0,002) - 0,5 \cdot 0,01 \\ = 0,015$$

Коефіцієнт:

$$\varphi_1 = \frac{A}{\pi \cdot D_o \cdot (S_o - C_o)} = \frac{0,015}{3,14 \cdot 0,8 \cdot (0,01 - 0,002)} = 0,75.$$

Коефіцієнт :

За графіками [28]

при

$$\frac{d_1}{D_o} = \frac{0,5}{0,8} = 0,625$$

$$\varphi_2 = 0,84$$

Коефіцієнт:

За графіками [28]

$$\varphi_3 = 0,18$$

Допустима осьова стискуюча сила з умови міцності, МН:

$$[F]_\sigma = \pi \cdot (D_o + S_o - C_o) \cdot (S_o - C_o) \cdot [\sigma] = \\ = 3,14 \cdot (0,8 + 0,01 - 0,002) \cdot (0,01 - 0,002) \cdot 174 = 3,53.$$

Допустима осьова стискаюча сила з умови місцевої стійкості в границях пружності, МН:

$$[F]_E = [F]_{E1} = 3,53.$$

$$[F]_E = \frac{31 \cdot 10^{-5} \cdot E}{n_y} \cdot D_o^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (S_o - C_o)}{D_o} \right]^{2,5} =$$

$$= \frac{31 \cdot 1,913}{2,4} \cdot 0,8^2 \cdot \left[ \frac{100 \cdot (0,01 - 0,002)}{0,8} \right]^{2,5} = 15,8.$$

Допустиме осьове стискаюче зусилля, МН:

$$[F] = \frac{[F]_\sigma}{\sqrt{1 + \left( \frac{[F]_\sigma}{[F]_E} \right)^2}} = \frac{3,53}{\sqrt{1 + \left( \frac{3,53}{15,8} \right)^2}} = 3,44$$

Допустимий згинаючий момент з умови міцності, МН·м:

$$[M]_\sigma = 0,25 \cdot D_o \cdot [F]_\sigma = 0,25 \cdot 0,8 \cdot 3,53 = 0,71.$$

Допустимий згинаючий момент з умови стійкості в границях пружності, Н·м:

$$[M]_E = \frac{D_o \cdot [F]_E}{3,5} = \frac{0,8 \cdot 15,8}{3,5} = 3,61.$$

Допустимий згинаючий момент, МН·м:

$$[M] = \frac{[M]_\sigma}{\sqrt{1 + \left( \frac{[M]_\sigma}{[M]_E} \right)^2}} = \frac{0,71}{\sqrt{1 + \left( \frac{0,71}{3,61} \right)^2}} = 0,69.$$

Перевірка міцності і стійкості опорної обичайки в зоні отворів:

$$\frac{F}{[F] \cdot \varphi_1} + \frac{M + \varphi_3 \cdot F \cdot D_o}{\varphi_2 \cdot [M]} \leq 1;$$

$$\frac{0,2}{3,44 \cdot 0,935} + \frac{0,082405 + 0,18 \cdot 0,2 \cdot 0,8}{0,84 \cdot 0,69} = 0,25 \leq 1;$$

Умова міцності виконується.

Коефіцієнт:

$$\chi_1 = \left[ \frac{1 + 1,81 \cdot \left(\frac{b_2}{b_6}\right)^3}{1 + 2,97 \cdot \left(\frac{b_2}{b_6}\right)^3} \right]^2 = \left[ \frac{1 + 1,81 \cdot \left(\frac{0,3}{0,5}\right)^3}{1 + 2,97 \cdot \left(\frac{0,3}{0,5}\right)^3} \right]^2 = 0,72$$

Допустиме напруження для матеріалу елемента опорного вузла при розрахунковій температурі 100 °С, МПа:

$$[\sigma]_A = 174.$$

Допустиме напруження бетону на стиск  $[\sigma]_B$ , МПа:

За таблицею [28]:

$$[\sigma]_B = 10.$$

Ширина нижнього опорного кільця, що встановлюється на бетонному фундаменті, м:

$$b_1 = \frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{\pi \cdot D_6 \cdot [\sigma]_B} = \frac{\frac{4 \cdot 0,082405}{0,88} + 0,2}{3,14 \cdot 0,88 \cdot 10} = 0,021,$$

Враховуючи, що  $b_1 > b_2$  приймаємо  $b_1 = 0,4$

Товщина нижнього опорного кільця, м:

$$S_1 = \chi_1 \cdot b_2 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot M}{D_6} + F}{b_1 \cdot D_6 \cdot [\sigma]_A}} = 0,72 \cdot 0,3 \cdot \sqrt{\frac{\frac{4 \cdot 0,082405}{0,88} + 0,2}{0,4 \cdot 0,88 \cdot 171}} = 0,0211,$$

Приймаємо

$$S_1 = 0,02.$$

Діаметр кола, вписаного в шестигранник гайки фундаментного болта, м:

За табл. 6 [22] :

$$d = 0,1872$$

Коефіцієнт:

$$\chi_2 = \frac{3 \cdot \frac{b_4}{b_5}}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{b_4}{b_5}\right)^2}{1 + \frac{d}{b_5}}}} = \frac{3 \cdot \frac{0,35}{0,5}}{\sqrt{1 + \frac{\left(\frac{0,35}{0,5}\right)^2}{1 + \frac{0,1872}{0,5}}}} = 1,244.$$

Розрахункова площа поперечного перерізу, м<sup>2</sup>:

За табл. 8.4 [22] :

$$A_6 = 26,76 \cdot 10^{-4}$$

Товщина верхнього опорного кільця, м:

$$S_2 = \chi_2 \cdot \sqrt{\frac{A_6 \cdot [\sigma]_B}{[\sigma]_A}} = 1,115 \cdot \sqrt{\frac{26,76 \cdot 10^{-4} \cdot 10}{174}} = 0,0138.$$

Приймаємо  $S_2 = 0,014$  м

Коефіцієнт:

Для опорного вузла у виконанні 2:

$$\chi_4 = 1$$

Товщина ребра, м:

$$S_4 = \frac{A_6 \cdot [\sigma]_B}{\chi_4 \cdot b_2 \cdot [\sigma]_A} + C = \frac{26,76 \cdot 10^{-4} \cdot 10}{1 \cdot 0,3 \cdot 174} + 0,002 = 0,025$$

$$S_4 > 0,4 \cdot S_1;$$

$$S_4 > 0,4 \cdot 0,02 = 0,008;$$

$$S_4 = 0,025$$

$$\frac{b_2}{S_4} = \frac{0,3}{0,025} = 12.$$

Перевіряти на стійкість ребра не потрібно.

Довжина верхнього опорного елемента, м:

$$b_3 = b_4 = 0,35$$

Коефіцієнт:

$$N = \frac{D_o}{2 \cdot (S_o - C_o)} \cdot \left( \frac{10 \cdot b_3}{D_o} \right)^{2,05} = \frac{0,8}{2 \cdot (0,01 - 0,002)} \cdot \left( \frac{10 \cdot 0,35}{0,8} \right)^{2,05} = 992,5$$

$$K = 0$$

$$\begin{aligned} \chi_5 &= -0,0248 \cdot \left[ \ln \left( \frac{N}{1100} \right) - \sqrt{\ln \left( \frac{N}{1100} \right)^2 + 2,628} \right] + K = \\ &= -0,0248 \cdot \left[ \ln \left( \frac{992,5}{1100} \right) - \sqrt{\ln \left( \frac{992,5}{1100} \right)^2 + 2,628} \right] + 0 = 0,043. \end{aligned}$$

Відстань від осі фундаментного болта до обичайки опори, м:

$$e = \frac{D_6 - (D_o + 2 \cdot S_o)}{2} = \frac{0,88 - (0,8 + 2 \cdot 0,01)}{2} = 0,03$$

Перевірка міцності опорної обичайки в зоні верхнього опорного кільця,

МПа:

$$\begin{aligned} \frac{6 \cdot \chi_5 \cdot A_6 \cdot [\sigma]_B \cdot e}{(S_o - C_o)^2 \cdot h} &\leq 1,5 \cdot [\sigma]; \\ \frac{6 \cdot 0,043 \cdot 26,76 \cdot 10^{-4} \cdot 100 \cdot 0,03}{(0,01 - 0,002)^2 \cdot 0,5} &\leq 1,5 \cdot 150; \\ 80 &\leq 225; \end{aligned}$$

Умова міцності опорної обичайки в зоні верхнього опорного кільця виконується

Висновок: в результаті розрахунку опорної обичайки при заданих умовах було виявлено, що враховували сукупність навантажень на опорну обичайку, включаючи вагу обладнання, тиск робочого середовища та інші зовнішні впливи, було встановлено, що вибраний матеріал обичайки повністю відповідає вимогам міцності та стійкості. Це означає, що обичайка здатна витримувати всі розрахункові навантаження без ризику руйнування, деформації чи втрати стійкості, забезпечуючи надійну та безпечну експлуатацію обладнання.

## 4.9 Розрахунок фланцевого з'єднання

Мета розрахунку: Перевірка фланцевого з'єднання його міцності та герметичності при заданих умовах експлуатації (тиск, температура) та вибраних матеріалах.

Розрахункова схема фланцевого з'єднання представлена на рисунку 4.15.

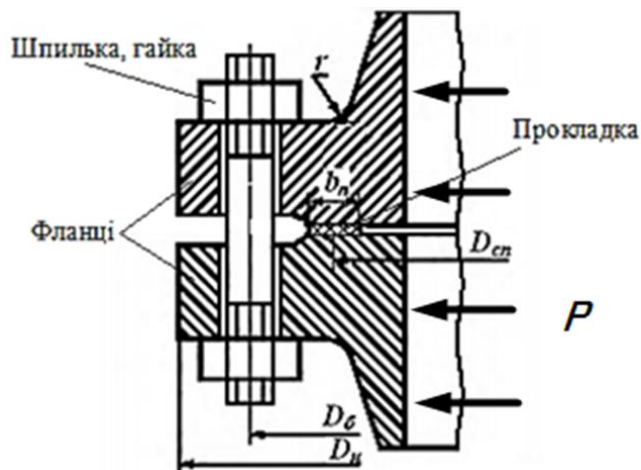


Рисунок 4.15 - Розрахункова схема фланцевого з'єднання

Вихідні дані

Розрахунковий тиск $p$ , МПа	0,6;
Виконавча товщина стінки посудини $S$ , м	0,01;
Сума додатків до розрахункової товщини стінки $C$ , м	0,003;
Розрахункова температура $t$ , °С	100;
Зовнішній діаметр фланця $D$ , м	0,92;
Середній діаметр прокладки $D_{cp}$ , м	0,828;
Внутрішній діаметр $D$ , м	0,8;
Діаметр болта , шпильки $d$ , м	0,02;
Кількість болтів, шпильок $n$ , шт	30;
Товщина фланця $h$ , м	0,055;
Товщина прокладки $h_n$ , м	0,002;

Ширина прокладки $b_n$ , м	0,012;
Ефективна довжина болта , шпильки $L_b$ , м	0,136;
Товщина втулки фланця $S_0$ , м	0,012;
Діаметр кола розташування болтів, шпильок $D_b$ , м	0,88.

Розрахунок виконано відповідно до методики, наведеної у [22].

Розрахункові температури фланця  $t_\phi$ , кільця  $t_{k_i}$  болтів  $^\circ\text{C}$ . Для плоского неізолюваного фланця визначаються температури:

$$t_\phi = 0,96t = 0,96 \cdot 171 = 164,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_6 = 0,95t = 0,95 \cdot 171 = 162,4 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Ефективна ширина прокладки, м:

$$b_0 = b_n = 0,012$$

Питомий тиск обтиснення прокладки, МПа:

Для гумової плоскої прокладки за ГОСТ 7338 з з твердістю до 65 одиниць  $q = 2$  МПа

Зусилля, яке не обхідне для деформування прокладки при затягу ванні фланця, МН

$$P_{обт} = 0,5\pi D_{сп} b_0 q_{обт} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,828 \cdot 0,012 \cdot 2 = 0,0313$$

Коефіцієнт прокладки:

Для гумової плоскої прокладки за ГОСТ 7338 з з твердістю до 65 одиниць:

$$m = 0,5$$

Зусилля на прокладку в робочих умовах, яке необхідне для забезпечення герметичності фланцевого з'єднання, МН:

$$R_n = \pi D_{сп} b_0 m |p| = 3,14 \cdot 0,828 \cdot 0,012 \cdot 0,5 \cdot 0,6 = 0,0094$$

Площа поперечного перерізу болта (шпильки),  $\text{м}^2$ :

Для болтів без проточки з діаметром  $d = 0,002$  м площа поперечного перерізу болта (шпильки):

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 104
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

$$f_6 = 2,25 \cdot 10^{-4}$$

Сумарна площа переізу болтів (шпильок) по внутрішньому діа метру різьблення або напруженому перерізу найменшого діаметра, м<sup>2</sup>:

$$A_6 = n f_6 = 40 \cdot 2,25 \cdot 10^{-4} = 0,009$$

Рівнодіюче навантаження від тиску ,МН:

$$Q_d = \frac{\pi D_{сп}^2}{4} p = \frac{\pi \cdot 0,828^2}{4} 0,6 = 0,323$$

Коефіцієнт обтиснення прокладки :

Для гумової плоскої прокладки за ГОСТ 7338 з твердістю по Шору А до 65 одиниць:

$$K = 0,04$$

Умовний модуль стиснення прокладки, МПа:

Для гумової плоскої прокладки за ГОСТ 7338 з твердістю по Шору А до 65 одиниць

$$E_n = 3 \left( 1 + \frac{b_{п}}{2h_{п}} \right) = 3 \left( 1 + \frac{0,012}{2 \cdot 0,002} \right) = 12$$

Податливість прокладки , м/МН:

$$y_{п} = \frac{h_{п} K_{обж}}{\pi E_{п} D_{сп} b_{п}} = \frac{0,002 \cdot 0,04}{3,14 \cdot 12 \cdot 0,828 \cdot 0,012} = 2,634 \cdot 10^{-4}$$

Відстань між опорними поверхнями гайки і головки болта або опорними поверхнями гайок, м

Для плоских фланців:

$$L_{60} = 2h + h_{п} = 2 \cdot 0,055 + 0,002 = 0,112$$

Ефективна довжина болта (шпильки), м:

$$L_6 = L_{60} + 0,28d = 0,112 + 0,28 \cdot 0,02 = 0,118$$

Модуль поздовжньої пружності в умовах розтягу матеріалу болта (шпильки) при 20° С, МПа:

Для болтів зі сталі марки 12Х18Н10Т, при  $t_6 = 20^{\circ}\text{C}$ :

$$E_6^{20} = 2,05 \cdot 10^5$$

Модуль поздовжньої пружності в умовах розтягу матеріалу болта (шпильки) за розрахункової температури, 100 °С, МПа:

Для болтів зі сталі марки 12Х18Н10Т, при  $t_6 = 100^\circ\text{C}$  :

$$E_6 = 2,02 \cdot 10^5$$

Податливість болтів (шпильок) , м/Н:

$$y_6 = \frac{L_6}{E_6^{20} f_6 n} = \frac{0,118}{2 \cdot 10^5 \cdot 2,25 \cdot 10^{-4} \cdot 40} = 6,55 \cdot 10^{-5}$$

Розрахунковий коефіцієнт :

$$\beta_V = 0,55$$

Модуль поздовжньої пружності в умовах розтягу матеріалу фланця при температурі 20 °С:

Для фланців зі сталі марки 12Х18Н10Т при  $t_\phi = 20^\circ\text{C}$  :

$$E_{20} = 2,05 \cdot 10^5$$

Модуль поздовжньої пружності в умовах розтягу матеріалу фланця за розрахункової температури Е, МПа

Для фланців зі сталі марки 12Х18Н10Т при  $t_\phi = 100^\circ\text{C}$  :

$$E = 2,02 \cdot 10^5$$

Параметр довжини втулки, м:

$$l_0 = \sqrt{DS_0} = \sqrt{0,8 \cdot 0,012} = 0,098$$

Співвідношення розмірів тарілки фланця :

$$K = \frac{D_{\text{зовн}}}{D} = \frac{0,92}{0,8} = 1,15$$

Коефіцієнт:

$$\beta_T = \frac{K^2(1 + 8,55 \lg K) - 1}{(1,05 + 1,945K^2)(K - 1)} = \frac{1,15^2(1 + 8,55 \cdot \lg 1,15) - 1}{(1,05 + 1,945 \cdot 1,15^2)(1,15 - 1)} = 1,86$$

Коефіцієнт:

$$\beta_U = \frac{K^2(1 + 8,55 \lg K) - 1}{1,36(K^2 - 1)(K - 1)} = \frac{1,15^2(1 + 8,55 \cdot \lg 1,15) - 1}{1,36(1,15^2 - 1)(1,15 - 1)} = 15,33$$

Коефіцієнт:

$$\beta_F = 0,91$$

Коефіцієнт:

$$\lambda = \frac{\beta_F h + l_0}{\beta_T l_0} + \frac{\beta_V h^3}{\beta_U l_0 S_0^2} = \frac{0,91 \cdot 0,055 + 0,098}{1,86 \cdot 0,098} + \frac{0,55 \cdot 0,055^3}{15,33 \cdot 0,098 \cdot 0,012^2} = 1,23$$

Кутова податливість фланця при зтяжці, 1/(Н.м):

$$y_\phi = \frac{0,91\beta_V}{E_{20}\lambda S_0^2 l_0} = \frac{0,91 \cdot 0,55}{2,05 \cdot 10^5 \cdot 1,23 \cdot 0,012^2 \cdot 0,098} = 0,014$$

Плече дії сил у болтах, м:

$$b = 0,5(D_6 - D_{\text{сп}}) = 0,5(0,92 - 0,8) = 0,06$$

Еквівалентна товщина фланця, м:

$$S_\exists = S_0 = 0,012$$

Плече зусилля від дії тиску на фланець, м:

$$e = 0,5(D_{\text{сп}} - D - S_\exists) = 0,5(0,828 - 0,8 - 0,012) = 0,008$$

Жорсткість фланцевого з'єднання, Н/м:

$$\gamma = \frac{1}{y_{\text{п}} + y_6 \frac{E_6^{20}}{E_{\tilde{h}}} + \left( y_{\phi 1} \frac{E_1^{20}}{E_1} + y_{\phi 2} \frac{E_2^{20}}{E_2} \right) b^2} =$$
$$= \frac{1}{2,634 \cdot 10^{-4} + 6,55 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{2,05 \cdot 10^5}{2,02 \cdot 10^5} + \left( 0,014 \cdot \frac{2,05 \cdot 10^5}{2,02 \cdot 10^5} + 0,014 \cdot \frac{2,05 \cdot 10^5}{2,02 \cdot 10^5} \right) 0,06^2} =$$
$$= 2314$$

Коефіцієнт жорсткості фланцевого з'єднання, яке навантажене внутрішнім тиском або зовнішньою осьювою силою:

$$\alpha = 1 - \frac{y_{\text{п}} - (y_{\phi 1} \cdot e_1 + y_{\phi 2} \cdot e_2)b}{y_{\text{п}} + y_6 + (y_{\phi 1} + y_{\phi 2})b^2} =$$
$$= 1 - \frac{2,634 \cdot 10^{-4} - (0,014 \cdot 0,008 + 0,014 \cdot 0,008)0,06}{2,634 \cdot 10^{-4} + 6,55 \cdot 10^{-5} + (0,014 + 0,014)0,06^2} = 0,42$$

Температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу болта, 1/°C

:

Для болтів зі сталі марки 12X18H10T при  $t_6 = 67,5^\circ\text{C}$ :

$$\alpha_6 = 17 \cdot 10^{-6}$$

Температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу фланця,  $1/^\circ\text{C}$ :

Для фланців зі сталі марки 12X18H10T при  $t_\phi = 144^\circ\text{C}$ :

$$\alpha_\phi = 17 \cdot 10^{-6}$$

Температурний коефіцієнт лінійного розширення матеріалу шайби,  $1/^\circ\text{C}$ :

Для шайби зі сталі марки 12X18H10T при  $t_{ш} = 67,5^\circ\text{C}$ :

$$\alpha_{ш} = 16,6 \cdot 10^{-6}$$

Товщина шайби, м:

Для діаметра болта  $d = 0,02$  м:

$$h_{ш} = 0,003$$

Навантаження, яке викликане обмеженістю температурних деформацій, МН:

$$\begin{aligned} Q_t &= \gamma[(\alpha_{\phi 1} h_1 + \alpha_{ш 1} h_{ш})(t_{\phi 1} - 20) \\ &\quad + (\alpha_{\phi 2} h_2 + \alpha_{ш 2} h_{ш})(t_{\phi 2} - 20) - \alpha_6 (h_1 + h_2)(t_6 - 20)] = \\ &= 2314[(17 \cdot 10^{-6} \cdot 0,055 + 16,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,003)(144 - 20) \\ &\quad + (17 \cdot 10^{-6} \cdot 0,055 + 16,6 \cdot 10^{-6} \cdot 0,003)(144 - 20) - 17 \\ &\quad \cdot 10^{-6}(0,055 + 0,055)(67,5 - 20)] = 0,36 \end{aligned}$$

Розрахункове навантаження на болти(шпильки) при затягуванні, яке необхідне для забезпечення в робочих умовах тиску на прокладку, достатнього для герметизації фланцевого з'єднання, МН:

$$P_{б1} = \max \left\{ \begin{array}{l} \alpha(Q_d + F) + R_{п} + \frac{4\alpha_M |M|}{D_c} \\ \alpha(Q_d + F) + R_{п} + \frac{4\alpha_M |M|}{D_c} - Q_t \end{array} \right\} =$$

$$= \max \left\{ \begin{array}{l} 0,42(0,323 + 0) + 0,0094 + 0 \\ 0,42(0,323 + 0) + 0,0094 + 0 - 0,36 \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,145 \\ -0,215 \end{array} \right\} = 0,145$$

Номінальне допустиме напруження для болтів (шпильок) в робочих умовах, МПа:

Для кріпильних деталей зі сталі 35 при розрахунковій температурі  $t_6 = 100^\circ\text{C}$  номінальне допустиме напруження:

$$[\sigma]_H^6 = 105$$

Розрахункове навантаження на болти(шпильки) при затягуванні, яке необхідне для забезпечення обтиснення прокладки і мінімального початкового натягнення болтів (шпильок), МН :

$$\begin{aligned} P_{62} &= \max\{P_{обт}; 0,4 A_6[\sigma]_H^6\} = \max\{0,0313; 0,4 \cdot 0,009 \cdot 105\} = \\ &= \max\{0,0313; 0,378\} = 0,378 \end{aligned}$$

Розрахункове навантаження на болти(шпильки) при затягуванні фланцевого з'єднання , МН:

$$P_6^M = \max\{P_{61}; P_{62}\} = \max\{0,145; 0,378\} = 0,378$$

Розрахункове навантаження на болти(шпильки) фланцевих з'єднань у робочих умовах, МН:

$$\begin{aligned} P_6^p &= P_6^M + (1 - \alpha)(Q_d + F) + Q_t + \frac{4(1 - \alpha_M)|M|}{D_c} = \\ &= 0,378 + (1 - 0,42)(0,323 + 0) + 0,36 + 0 = 0,925 \end{aligned}$$

Розрахункове напруження в болтах (шпильках) фланцевих з'єднань при затягуванні, МПа:

$$\sigma_{61} = \frac{P_6^M}{A_6} = \frac{0,378}{0,009} = 42$$

Розрахункове напруження в болтах (шпильках) фланцевих з'єднань в робочих умовах , МПа:

$$\sigma_{62} = \frac{P_6^p}{A_6} = \frac{0,925}{0,009} = 102,7$$

Коефіцієнт умов роботи :

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 109
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

$K_{y,p} = 1,0$  для робочих умов;

$K_{y,p} = 1,35$  для умов випробувань.

Коефіцієнт умов затягування :

$K_{y,z} = 1,0$  для звичайного затягування, яке не контролюється

Коефіцієнт, який враховує навантаження від температурних деформацій:

$$K_{y,t} = 1,0$$

Допустиме напруження для болтів (шпильок) при затягуванні, МПа:

$$[\sigma]_M^6 = \xi \cdot K_{y,p} \cdot K_{y,z} \cdot K_{y,t} [\sigma]_H^6 = 1,2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 105 = 122,4$$

де  $\xi = 1,2$  коефіцієнт збільшення допустимих напружень при затягуванні.

Умова міцності болтів (шпильок) фланцевих з'єднань при затягуванні, МПа:

$$\begin{aligned} \sigma_{61} &\leq [\sigma]_M^6 \\ 42 &\leq 122,4 \end{aligned}$$

Допустиме напруження для болтів (шпильок) в робочих умовах і при випробуваннях, МПа:

$$[\sigma]_p^6 = K_{y,p} \cdot K_{y,z} \cdot K_{y,t} [\sigma]_H^6 = 1,35 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 105 = 142$$

Умова міцності болтів (шпильок) фланцевих з'єднань в робочих умовах, МПа:

$$\begin{aligned} \sigma_{62} &\leq [\sigma]_p^6 \\ 102,7 &\leq 142 \end{aligned}$$

Розрахунковий питомий тиск, МПа

$$q = \frac{\max\{P_6^M; P_6^P\}}{\pi D_{сп} b_{п}} = \frac{\max\{0,378; 0,925\}}{\pi \cdot 0,828 \cdot 0,012} = \frac{0,925}{\pi \cdot 0,828 \cdot 0,012} = 29,74$$

Допустимий питомий тиск, МПа

Для гумової плоскої прокладки фторопласту 4 при товщині 1...3 мм:

$$[q] = 40 \text{ МПа}$$

Умова міцності для м'яких прокладок, МПа:

$$q \leq [q]$$
$$29,74 \leq 40$$

Коефіцієнт, який враховує вигин тарілки фланця між болтами:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi D_6}{n_6}}{2d + \frac{6h}{m + 0,5}}} \right\} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot 0,88}{40}}{2 \cdot 0,02 + \frac{6 \cdot 0,055}{0,5 + 0,5}}} \right\} =$$
$$= \max\{1; 0,432\} = 1$$

Розрахунковий згинаючий момент, який діє на фланець при затягуванні при застосуванні приварного в стик фланця, плоского фланця і бурта вільного фланця, МН\*м:

$$M^M = C_F P_6^M b = 1 \cdot 0,378 \cdot 0,012 = 0,0045$$

Розрахунковий згинаючий момент, який діє на фланець в робочих умовах при застосуванні приварного в стик фланця, плоского фланця і бурта вільного фланця, МН\*м:

$$M^P = C_F \max \left\{ \begin{array}{l} [P_6^P b + (Q_D + Q_{FM})e] \\ [Q_D + Q_{FM}]e \end{array} \right\} =$$
$$= \max \left\{ \begin{array}{l} [0,925 \cdot 0,012 + (0,323 + 0)0,008] \\ (0,323 + 0)0,008 \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,014 \\ 0,002 \end{array} \right\} = 0,014$$

Зведений діаметр плоского фланця, м:

$$D^* = D = 0,8$$

Меридіональне згинаюче напруження у втулці приварного в стик фланця з прямою втулкою, в обичайці плоского фланця або в обичайці бурта вільного фланця при затягуванні, МПа:

$$\sigma_0^M = \sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda(S_0 - C)^2 D^*} = \frac{0,0045}{1,23(0,012 - 0,001)^2 \cdot 0,8} = 37,8 \text{ МПа}$$

Радіальне напруження в тарілці приварного в стик фланця, плоского фланця і бурта вільного фланця в умовах затягуванн, МПа:

$$\sigma_R^M = \frac{(1,51\beta_F h + l_0)M^M}{\lambda h^2 l_0 D} = \frac{(1,51 \cdot 0,91 \cdot 0,055 + 0,098)0,0045}{1,23 \cdot 0,055^2 \cdot 0,098 \cdot 0,8} = 2,67$$

Розрахунковий коефіцієнт:

$$\beta_Y = \frac{1}{K-1} \left( 0,69 + 5,72 \frac{K^2 \lg K}{K^2 - 1} \right) = \frac{1}{1,15 - 1} \left( 0,69 + 5,72 \frac{1,15^2 \lg 1,15}{1,15^2 - 1} \right) = 14,1$$

Розрахунковий коефіцієнт:

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = \frac{1,15^2 + 1}{1,15^2 - 1} = 7,2$$

Окружне напруження в тарілці приварного в стик фланця, плоского фланця і бурта вільного фланця в умовах затягування, МПа:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y M^M}{h^2 D} - \beta_Z \sigma_R^M = \frac{14,1 \cdot 0,0045}{0,055^2 \cdot 0,8} - 7,2 \cdot 2,67 = 7$$

Меридіональне згинаюче напруження для приварного в стик фланця з прямою втулкою, в обичайці плоского фланця або в обичайці бурта вільного фланця в робочих умовах, МПа:

$$\sigma_0^P = \sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda(S_0 - C)^2 D^*} = \frac{0,014}{1,23(0,012 - 0,001)^2 \cdot 0,8} = 117,6$$

Меридіональне мембранне напруження у конічній втулці приварного в стик фланця в перерізі, приварного в стик фланця з прямою втулкою, в обичайці плоского фланця або в обичайці бурта вільного фланця в робочих умовах, МПа:

$$\sigma_{0MM}^P = \frac{0,785D^2 p + F \pm \frac{4[M]}{D + S_0}}{\pi(D + S_0)(S_0 - C)} = \frac{0,785 \cdot 0,8^2 \cdot 0,6}{\pi(0,8 + 0,012)(0,012 - 0,001)} = 10,74$$

Окружне мембранне напруження від дії тиску у втулці приварного в стик фланця, в обичайці плоского фланця або в обичайці бурта вільного фланця в перерізі в робочих умовах, МПа:

$$\sigma_{0Mo}^P = \frac{pD}{2(S_0 - C)} = \frac{0,6 \cdot 0,8}{2(0,012 - 0,001)} = 21,8$$

Радіальне напруження у тарілці приварного в стик фланця, плоского фланця і в бурті вільного фланця в робочих умовах, МПа:

$$\sigma_R^P = \frac{(1,33\beta_F h + l_0) M^P}{\lambda h^2 l_0 D} = \frac{(1,33 \cdot 0,91 \cdot 0,055 + 0,098) 0,014}{1,23 \cdot 0,055^2 \cdot 0,098 \cdot 0,8} = 7,9$$

Окружне напруження у тарілці приварного в стик фланця, плоского фланця і в бурті вільного фланця в робочих умовах, МПа:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y M^P}{h^2 D} - \beta_Z \sigma_R^P = \frac{14,1 \cdot 0,014}{0,055^2 \cdot 0,8} - 7,2 \cdot 7,9 = 24,7$$

Коефіцієнт:

$$K_T = 1,3$$

Коефіцієнт:

$$K_S = 1, \text{ тому що } K = 0,9$$

Допустиме напруження за розрахункової температури, МПа:

Для фланців зі сталі 12Х18Н10Т при  $t_\phi = 144^\circ\text{C}$ , товщині фланця  $h > 32$  мм:

$$[\sigma] = 167 \text{ МПа}$$

Допустиме значення загальних мембранних і згинаючих напружень, МПа:

$$[\sigma]_M = 1,5[\sigma] = 1,5 \cdot 167 = 250$$

Допустиме значення сумарних умовних пружних напружень, МПа:

$$[\sigma]_R = 3[\sigma] = 3 \cdot 167 = 501$$

Умова статичної міцності приварних в стик фланців з прямою втулкою, плоских фланців і буртів вільних фланців в перерізі  $S_0$  при затягуванні, МПа:

$$\max\{|\sigma_0^M + \sigma_R^M|; |\sigma_0^M + \sigma_T^M|\} \leq K_S K_T [\sigma]_0$$

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 113
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

$$\text{де } \sigma]_0 = [\sigma]_M$$

$$\max\{|37,8 + 2,67|; |37,8 + 7|\} \leq 1 \cdot 1,3 \cdot 250$$

$$\max\{|40,47|; |44,8|\} \leq 325$$

$$44,8 \leq 325$$

Умова статичної міцності приварних в стик фланців з прямою втулкою, плоских фланців і буртів вільних фланців в перерізі  $S_0$  в робочих умовах, МПа:

$$\max \left\{ \begin{array}{l} |\sigma_0^P - \sigma_{0MM}^P + \sigma_R^P| \\ |\sigma_0^P - \sigma_{0MM}^P + \sigma_T^P| \\ |\sigma_0^P + \sigma_{0MM}^P| \end{array} \right\} \leq K_S K_T [\sigma]_0;$$

$$\max \left\{ \begin{array}{l} |117,6 - 10,74 + 7,9| \\ |117,6 - 10,74 + 24,7| \\ |117,6 + 10,74| \end{array} \right\} \leq 325;$$

$$\max \left\{ \begin{array}{l} 114,5 \\ 131,6 \\ 128,3 \end{array} \right\} \leq 302,25;$$

$$31,6 \leq 302,25/$$

Умова міцності для фланців всіх типів в перерізі, МПа:

$$\max\{|\sigma_{0MO}^P|; |\sigma_{0MM}^P|\} \leq [\sigma];$$

$$\max\{|21,8|; |10,74|\} \leq 167;$$

$$21,8 \leq 167.$$

Умова статичної міцності для тарілок приварних в стик фланців, плоских фланців і буртів вільних фланців при затягуванні, МПа:

$$\max\{|\sigma_R^M|; |\sigma_T^M|\} \leq K_T [\sigma];$$

$$\max\{|2,67|; |7|\} \leq 1,3 \cdot 167;$$

$$7 \leq 217.$$

Умова статичної міцності для тарілок приварних в стик фланців, плоских фланців і буртів вільних фланців в робочих умовах, МПа:

$$\max\{|\sigma_R^P|; |\sigma_T^P|\} \leq K_T [\sigma];$$

$$\max\{|7,9|; |24,7|\} \leq 1,3 \cdot 167;$$

$$24,7 \leq 217.$$

Коефіцієнт:

$$K_{\Theta} = 1$$

Допустимий кут повороту приварного в стик фланця, рад:

$$[\Theta] = 0,013$$

Модуль поздовжньої пружності в умовах розтягу матеріалу фланця при розрахунковій температурі, МПа:

Для фланців зі сталі 12X18H10T при розрахунковій температурі  $t_{\phi} = 144^{\circ}\text{C}$ :

$$E = 1,9 \cdot 10^5$$

Перевірка умови герметичності приварного в стик фланця, плоского фланця і бурта вільного фланця в робочих умовах, рад:

$$\theta = M^P y_{\phi} \frac{E^{20}}{E} \leq K_{\theta} [\theta] = 0,014 \cdot 0,014 \cdot \frac{2,05 \cdot 10^5}{2 \cdot 10^5} = 0,0002 \leq 0,013$$

Допустимий кут повороту кільця вільного фланця, рад:

$$[\theta]_K = 0,02$$

Висновок: Розраховані напруження у фланці, болтах та прокладці не перевищують допустимих значень, що свідчить про достатню міцність з'єднання. Отже, вибрані конструктивні параметри та матеріали забезпечують надійну та безпечну роботу фланцевого з'єднання в ректифікаційній колоні.

#### **4.10 Розрахунок геометричних розмірів деталей для кріплення поодинокого отвору**

Мета розрахунку: Визначення оптимальних геометричних розмірів деталей для кріплення поодинокого отвору, що забезпечують необхідну міцність та герметичність з'єднання при заданих умовах експлуатації.

Розрахункова схема укріплення отворів представлена на рисунку 4.16.

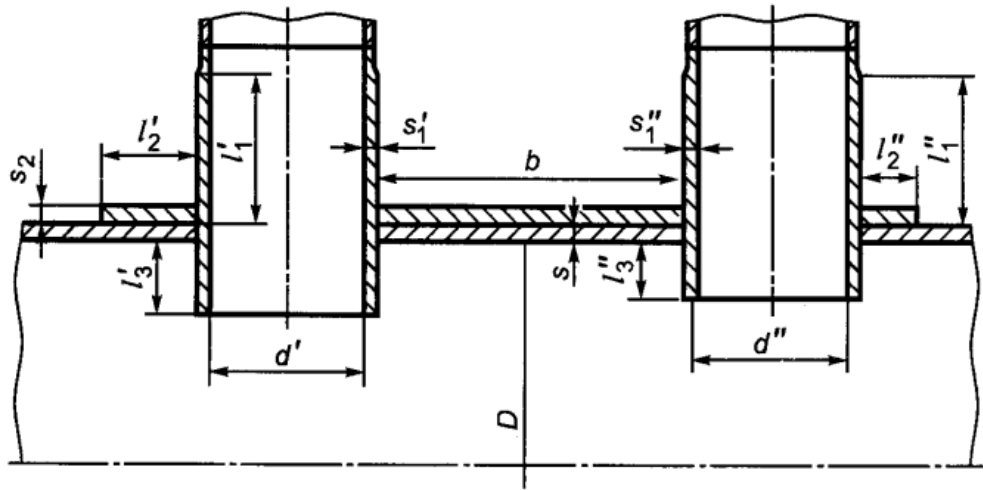


Рисунок 4.16 – Розрахункова схема укріплення отворів

Вихідні дані:

Внутрішній діаметр обичайки $D_p$ , м	0,8;
Виконавча товщина стінки обичайки $S$ , м	0,007;
Сума додатків до розрахункової товщини стінки штуцера $C_s$ , м	0,001;
Виконавча товщина стінки зовнішнього штуцера $S_l$ , м	0,007;
Розрахункова товщина стінки зовнішнього штуцера $S_{lp}$ , м	0,005;
Виконавча довжина зовнішньої частини патрубка штуцера $l_1$ , м	0,01;
Виконавча довжина внутрішньої частини патрубка штуцера $l_3$ , м	0,01;
Марка сталі	12X18H10T;
Діаметр отвору $d$ , м	0,03;
Розрахункова температура $t$ , °C	100.

Розрахунок виконаний відповідно до алгоритму, наведеного в літературному джерелі [23].

Допустиме напруження для матеріалу обичайки за розрахункової температури, МПа:

Для сталі марки 12X18H10T за розрахункової температури  $t = 100$  °C допустиме напруження:

$$[\sigma] = [\sigma]_1 = [\sigma]_2 = [\sigma]_3 = 174$$

Відношення допустимих напружень:

$$\chi_1 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \left\{ 1; \frac{174}{171} \right\} = 1;$$

$$\chi_3 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_3}{[\sigma]} \right\} = \min \left\{ 1; \frac{174}{174} \right\} = 1.$$

Розрахунковий внутрішній діаметр циліндричної обичайки, який укріплюються, м:

$$D_p = D = 0,8$$

Розрахунковий діаметр отвору в стінці циліндричної обичайки, м:

$$d_p = d + 2C_s = 0,03 + 2 \cdot 0,001 = 0,022$$

Розрахунковий діаметр отвору, що не потребує зміцнення, м:

$$d_{0p} = 0,4 \sqrt{D_p(s - c)} = 0,4 \sqrt{0,8(0,007 - 0,001)} = 0,028$$

Розрахункова довжина зовнішньої частини штуцера (зовнішнього штуцера) з круглим поперечним перерізом, яка бере участь в укріпленні отвору і враховується при розрахунку:

$$\begin{aligned} l_{1p} &= \min \left\{ l_1; 1,25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_1 - c_s)} \right\} = \\ &= \min \left\{ 0,01; 1,25 \sqrt{(0,03 + 2 \cdot 0,001)(0,007 - 0,001)} \right\} = \\ &= \min \{ 0,01; 0,014 \} = 0,01 \text{ м} \end{aligned}$$

Розрахункова довжина внутрішньої частини штуцера (внутрішнього штуцера) з круглим поперечним перерізом, яка бере участь в укріпленні отвору і враховується при розрахунку, м:

$$\begin{aligned} l_{3p} &= \min \left\{ l_3; 1,25 \sqrt{(d + 2c_s)(s_3 - c_{s1})} \right\} = \\ &= \min \left\{ 0,01; 1,25 \sqrt{(0,02 + 2 \cdot 0,001)(0,005 - 0,001 - 0,001)} \right\} = \\ &= \min \{ 0,01; 0,0101 \} = 0,01 \text{ м} \end{aligned}$$

Умова укріплення отвору, м<sup>2</sup>:

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 117
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

$$l_{1p}(S_1 - S_{1p} - C_s)\chi_l + l_{3p}(S_3 - S_{3p} - C_s)\chi_3 \geq 0,5(d_p - d_{op})S_p$$

$$0,01(0,007 - 0,005 - 0,001)1 + 0,01(0,01 - 0,005 - 0,001)1 \geq 0,5(0,03 - 0,028)0,05$$

$$0,00006\text{м}^2 \geq 0,00005\text{м}^2$$

Умова укріплення отвору виконується

Висновок: В результаті розрахунків було визначено, що оптимальні геометричні розміри деталей для кріплення поодинокого отвору, забезпечують необхідну міцність та герметичність з'єднання при заданих умовах експлуатації. Отримані результати можуть бути використані для проектування та виготовлення надійних та безпечних конструкцій.

#### 4.11 Параметричний розрахунок теплообмінника

Мета розрахунку: визначити необхідну поверхню теплообміну кожухотрубного апарату, відповідно до вихідних даних

Розрахункова схема зображена на рисунку 4.17

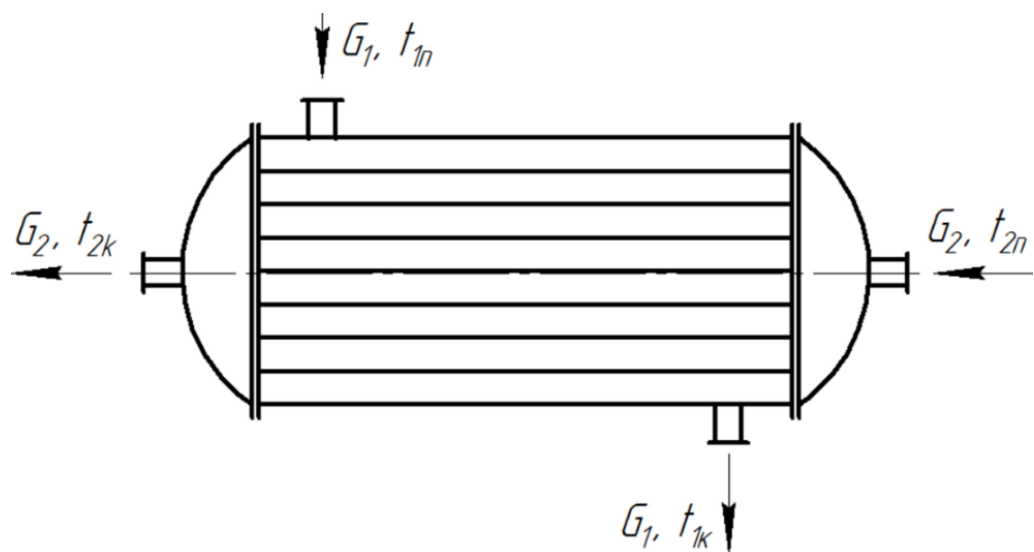


Рисунок 4.17 – Схема теплообмінника

Вихідні дані:

Витрата газоподібного азоту $G_1$ , кг/с	3,2;
Початкова температура газоподібного азоту $t_{1Н}$ , К	86,9;
Кінцева температура газоподібного азоту $t_{1К}$ , К	93,5;
Початкова температура рідкого азоту $t_{2Н}$ , К	96,1;
Кінцева температура газоподібного азоту $t_{2К}$ , К	87,5;
Розрахунок виконується за методикою[24]	

Середня різниця температур, К:

$$t_{1,ср} = \frac{t_{1К} + t_{1Н}}{2} = \frac{93,5 + 86,9}{2} = 90,2$$

Теплоємність газоподібного азоту,  $\frac{Дж}{кг \cdot К}$  [24]:

$$c_1 = 1068$$

Кількість переданої теплоти, Вт:

$$Q = G_1 \cdot c_1 \cdot (t_{1К} - t_{1Н}) = 3,20 \cdot 1068 \cdot (93,5 - 86,9) = 22551,$$

де  $Q$  – теплове навантаження апарата, Вт;  $G_1, G_2$  – масові витрати газоподібного азоту та рідкого азоту, кг/с;  $c_1$  та  $c_2$  – питома теплоємність газоподібного азоту та рідкого азоту, Дж/кг · К;  $t_{1Н}$  – температура газоподібного азоту на вході в апарат, К;  $t_{1К}$  – температура газоподібного азоту на виході з апарата, К;  $t_{2Н}$  – температура рідкого азоту на вході в апарат, К;  $t_{2К}$  – температура рідкого азоту на виході з апарата, К.

Середня різниця температур, К:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 - \Delta t_M}{\ln\left(\frac{\Delta t_6}{\Delta t_M}\right)} = \frac{2,6 - 0,6}{\ln\left(\frac{2,6}{0,6}\right)} = 1,37$$

Температурна схема руху потоків представлена на рисунку 4.18.

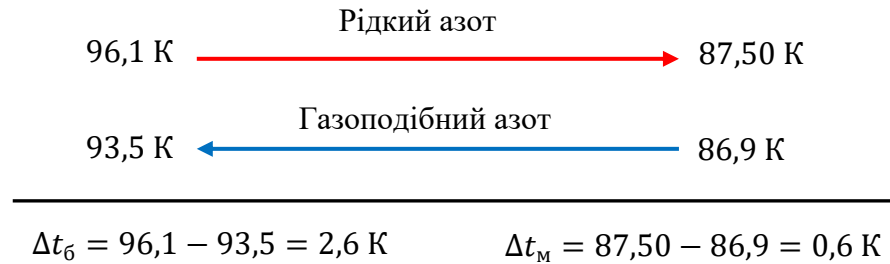


Рисунок 4.18 Температурна схема руху потоків

Для знаходження теплофізичних властивостей гарячого та холодного потоку необхідно знати їхні середні температури.

Середня температура рідкого азоту, К:

$$t_{2,cp} = \Delta t_{cp} + t_{1,cp} = 1,37 + 90,2 = 91,6$$

Витрата гарячого потоку (рідкого азоту), кг/с:

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 \cdot (t_{2K} - t_{2H})} = \frac{22551}{2149 \cdot (96,1 - 87,50)} = 1,22 \text{ кг/с}$$

Приймаємо орієнтовне значення Рейнольдса  $Re_{op} = 10000$ , що відповідає розвиненому турбулентному режиму течії в трубах, і визначаємо число труб на один хід:

Число труб на один хід при подачі рідкого азоту в труби, од:

а) для труб діаметром  $d_H = 25 \times 2$ :

$$\frac{n}{z} = \frac{4 \cdot G_2}{\pi d_{BH} \cdot Re_{op} \cdot \mu_2} = \frac{4 \cdot 1,22}{3,14 \cdot 0,021 \cdot 10000 \cdot 0,00062} = 43$$

б) для труб діаметром  $d_H = 20 \times 2$ :

$$\frac{n}{z} = \frac{4 \cdot G_2}{\pi d_{\text{вн}} \cdot Re_{\text{ор}} \cdot \mu_2} = \frac{4 \cdot 1,22}{3,14 \cdot 0,016 \cdot 10000 \cdot 0,00062} = 57$$

Теплофізичні властивості газоподібного азоту та рідкого азоту при середній температурі представлені в таблиці 4.6 [24, 25].

Орієнтовний коефіцієнт теплопередачі (рідина-рідина), Вт/(м<sup>2</sup> · К):

$$K_{\text{ор}} = 60$$

Орієнтовне значення необхідної площі поверхні теплопередачі, м<sup>2</sup>:

$$F_{\text{ор}} = \frac{Q}{K_{\text{ор}} \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{22551}{60 \cdot 1,37} = 275$$

Таблиця 4.6 – Теплофізичні властивості теплоносіїв при середній температурі.

Найменування теплоносія	Фізичні величини	Позначення	Числові значення
Холодний теплоносій (газоподібний азот)	Температура на вході, К	$t_{1\text{н}}$	86,9
	Температура на виході, К	$t_{1\text{к}}$	93,5
	Середня температура, К	$t_{1\text{ср}}$	90,2
	Масова витрата, кг/с	$G_1$	3,20
	Густина, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_1$	3,8
	Теплоємність, Дж/кг·К	$c_1$	1068
	Динамічна в'язкість, Па·с	$\mu_1$	0,000006
	Теплопровідність, λ,Вт/м·К	$\lambda_1$	0,009
Гарячий теплоносій (рідкий азот)	Температура на вході, К	$t_{2\text{н}}$	10
	Температура на виході, К	$t_{2\text{к}}$	87,50
	Середня температура, К	$t_{2\text{ср}}$	91,6
	Масова витрата, кг/с	$G_2$	1,22
	Густина, кг/м <sup>3</sup>	$\rho_2$	736,67
	Теплоємність, Дж/кг·К	$c_2$	2149
	Динамічна в'язкість, Па·с	$\mu_2$	0,000091
	Теплопровідність, λ,Вт/м·К	$\lambda_2$	0,112

Орієнтуючись на орієнтовне значення необхідної площі та числа труб на один хід, обираємо найоптимальний теплообмінник з наступними характеристиками, представленими в таблиці 4.7[24].

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 121
----------------------	------------	--------------	------	-----------

Таблиця 4.7 – Характеристика параметрів вибраного теплообмінника

Параметри апарата	Од. вимір.	Величина
Діаметр кожуха апарата, $D$	мм	800
Загальна кількість труб, $n$	шт.	404
Площа перерізу одного ходу по трубах, $S_{тр}$	м <sup>2</sup>	0,030
Площа прохідного перерізу між перегородками, $S_{мтр}$	м <sup>2</sup>	0,07
Діаметр труб і товщина стінки	мм	25×2
Число ходів, $z$	шт.	4

### Перевірочний розрахунок теплообмінника

Виконаємо перевірочний розрахунок теплообмінника при подачі рідкого азоту в труби.

Швидкість рідкого азоту в трубах вибраного апарата, м/с:

$$\omega_2 = \frac{G_2}{S_{тр} \cdot \rho_2} = \frac{1,22}{0,030 \cdot 736,67} = 0,055$$

де  $S_{тр}$  – площа перерізу одного ходу по трубах, м<sup>2</sup>, [див. табл. 4.7].

Критерій Рейнольдса:

$$Re_2 = \frac{\omega_2 \cdot d_{вн} \cdot \rho_2}{\mu_2} = \frac{0,055 \cdot 0,021 \cdot 736,67}{0,000091} = 9368$$

Режим руху перехідний.

Критерій Прандтля для азоту рідкого при середній температурі:

$$Pr_2 = \frac{c_2 \cdot \mu_2}{\lambda_2} = \frac{2149 \cdot 0,000091}{0,112} = 1,76$$

Критерій Нуссельта при перехідному режимі[26]:

$$Nu_2 = 0,008 \cdot Re_2^{0,9} \cdot Pr_2^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_2}{Pr_{ст.2}} \right)^{0,25} = 0,008 \cdot 9368^{0,9} \cdot 1,76^{0,43} \cdot 1$$

$$= 43,3$$

де  $Pr_2$  – критерій Прандтля для азоту рідкого при середній температурі.

Коефіцієнт тепловіддачі з боку рідкого азоту,  $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ :

$$a_2 = \frac{Nu_2 \cdot \lambda_2}{d_{вн}} = \frac{43,3 \cdot 0,112}{0,021} = 203,3$$

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 122
----------------------	------------	--------------	------	-----------

Швидкість руху газоподібного азоту в міжтрубному просторі, м/с:

$$\omega_1 = \frac{G_1}{S_{\text{мтр}} \cdot \rho_1} = \frac{3,20}{0,070 \cdot 3,8} = 12,10$$

де  $S_{\text{мтр}}$  – площа перерізу між перегородками, м<sup>2</sup>, [див. табл. 4.2].

Критерій Рейнольдса:

$$Re_1 = \frac{\omega_1 \cdot d_{\text{н}} \cdot \rho_1}{\mu_1} = \frac{12,10 \cdot 0,025 \cdot 3,8}{0,000006} = 151845$$

Критерій Прандтля для газоподібного азоту при середній температурі

$$Pr_1 = \frac{c_1 \cdot \mu_1}{\lambda_1} = \frac{2149 \cdot 0,000006}{0,009} = 0,77,$$

де  $\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності для газоподібного азоту.

Критерій Нуссельта при поперечному обтіканні пучка труб [17,с.50]:

$$Nu_1 = 0,24 \cdot Re_1^{0,6} \cdot Pr_1^{0,36} \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_{\text{ст.1}}}\right)^{0,25} = 0,24 \cdot 151845^{0,6} \cdot 0,77^{0,36} = 281,3,$$

де  $Pr_1$  – критерій Прандтля для газоподібного азоту при середній температурі;

$(Pr_2/Pr_{\text{ст.2}})^{0,25} = 1$  – відношення критеріїв Прандтля в першому наближенні.

Коефіцієнт тепловіддачі від газоподібного азоту до труб, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$a_1 = \frac{Nu_1 \cdot \lambda_1}{d_{\text{н}}} = \frac{281,3 \cdot 0,009}{0,025} = 98,0 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Термічний опір забруднень з боку рідкого азоту та газоподібного азоту, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$r_{\text{забр.1}} = r_{\text{забр.2}} = 5800$$

Сума термічних опорів стінки трубки та забруднень з обох сторін, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

$$\sum \frac{\delta}{\lambda} = \frac{1}{r_{\text{забр.1}}} + \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{r_{\text{забр.2}}} = \frac{1}{5800} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{5800} = 3,88 \cdot 10^{-4}$$

де  $\delta_{\text{ст}}$  – товщина стінки труб, м;  $\lambda_{\text{ст}}$  – коефіцієнт теплопровідності вуглецевої сталі, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К):

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 123
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

$$K = \frac{1}{\left(\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}\right)} = \frac{1}{\left(\frac{1}{98,0} + 3,88 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{203,3}\right)} = 64,5$$

Температура стінок труб з боку обох теплоносіїв, К:

$$t_{ст1} = t_{ср1} + \frac{K \cdot \Delta t_{ср}}{\alpha_1} = 90,2 + \frac{64,5 \cdot 1,37}{98,0} = 91,13;$$

$$t_{ст2} = t_{ср2} + \frac{K \cdot \Delta t_{ср}}{\alpha_2} = 91,6 - \frac{64,5 \cdot 1,37}{203,3} = 91,10.$$

Критерій Прандтля при температурі стінки:

а) для газоподібного азоту:

$$Pr_{ст1} = \frac{c_1 \cdot \mu_1}{\lambda_1} = \frac{1059 \cdot 0,00001}{0,0094} = 1,74$$

де  $c_1$  – теплоємність газоподібного азоту при температурі стінки, Дж/кг·К;  
 $\mu_1$  – в'язкість газоподібного азоту при стінці, Па·с;  $\lambda_1$  – теплопровідність газоподібного азоту при стінці, Вт/м<sup>2</sup>·К.

б) для рідкого азоту:

$$Pr_{ст2} = \frac{c_2 \cdot \mu_2}{\lambda_2} = \frac{2161 \cdot 0,00009}{0,1104} = 0,77$$

де  $c_2$  – теплоємність рідкого азоту при температурі стінки, Дж/кг·К;  
 $\mu_2$  – в'язкість рідкого азоту при температурі стінки, Па·с;  $\lambda_2$  – теплопровідність рідкого азоту при температурі стінки, Вт/м<sup>2</sup>·К.

Уточнений коефіцієнт тепловіддачі від газоподібного азоту до труб, Вт/м<sup>2</sup>·К:

$$a_1' = a_1 \cdot \left(\frac{Pr_1}{Pr_{ст1}}\right)^{0,25} = 98,0 \cdot \left(\frac{0,77}{1,74}\right)^{0,25} = 203,9$$

Уточнений коефіцієнт тепловіддачі з боку рідкого азоту, Вт/м<sup>2</sup>·К:

$$a_2' = a_2 \cdot \left(\frac{Pr_2}{Pr_{ст2}}\right)^{0,25} = 203,3 \cdot \left(\frac{1,76}{0,77}\right)^{0,25} = 98,2$$

Уточнений коефіцієнт теплопередачі, Вт/м<sup>2</sup>·К:

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 124
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

$$K' = \frac{1}{\left(\frac{1}{203,9} + 3,87 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{98,2}\right)} = 64,6$$

Уточнена температура стінки з боку газоподібного азоту, К:

$$t_{ст1}' = t_{ср1} - \frac{K' \cdot \Delta t_{ср}}{a_1'} = 91,6 + \frac{64,6 \cdot 1,37}{203,9} = 91,1$$

Уточнена температура стінки з боку рідкого азоту, К:

$$t_{ст2}' = t_{ср2} + \frac{K' \cdot \Delta t_{ср}}{a_2'} = 90,2 - \frac{64,6 \cdot 1,37}{98,2} = 91,1$$

Розбіжність уточнених значень з попередніми:

$$\delta_1 = \frac{t_{ст1}' - t_{ст1}}{t_{ст1}'} = \frac{91,1 - 91,13}{91,1} \cdot 100 = 0,0003 \%;$$

$$\delta_2 = \frac{t_{ст2}' - t_{ст2}}{t_{ст2}'} = \frac{91,1 - 91,10}{91,1} \cdot 100 = 0,0002 \%.$$

Оскільки відхилення температур стінок не перевищує 5%, подальших уточнень коефіцієнта теплопередачі не потрібно

Необхідна поверхня теплообміну, м<sup>2</sup>:

$$F_P = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{ср}} = \frac{22551}{64,6 \cdot 1,37} = 255,12$$

З [24] випливає, що з обраного ряду підходить теплообмінник з довжиною труб 9 м і номінальною поверхнею  $F = 285,0$  м<sup>2</sup>.

Запас площі поверхні:

$$\Delta = \frac{F - F_P}{F_P} = \frac{285,0 - 255,12}{255,12} \cdot 100 = 11,71 \%$$

Висновок:

В результаті виконаних розрахунків було підібрано стандартизований кожухотрубний теплообмінник для охолодження газоподібного азоту.

Було визначено теплове навантаження апарата, а також розраховано масову витрату гарячого потоку (рідкого азоту).

На основі отриманих даних визначено необхідну площу поверхні теплообміну та проведено вибір стандартизованого кожухотрубного апарата з номінальною поверхнею. Виконано перевірочний розрахунок, який включав визначення коефіцієнтів тепловіддачі та уточнення коефіцієнта теплопередачі.

Перевірка температур стінок показала, що розбіжність з попередніми значеннями є мінімальною, що підтверджує коректність вибору.

Зрештою, розрахований запас площі поверхні підтверджує достатність обраного апарата для забезпечення необхідної теплопередачі.

Підсумкові конструктивні та технологічні параметри обраного апарата зведені в таблицю 4.8.

Таблиця 4.8 Характеристика параметрів кожухотрубного теплообмінника

Параметри апарата	Од. вимір.	Величина
Поверхня теплопередачі, F	м <sup>2</sup>	285
Внутрішній діаметр кожуха, D	мм	800
Загальна кількість труб, n	од.	404
Довжина труб, L	мм	9000
Діаметр труби і товщина стінки, $d \times \delta$	мм	25 × 2
Кількість ходів, z	од.	4
Запас поверхні теплопередачі, Δ	%	12

## 5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях

Розробка рекомендацій стосовно гарантування безпеки персоналу та створення належних умов праці базується на відповідних методичних вказівках [27].

Ключовим завданням цього розділу є обґрунтування комплексу вимог і проєктування технічних заходів, спрямованих на безпечну експлуатацію модернізованої азотно-кисневої установки, що включає ректифікаційну колону й теплообмінник.

Наведені рішення та вказівки базуються на положеннях чинного законодавства України, а також нормативно-правових актах у сфері охорони праці та промислової безпеки [28].

Робота об'єкта пов'язана з використанням криогенних речовин: рідкого азоту ( $t_{\text{кип}} = -196^{\circ}\text{C}$ ) та рідким киснем ( $t_{\text{кип}} = -183^{\circ}\text{C}$ ).

Робоча зона оператора, відповідального за моніторинг технологічного процесу, знаходиться у приміщенні з площею  $S$  та об'ємом  $V$ , параметри якого відповідають чинним санітарним нормам [29].

Експлуатація установки супроводжується впливом специфічних небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які потребують детального аналізу [30].

У процесі функціонування установки виникають специфічні небезпечні та шкідливі виробничі фактори, що потребують особливої уваги.

До основних шкідливих та небезпечних факторів, що можуть виникати на робочих місцях під час обслуговування та експлуатації обладнання, належать:

- ураження електричним струмом;
- забезпечення безпеки технологічного обладнання та процесів;
- підвищений рівень виробничого шуму та вібрації;

- недостатнє або нераціональне виробниче освітлення;
- параметри мікроклімату робочої зони;
- пожежна небезпека та вибухонебезпека;
- загальна безпека під час експлуатації установки;
- план дій та заходи реагування у разі виникнення надзвичайних ситуацій.

### 5.1 Електронебезпека

Розміщення технологічних агрегатів модернізованої установки розділення повітря передбачено у виробничому цеху. З огляду на специфіку технологічного процесу, що супроводжується криогенними температурами, ймовірністю утворення конденсату та присутністю кисню як сильного окисника, умови праці вимагають підвищених заходів безпеки.

Відповідно до класифікації ПУЕ:2017 [31], дане виробниче приміщення відноситься до категорії з підвищеною небезпекою, а в окремих зонах (де можливе утворення вибухонебезпечних сумішей або висока вологість) - до особливо небезпечних щодо ризику ураження електричним струмом.

Електроживлення основного устаткування здійснюється від трифазної мережі змінного струму напругою  $U = 380/220$  В із частотою  $f = 50$  Гц, що працює в системі з глухозаземленою нейтраллю (система заземлення TN-C або TN-C-S).

Для гарантування електробезпеки обслуговуючого персоналу та попередження аварійних ситуацій проектом передбачено впровадження ряду організаційно-технічних заходів:

- розміщення знаків безпеки та попереджувальних плакатів у зонах підвищеної небезпеки та безпосередньо на електроустановках

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 128
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

- забезпечення захисту струмопровідних частин, що перебувають під напругою, від випадкового дотику шляхом їх надійної ізоляції ( $R \geq 0,5 \text{ Ом}$ ) або огороження;
- забезпечення захисту струмопровідних частин, що перебувають під напругою, від випадкового дотику шляхом огороження або їх надійної ізоляції (опір ізоляції  $R \geq 0,5 \text{ Ом}$ );
- застосування розділових трансформаторів для електричного розділення мережі при живленні переносного ручного інструменту та систем місцевого освітлення; ізолювання струмопровідних елементів у пультах та шафах керування для виключення можливості прямого контакту;
- монтаж комутаційної апаратури (вимикачів, рубильників) у спеціалізованих захисних шафах, що мають ступінь захисту не нижче IP54 згідно з ДСТУ EN 60529:2018 [32];
- використання електрообладнання у вибухозахищеному виконанні у всіх зонах з потенційно вибухонебезпечним середовищем;
- застосування основних та додаткових засобів індивідуального захисту (діелектричні рукавички, калоші, килимки, ізолювальні підставки) під час оперативних перемикачів та обслуговування електроустановок згідно з ДНАОП 1.1.10-1.07-01 [33].

При виникненні аварійних режимів (наприклад, пробій ізоляції на корпус) спрацює система захисного занулення та автоматичного відключення живлення.

Розрахунковий струм короткого замикання становить  $I_{к.з.} = 100 \text{ А}$ , що забезпечує необхідну кратність спрацювання захисного апарату ( $1,25 - 1,4 \cdot I_{ном}$ ) та відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.582:2016 [34].

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 129
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

## 5.2 Безпека устаткування та технологічних процесів

До найбільш відповідальних та потенційно небезпечних технологічних операцій на модернізованій установці належать процеси глибокого охолодження, ректифікація бінарної суміші під надлишковим тиском, а також транспортування та циркуляція кріогенних продуктів. Функціонування динамічного обладнання (компресорів, насосів) супроводжується генерацією виробничого шуму і вібрації, а наявність рухомих частин створює ризик механічного травмування, що вимагає дотримання вимог ДСТУ EN ISO 12100:2016 [35].

Основними факторами, що можуть призвести до аварійних ситуацій при роботі з кріогенними продуктами, є [36]:

- порушення затвердженого технологічного регламенту через відмову систем автоматичного керування або помилки персоналу;
- різкі стрибки тиску та порушення теплового балансу внаслідок раптового припинення подачі електроенергії або технологічного повітря;
- порушення герметичності трубопроводів, запірної арматури або фланцевих з'єднань, що спричиняє витік кріогенних рідин або газів;
- накопичення вибухонебезпечних домішок вуглеводнів у середовищі рідкого кисню;
- виникнення іскрових розрядів статичної електрики в апаратах та комунікаціях, що працюють у збагаченому киснем середовищі.

Для забезпечення безаварійної експлуатації та стабільності технологічного процесу проєктом передбачено комплекс технічних заходів [28]:

- виникнення іскрових розрядів статичної електрики в апаратах та комунікаціях, що працюють у збагаченому киснем середовищі.
- обрана технологічна схема оптимізована для забезпечення надійності та високої чистоти продуктів розділення;

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 130
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

- передбачена система продування технологічних апаратів сухим інертним газом (азотом) для запобігання утворенню вибухонебезпечних концентрацій під час пуску або аварійної зупинки;
- установка оснащена автоматизованими системами контролю критичних параметрів (температури, тиску, рівня рідини, концентрації домішок) з функцією аварійної сигналізації та автоматичного регулювання;
- впроваджено повну автоматизацію процесів із виведенням показників на центральний пульт управління, що дозволяє дистанційно контролювати роботу обладнання;
- всі зовнішні поверхні обладнання та трубопроводів, температура яких виходить за межі безпечного діапазону, покриваються теплоізоляцією для захисту персоналу від термічних та криогенних опіків [37];
- для захисту від руйнування внаслідок перевищення робочого тиску (наприклад, при інтенсивному випаровуванні криогенної рідини) на апаратах або їх групах встановлено запобіжні клапани [36];
- для безпечного доступу до зон обслуговування на висоті (верх колони) змонтовано стаціонарні платформи з огорожею висотою не менше 1,1 м (згідно з ДСТУ EN ISO 14122-3) і зручними сходами [38];
- електрообладнання вибрано у вибухозахищеному виконанні відповідно до класу зони, реалізована функція аварійного відключення через розподілену систему управління;
- у випадку надзвичайних ситуацій, пов'язаних із ризиком витоку азоту (нестача кисню), персонал забезпечується ізолювальними дихальними апаратами (типу ПП-4М, СПП-20), а при пожежах — відповідними засобами захисту органів дихання та спеціальним одягом [36].

### 5.3 Виробничий шум і вібрація

Джерелами виробничого шуму на модернізованій установці виступають електродвигуни із сумарною потужністю  $N = 20$  кВт, а також функціонування насосного обладнання, роторних машин та вентиляційних систем.

За результатами вимірювань, фактичний рівень звукового тиску в робочій зоні не перевищує 75 дБА, що повністю відповідає гранично допустимим нормам згідно з ДСН 3.3.6.037-99 [39].

Для зниження шкідливого впливу шуму на персонал впроваджено комплекс інженерно-технічних та організаційних заходів: Для зниження шкідливого впливу шуму на персонал впроваджено комплекс інженерно-технічних та організаційних заходів::

- встановлення звукоізолювальних екранів та захисних кожухів на обладнання з найвищим рівнем шуму;
- регулярне змащування вузлів тертя та механізмів для зменшення механічної складової шуму;
- своєчасне проведення ремонту та технічного обслуговування агрегатів відповідно до вимог технологічного регламенту.

Для індивідуального захисту органів слуху персонал забезпечується протишумовими вкладками або навушниками, ефективність яких дозволяє знизити рівень звукового навантаження на 15–20 дБА.

Джерелами вібраційного навантаження є робота компресорів, електродвигунів та інших обертових елементів установки. Причинами виникнення вібрації можуть бути дисбаланс роторів, недостатня жорсткість конструкцій або похибки у кріпленні до фундаменту.

Рівень загальної вібрації у виробничому приміщенні не перевищує 90 дБ при частоті 4 Гц, що узгоджується з вимогами ДСН 3.3.6.039-99 [40].

Зазначені нормативні параметри досягаються завдяки реалізації таких технічних рішень:

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 132
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

- монтаж динамічного устаткування на масивні фундаменти, вага яких суттєво перевищує масу встановлених агрегатів;
- застосування еластичних віброізоляторів (гумових прокладок, пружинних елементів) між основою та обладнанням ;
- зміцнення конструкцій шляхом додавання ребер жорсткості для підвищення їхньої стійкості до динамічних навантажень.

Для захисту персоналу від впливу загальної вібрації (через опорні поверхні) передбачено використання спеціального захисного взуття з підошвою, що поглинає енергію коливань, згідно з вимогами ДСТУ EN ISO 20345:2016 [41].

Інструментальний контроль параметрів шуму та вібрації здійснюється за допомогою шумоміра Testo 816 та віброметра Venetech GM63B.

Загальний час контакту з вібруючим обладнанням обмежено до 2/3 тривалості робочої зміни, при цьому тривалість безперервного впливу вібрації не повинна перевищувати 15–20 хв. Регламентована обідня перерва має тривати не менше 40 хв.

#### **5.4 Виробниче освітлення**

У проєкті модернізації прийнято рішення про впровадження комбінованої системи освітлення, яка поєднує використання природного та штучного світла. Структура світлового забезпечення об'єкта включає робоче, аварійне, евакуаційне та ремонтне освітлення, що має першочергове значення для об'єктів з підвищеним рівнем небезпеки [42].

Приміщення операторної, обладнане достатньою кількістю світлових прорізів (вікон), що забезпечують необхідний коефіцієнт природного освітлення (КПО) 1,44 %, що є достатнім для даного типу приміщень.

Характер зорових робіт, які виконує персонал (контроль шкал приладів, моніторинг індикаторів), дозволяє віднести їх до IV розряду точності.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 133
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

Штучне освітлення передбачено для всіх технологічних зон, виробничих приміщень та платформ обслуговування обладнання.

Підбір освітлювальних приладів здійснювався з суворим урахуванням категорії вибухопожежонебезпеки приміщення відповідно до вимог ПУЕ та ДСТУ [43].

Для освітлення технологічних зон обрано сучасні світлодіодні світильники у вибухозахищеному виконанні ДСП11ВEx (або аналог), потужністю 50 Вт, які створюють світловий потік 5500 лм та забезпечують номінальну освітленість  $E_{\phi} = 260$  К.

Відповідно до рекомендацій ДБН В.2.5-28:2018 [42], інтер'єр виробничих приміщень (стіни, стеля) оформлено у світлих матових кольорах для рівномірного розподілу яскравості та зниження зорової втоми персоналу.

Для підвищення безпеки праці реалізовано систему кольорового маркування: основне технологічне устаткування фарбується у ясно-зелений відтінок, рухомі та потенційно небезпечні елементи світло-зелений колір, рухомі та потенційно травмонебезпечні елементи – у жовтий, а засоби пожежогасіння та аварійної зупинки – у яскраво-червоний.

Інструментальний контроль фактичного рівня освітленості проводиться за допомогою повіреного люксметра моделі testo 540. Регламент технічного обслуговування передбачає обов'язкову перевірку системи освітлення не рідше одного разу на рік, а також після завершення будь-яких ремонтних робіт мережі.

Висота підвісу світильників над рівнем підлоги розраховується за формулою:

$$h_0 = H - h_c = 4,3 - 0,5 = 3,8 \text{ м,}$$

де  $H$  - висота приміщення,  $h_c$  - висота звису світильника.

Отримане значення відповідає нормативним вимогам для світлодіодних джерел світла (оптимальна висота 2,5-4,0 м).

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 134
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

Висота розміщення джерела світла над робочою поверхнею визначається за формулою:

$$h = h_0 - h_p = 3,8 - 0,7 = 3,1 \text{ м},$$

де  $h_p$  - висота робочої поверхні.

Для забезпечення загального освітлення встановлено 20 світильників ДСП11ВEx, розміщених у два ряди. Така конфігурація забезпечує необхідний світловий потік, при цьому розрахункова освітленість становить  $E_\phi = 280 - 300$  лк, що відповідає вимогам ДБН В.2.528:2018 [42].

### 5.5 Повітря робочої зони

З метою нормалізації стану повітряного середовища у виробничих приміщеннях та нівелювання впливу шкідливих чинників (зокрема, потенційних витоків газоподібних продуктів розділення повітря) проектом закладено ряд конструктивно-технологічних рішень:

- герметизація технологічних апаратів і трубопроводів, що дозволяє мінімізувати витoki робочих середовищ та попередити загазованість робочої зони:

- нанесення теплової ізоляції на всі елементи обладнання, а також на всі низькотемпературні (криогенні) комунікації. Цей захід є необхідним як для підтримки комфортного мікроклімату, так і для профілактики виробничих опіків (термічних та криогенних).

Система вентиляції та опалення спроектована таким чином:

- у технологічних залах (насосних, компресорних) передбачено функціонування припливно-витяжної вентиляції;

- робоча зона операторів оснащується системами кондиціонування для точного регулювання параметрів мікроклімату;

– для обігріву приміщень у холодну пору року використовується система водяного або парового опалення, розрахована на підтримку температури теплоносія на рівні  $t_{\text{тепл}} = 70 - 75^{\circ}\text{C}$ .

На робочих місцях забезпечується дотримання оптимальних параметрів мікроклімату згідно з ДСН 3.3.6.042-99 [3]:

Для приміщення операторної (категорія робіт 16 - легка):

– температура повітря:  $22 - 24^{\circ}\text{C}$  (холодний період),  $23 - 25^{\circ}\text{C}$  (теплий період);

– відносна вологість  $40 - 60\%$ ;

– швидкість руху повітря не більше  $0,1 \text{ м/с}$ .

– концентрація кисню у повітрі має підтримуватися у межах 19-23% об'ємних

Для виробничого цеху (категорія робіт ПБ - середньої важкості):

– температура повітря:  $17 - 19^{\circ}\text{C}$  (холодний період),  $20 - 22^{\circ}\text{C}$  (теплий період);

– відносна вологість: 40-60%

– концентрація кисню у повітрі має підтримуватися у межах 19-23% об'ємних

– швидкість руху повітря не більше  $0,3 \text{ м/с}$

Для моніторингу та попередження аварійних ситуацій встановлені автоматичні газоаналізатори кисню з сигналізацією для запобігання асфіксії.

Зазначені технічні засоби гарантують підтримання оптимальних умов праці згідно з чинними санітарними нормами ДСН 3.3.6.042-99[29].

## 5.6 Пожежна безпека

На модернізованій азотно-кисневій установці використовуються речовини, які є вибухонебезпечними та пожежонебезпечними, включаючи кисень, який є сильним окисником. У поєднанні з можливими вуглеводневими

домішками це створює ризик утворення вибухонебезпечних газоповітряних сумішей, займання яких у замкненому просторі може призвести до виникнення критичного надлишкового тиску.

Виробниче приміщення класифікується за категорією Б (вибухопожежонебезпечна) згідно з ДСТУ Б В.1.1-36:2016 [44], а клас зони визначено як вибухонебезпечний клас В-Ia або В-Iг.

Потенційними місцями виникнення пожеж або вибухів є компресорне та насосне відділення, а також ділянки зберігання криогенних продуктів.

До основних причин виникнення аварійних ситуацій належать:

небезпечне накопичення горючих речовин у кисневому середовищі; несправності електрообладнання, що супроводжуються іскрінням;

раптова розгерметизація технологічного обладнання або фланцевих з'єднань.

Потенційними джерелами запалювання виступають розряди статичної електрики, електричні іскри, занесення високого потенціалу через комунікації або прямі удари блискавки. Об'єкт має II ступінь вогнестійкості згідно з вимогами ДБН В.1.1-7:2016 [45].

Проектом передбачено комплекс заходів протипожежного захисту: надійна система зв'язку та оповіщення, автоматичні установки порошкового та пінного пожежогасіння, кільцевий протипожежний водопровід, а також первинні засоби для гасіння пожеж, зокрема вогнегасники, пожежний інструмент (ломи, гаки, сокири) та інвентар (відра, ящики з піском, покривала).

Безпосередньо біля теплообмінників та ректифікаційної колони розміщено 9 вуглекислотних вогнегасників типу ВВК-3,5 (ОУ-5).

Для попередження вибухів через концентрацію вуглеводнів у кисні застосовується система аварійної примусової вентиляції з продуктивністю  $L = 8K$ .

Вона активується автоматично при досягненні вмісту небезпечних речовин на рівні 20% від нижньої концентраційної межі поширення полум'я.

Первинні засоби пожежогасіння мають відповідне маркування: вогнегасники пофарбовані у червоний колір, ємності з водою та піском мають білі написи.

Ящики для піску об'ємом 0,5, 1,0 і 3,0 м<sup>3</sup> укомплектовані совковими лопатами. Також у наявності протипожежні покривала з негорючої тканини розмірами 2 x 1 м та 2 x 2 м.

Система протипожежного водопроводу живить установки для зрошення колонних апаратів та резервуарів, а також дозволяє підключати мобільну пожежну техніку.

Для захисту колон використовуються пінні установки. Охолодження резервуарів здійснюється локально в зонах нагріву за допомогою зрошувальних напівкілець.

У приміщеннях насосної та компресорної станцій змонтовано порошкову систему пожежогасіння у вибухозахищеному виконанні згідно з ДБН В.2.5-56:2014 [46].

Зовнішнє пожежогасіння забезпечується гідрантами кільцевої мережі, а на підприємстві діє спеціалізована пожежна команда.

Для ліквідації локальних загорянь застосовуються вогнегасники ВВК-3,5 (ОУ-5) та повітряно-пінні ВПП-10, а для діючих електромереж — порошкові ВП-5 (ОП-5) або аналогічні. Внутрішні пожежні крани розташовані з кроком 30 м і рукавами довжиною 10 м.

### **5.7 Безпека під час роботи установки**

Гарантування безпечної експлуатації модернізованого технологічного комплексу базується на неухильному виконанні вимог технологічних

інструкцій, правил охорони праці та реалізації організаційно-технічних заходів.

Перед початком роботи оператор зобов'язаний:

– перевірити технічний стан основних вузлів, механізмів та допоміжного устаткування на відсутність видимих дефектів;

– впевнитися у наявності та надійності кріплення захисних кожухів, огорожень рухомих частин, а також щільності закриття люків і технологічних кришок [38] ;

– провести огляд кабельних трас та корпусів електрообладнання для підтвердження цілісності зовнішньої ізоляції та відсутності механічних пошкоджень;

– перевірити надійність з'єднання металевих неструмопровідних частин обладнання з контуром захисного заземлення (або занулення) ;

– переконатися у ефективній роботі систем припливно-витяжної вентиляції, приділяючи особливу увагу зонам можливого накопичення продуктів розділення повітря (зокрема, азоту) ;

– здійснити перевірку справності засобів аварійної зупинки (кнопки «СТОП») та систем автоматичного блокування;

До самостійної роботи на установці допускається лише атестований персонал, який пройшов фахове навчання, стажування та отримав відповідний письмовий допуск. Експлуатація та обслуговування електротехнічної частини дозволяється працівникам, які мають відповідну кваліфікаційну групу з електробезпеки згідно з ПУЕ та пройшли цільовий інструктаж безпосередньо на робочому місці [31].

Під час функціонування установки суворо заборонено:

– проводити будь-які ремонтні, налагоджувальні роботи або змащування вузлів під час руху механізмів;.

– торкатися незахищених ділянок трубопроводів та апаратів, що мають високу або кріогенно низьку температуру (холодних елементів) [37];

– експлуатувати обладнання зі знятими захисними екранами, відкритими дверцятами електрошаф або несправними блокуваннями.

У разі виявлення ознак передаварійної ситуації (поява стороннього шуму, вібрації, витік робочого тіла, спрацювання попереджувальної сигналізації) оператор зобов'язаний негайно здійснити аварійну зупинку установки, натиснувши кнопку «СТОП», та невідкладно доповісти про інцидент безпосередньому керівнику зміни.

## 5.8 Надзвичайні ситуації

Передбачається сценарій виникнення надзвичайної ситуації, пов'язаної з вибухом. Вихідною умовою для розрахунків є наявність на об'єкті горючих матеріалів або компонентів, що можуть утворити вибухонебезпечну суміш, умовною масою 50 тонн.

Характеристики цеху:

– Будівля виконана зі збірних залізобетонних конструкцій.  
– Технологічне оснащення представлене масивними агрегатами.  
– Прокладання кабельних комунікацій виконано відкритим наземним способом.

– Контрольно-вимірювальна апаратура — перебуває у робочому стані.—

Межа вогнестійкості несучих стін становить 2 години.

– Межа вогнестійкості перегородок — 15 хвилин.

– Категорія виробництва за пожежною безпекою — В.

– Щільність забудови об'єкта — 25%

Розрахункові дані:

Радіус Зони I (сильні руйнування):  $r_1 = 225$  м

Радіус Зони II (середні руйнування):  $r_2 = 378$  м.

Висновок: Оскільки сусідні будівлі розташовані за межами визначених радіусів, вони потрапляють у Зону ІІІ (зону слабких та середніх руйнувань) дії повітряної ударної хвилі, де прогнозований надмірний тиск ( $\Delta P_{\phi}$ ) становить 10-15 кПа.

На рисунку 5.1 зображено зони руйнування.

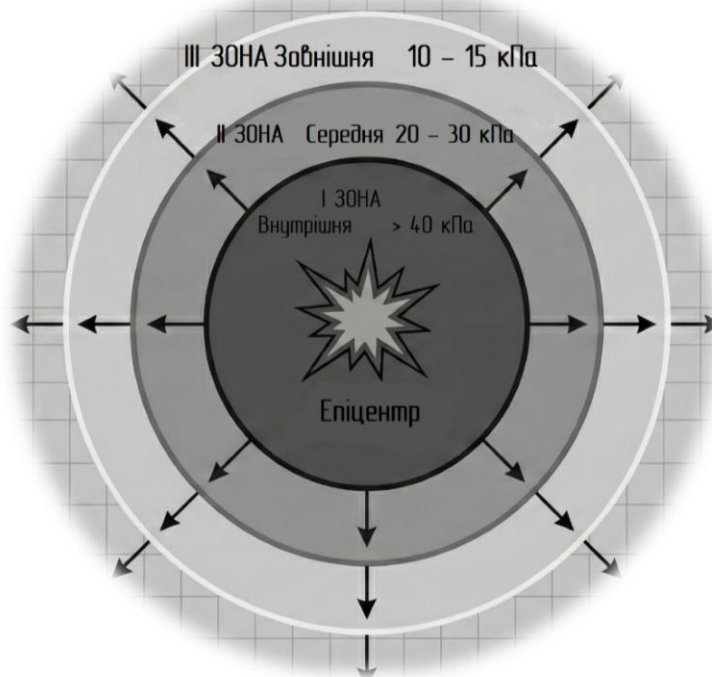


Рисунок 5.1 – Зони руйнування

Рівень пошкоджень сусідньої будівлі прогнозується як середній, що передбачає такі наслідки:

- пошкодження покрівельних конструкцій, руйнування легких внутрішніх перегородок, утворення тріщин у стінах;
- технологічне обладнання зазнає деформацій; можливий вихід з ладу окремих елементів управління, важелів або чутливих приладів;
- контрольно-вимірювальна апаратура може отримати значні пошкодження;
- кабельні лінії зазнають незначних ушкоджень;

– ризик ураження людей від безпосередньої дії ударної хвилі оцінюється як помірний;

Будівля відповідає II ступеню вогнестійкості. Для виробництва категорії Б, при впливі надмірного тиску та теплового випромінювання, очікується виникнення окремих осередків пожеж. Існує ймовірність їх злиття у суцільну пожежу протягом 1–2 годин.

Розрахунки показують, що контрольно-вимірювальна апаратура збереже працездатність лише за умови, що маса вибухонебезпечної речовини в епіцентрі не перевищить 15 тонн.

Висновок: Вибух газоповітряної суміші на розрахунковій відстані від виробничого приміщення призведе до пошкодження будівельних конструкцій цеху та технологічного обладнання, а також створює загрозу травмування персоналу.

Першочерговою дією при виникненні надзвичайної ситуації є негайне сповіщення керівництва підприємства та аварійних служб.

Першочерговою дією при виникненні надзвичайної ситуації є негайне сповіщення керівництва підприємства та аварійних служб.

Для мінімізації збитків рекомендовано:

- посилення несучих конструкцій будівлі шляхом встановлення додаткових зв'язків та ферм;
- надійна фіксація технологічного обладнання на фундаментах, облаштування захисних навісів;
- перенесення відповідальних кабельних магістралей у підземні канали або лотки;
- створення 50% аварійного запасу контрольно-вимірювальних приладів для швидкого відновлення контролю над процесом;

ЛМ41мн.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 142
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

- обладнання вікон захисними металевими сітками або наклеювання бронеплівки для захисту від уламків скла;
- систематична перевірка працездатності систем пожежогасіння та наявності засобів первинного пожежогасіння;
- зниження обсягів зберігання вибухонебезпечних матеріалів на робочих місцях до мінімально необхідного рівня.

План евакуації з виробничого приміщення наведено на рисунку 5.2.

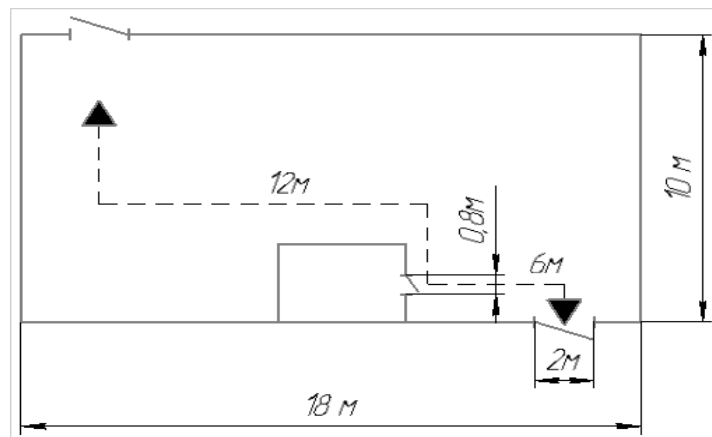


Рисунок 5.2 – План евакуації з виробничого приміщення

## **6 Рекомендації щодо монтажу та експлуатації апарата**

Розділ розроблено на основі методичних вказівок та навчального посібника [47].

Монтаж основного технологічного обладнання азотно-кисневої установки, зокрема ректифікаційної колони та теплообмінника, виконується спеціалізованими монтажними організаціями згідно із затвердженим проектом виконання робіт та вимогами чинної нормативно-технічної документації, зокрема НПАОП 0.00-1.81-18 [48].

Організація монтажного майданчика передбачає попередню підготовку під'їзних шляхів, інженерних мереж та фундаментів, приймання яких здійснюється за актом із перевіркою відповідності головних осей та висотних позначок проектним даним згідно з положеннями про геодезичне обґрунтування монтажу. Перед початком встановлення обладнання необхідно провести вхідний контроль, перевіривши комплектність поставки, наявність паспортів судин та відсутність пошкоджень, отриманих під час транспортування, при цьому особлива увага приділяється стану антикорозійного покриття та ущільнювальних поверхонь фланців.

Специфіка монтажу ректифікаційної колони, яка належить до категорії великогабаритних вертикальних апаратів, вимагає застосування спеціальних методів підйому, серед яких найбільш раціональним є метод повороту навколо шарніра без відриву від ґрунту або метод ковзання опорної частини, що дозволяє мінімізувати динамічні навантаження на корпус.

Стропування апарата виконується за спеціально передбачені цапфи або монтажні штуцери, розташовані вище центру мас, з використанням траверс для запобігання деформації обичайки, а закріплення на фундаменті здійснюється за допомогою фундаментних болтів із подальшим підливанням бетонною сумішшю після остаточного вивіряння вертикальності.

Монтаж кожухотрубного теплообмінника виконується на підготовлені сідлові опори, причому конструкція кріплення повинна передбачати можливість вільного температурного подовження корпусу шляхом використання рухомих опор або овальних отворів під болти з одного боку апарата.

Після завершення механомонтажних робіт та до нанесення теплової ізоляції проводиться технічне опосвідчення та гідравлічне випробування апаратів пробним тиском, величина якого визначається розрахунковим шляхом з урахуванням допустимих напружень матеріалу стінки при температурі випробувань відповідно до методики, викладеної у НПАОП 0.00-1.81-18 [49].

Успішним вважається випробування, при якому не зафіксовано падіння тиску за манометрами, відсутні ознаки розриву, течі або потіння у зварних з'єднаннях та основному металі. Експлуатація обладнання дозволяється лише після реєстрації судин у відповідних наглядових органах (за необхідності), перевірки справності запобіжних клапанів, що захищають систему від перевищення тиску понад допустимий рівень, та оформлення акта про приймання устаткування в експлуатацію.

Для забезпечення надійності та довговічності роботи установки впроваджується система технічного обслуговування та ремонту, яка базується на планово-попереджувальному принципі та включає регламентовані огляди, поточні ремонти для заміни швидкозношуваних елементів, таких як прокладки та сальникові ущільнення, а також капітальні ремонти з повною діагностикою та відновленням ресурсу базових деталей.

Пуск та зупинка обладнання, особливо в зимовий період, повинні проводитися згідно з регламентом, що обмежує швидкість зміни температури стінки для запобігання виникненню небезпечних термічних напружень у фланцевих з'єднаннях та елементах корпусу.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 145
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

Персонал, що обслуговує азотно-кисневу установку, зобов'язаний пройти навчання та перевірку знань з охорони праці, дотримуватися інструкцій з безпечної експлуатації судин, що працюють під тиском, та використовувати засоби індивідуального захисту.

## 7 Рівень стандартизації та уніфікації

Визначення технічного рівня спроектованої азотно-кисневої установки передбачає оцінку ефективності прийнятих конструктивних рішень.

Аналіз проводять шляхом обчислення показників, що відображають доцільність структури виробу з погляду виробництва та експлуатації [49].

Уніфікація передбачає приведення виробів до функціональної та конструктивної однотипності шляхом встановлення раціональної кількості їх різновидів.

Головною метою є уникнення невиправданого розширення номенклатури типорозмірів.

Рівень уніфікації визначає частку складових частин, які є взаємозамінними або багаторазово повторюються в межах виробу.

Реалізація цих принципів сприяє зниженню собівартості продукції та підвищенню її ремонтпридатності.

Стандартизація визначає ступінь застосування у конструкції деталей та вузлів, що виготовляються відповідно до вимог чинних державних або галузевих стандартів. Високий показник стандартизації гарантує стабільну якість комплектуючих та можливість їх швидкої заміни без додаткового припасування.

Для визначення рівня стандартизації та уніфікації розраховують відповідні коефіцієнти  $K_{ст}$  та  $K_{ун}$ , що являють собою відношення кількості уніфікованих або стандартних елементів до загального числа деталей у специфікації.

Рівень стандартизації теплообмінника:

$$K_{ст} = \frac{n_{ст}}{N} \cdot 100\% = \frac{122}{600} \cdot 100\% = 20\%,$$

де  $n_{ст} = 12$  – кількість стандартних деталей;  $N = 602$  – загальна кількість деталей згідно зі специфікацією.

Рівень уніфікації теплообмінника становить:

$$K_{\text{ун}} = \frac{n_{\text{ст}} + n_{\text{ун}}}{N} \cdot 100\% = \frac{12 + 574}{600} \cdot 100\% = 97\%,$$

де  $n_{\text{ун}} = 574$  – кількість уніфікованих деталей.

Аналогічний розрахунок проведемо для основного апарата розділення повітря — ректифікаційної колони.

Враховуючи складність конструкції (наявність тарілок, обичайок, вузлів вводу/виводу), показники обчислюються на основі повного переліку елементів.

Рівень стандартизації ректифікаційної колони становить:

$$K_{\text{ст}} = \frac{n_{\text{ст}}}{N} \cdot 100\% = \frac{645}{649} \cdot 100\% = 99,4\%,$$

де  $n_{\text{ст}} = 645$  – кількість стандартних деталей згідно зі специфікацією;  $N = 649$  – загальна кількість у колоні.

Рівень уніфікації ректифікаційної колони становить:

$$K_{\text{ун}} = \frac{n_{\text{ст}} + n_{\text{ун}}}{N} \cdot 100\% = \frac{4 + 645}{649} \cdot 100\% = 99\%,$$

де  $n_{\text{у}} = 15$  – кількість уніфікованих деталей.

Висновок: аналіз отриманих показників свідчить про високий рівень уніфікації, досягнутий завдяки модульному принципу побудови та масовому використанню однотипних елементів. Суттєво знижує собівартість виготовлення і спрощує ремонт.

Низький рівень стандартизації є типовим для даного класу хімічної апаратури та обумовлений специфікою розрахунку за РД 50-33-80, який вимагає виключення стандартних кріпильних виробів, відображаючи таким чином індивідуальний характер виробництва спеціалізованих зварних корпусів та унікальних внутрішніх пристроїв..

## 8.1 Опис ідеї

Стартап-проект «OpenChemEngineering» спрямований на створення відкритої програмної платформи для моделювання, аналізу та розрахунків процесів ректифікації, теплообміну й глибокого охолодження [50,51].

Основна мета якої полягає у наданні студентам, викладачам, інженерам та науковцям сучасного, зручного і безкоштовного інструменту для інженерних розрахунків, що базується на відкритих бібліотеках Python (NumPy, SciPy, CoolProp, Matplotlib) [52,53].

Розроблений продукт забезпечує можливість побудови параметричних моделей колон, проведення розрахунків за методикою Дитнерського, візуалізації результатів та подальшої інтеграції з іншими освітніми або промисловими інструментами [17, 52,53].

Унікальність проекту полягає в поєднанні відкритого вихідного коду, наукової достовірності методик і безкоштовного доступу до інженерного інструменту українською мовою [54].

Логотип розробленого стартап-проекту наведено на рисунку 8.1.



Рисунок 8.1 – Логотип стартап-проекту

Детальний опис ідеї стартапу наведено в таблиці 8.1.

Таблиця 8.1 – Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Розробка відкритого програмного комплексу на базі Python для моделювання процесів ректифікації, теплообміну та розділення газових сумішей	Освітній процес у технічних університетах; наукові дослідження в галузі криогенної техніки; промислові застосування для попередніх інженерних розрахунків	Безкоштовний доступ до програмного забезпечення; відсутність потреби у дорогих ліцензіях; можливість навчання і досліджень на відкритих алгоритмах; локалізований україномовний інтерфейс
Впровадження модульної системи з відкритим ядром і платними розширеннями	Інженерна освіта, лабораторні заняття, промисловий консалтинг	Розширення можливостей без обмеження базової функціональності; безкоштовні умови для студентів і викладачів; швидкий обмін науковими моделями через GitHub

Проект базується на сучасній open-source екосистемі Python і передбачає використання готових бібліотек, інтерфейсів та алгоритмів для реалізації термодинамічних, гідродинамічних і теплообмінних розрахунків апаратів ПОХТ [55]. Метою аудиту є оцінка технологічної здійсненності проекту — наявності, доступності та зрілості інструментів, необхідних для його створення.

Аналіз існуючих рішень показує, що спільнота розробників вже створила низку відкритих інструментів, які слугують фундаментом для проекту. Зокрема, існують реалізації методу МакКейба-Тіеле мовою Python, освітні інструменти для розрахунку багатокomпонентної ректифікації, а також симулятори колон із застосуванням елементів машинного навчання.

Крім того, доступні відкриті коди для проектування колон для бінарних сумішей, що позиціонуються як альтернатива Aspen Plus, та скрипти для автоматичного розрахунку ректифікаційних установок і теплообмінників .

Для визначення позиції продукту на ринку було проведено порівняння його техніко-економічних характеристик з існуючими комерційними аналогами, результати якого наведено у таблиці 8.2.

Таблиця 8.2 – Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї

Техніко-економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W (слабка сторона)	N (нейтральна сторона)	S (сильна сторона)
	Мій проект	Конкурент 1 (Mathcad / Matlab)	Конкурент 2 (Aspen HYSYS)			
Відкритий код (Open Source)	Є (повний доступ)	Немає (пропріетарне ПЗ)	Немає (пропріетарне ПЗ)	-	-	+
Методика розрахунку (Дитнерський)	Інтегрована	Потребує ручного програмування	Використовує власні закриті алгоритми	-	+	-
Модульність та API	Нативна (Python)	Обмежена (власні скрипти)	Обмежена (складні інтерфейси)	-	-	+
База даних речовин	CoolProp (відкрита)	Вбудована (обмежена) / Платна	Вбудована (велика, професійна)	-	+	-
Вартість ліцензії для ВНЗ	Безкоштовно	Висока (комерційна/академічна)	Дуже висока (промислова)	-	-	+
Вимоги до апаратного забезпечення	Низькі (працює в браузері/Colab)	Середні (вимагає встановлення)	Високі (потужні станції)	-	-	+
Графічний інтерфейс (UI)	Базовий (розробляється)	Розвинений, професійний	Складний, професійний	+	-	-
Верифікація (сертифікація)	Відсутня (beta)	Часткова	Повна (індустріальний стандарт)	+	-	-

Розроблена ідея стартап-проєкту OpenChemEngineering є перспективною з технічної, економічної та соціальної точок зору, оскільки проєкт орієнтований на створення вільного українського аналога закордонних комерційних систем для розрахунків апаратів ПОХТ [55], що сприятиме розвитку цифрової освіти та впровадженню інновацій у галузевому машинобудуванні [56].

Проєкт має чітко виражені техніко-економічні переваги, серед яких сильними сторонами є відкритий код[52, 57], доступність, безкоштовність для освіти та інтеграція з Python-екосистемою, тоді як до нейтральних сторін належать точність розрахунків та зручність використання, що аналогічні комерційним продуктам, а слабкими сторонами є потреба в подальшій розробці графічного інтерфейсу та верифікації методик, що необхідно відобразити у SWOT-аналізі.

Ключовими перевагами проєкту виступають доступність через концепцію опенсорс, гнучкість і масштабованість завдяки модульній структурі, наукова валідність методик та підтримка STEM-освіти в Україні [58].

Таким чином, стартап OpenChemEngineering має високий потенціал конкурентоспроможності та комерціалізації в освітньому та науковому сегментах ринку[59], а також забезпечує значний соціальний ефект у поширенні інженерних знань та наукових інструментів [57, 60].

## 8.2 Технологічний аудит ідеї проєкту

У межах даного підрозділу проведено аудит технологій, за допомогою яких можливо реалізувати ідею стартап-проєкту «OpenChemEngineering», який базується на сучасній open-source екосистемі Python і передбачає використання готових бібліотек, інтерфейсів та алгоритмів для реалізації

термодинамічних, гідродинамічних і теплообмінних розрахунків апаратів ПОХТ.

Метою аудиту є оцінка технологічної здійсненності проекту — наявності, доступності та зрілості інструментів, необхідних для його створення.

Аналіз існуючих інструментів показує наявність відкритих кодів для розрахунку ректифікації та теплообміну, що підтверджує реалістичність розробки, а узагальнені результати аналізу технологій наведено в таблиці 8.3 [61].

Таблиця 8.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
Розрахункове ядро	Python (NumPy, SciPy)	Існують open source)	Вільний доступ (PyPI)
Властивості речовин	CoolProp	Є готові пакети	Легка інтеграція
Розрахунок ректифікації	Алгоритми МакКейба–Тіеле	Є освітні приклади	Потребують адаптації
Теплообмін та гідравліка	Класичні кореляції	Є відомі методики)	Відкриті модулі
Графічний інтерфейс	PySide6 / FastAPI	Є фреймворки	Доступні
Інфраструктура	GitHub, Docker	Є стандарти	Безкоштовні
Модель доступу	Open Core (MIT)	Є	Сумісні з ЗВО

Після детального аналізу доступних технологічних рішень встановлено, що обрані підходи та інструменти повністю відповідають вимогам проекту і дають змогу реалізувати його на практиці, отже, технологічна реалізація є можливою [56].

Рациональний технологічний шлях передбачає поетапну розробку, починаючи зі створення MVP ядра для розрахунку бінарних рівноваг і побудови діаграм, подальшу реалізацію модуля «HX-Design» для

теплообмінних процесів [54] та моделювання стаціонарних режимів роботи колон [52, 53].

Наступні кроки включають розрахунок гідравліки та оптимізацію параметрів, розробку графічного інтерфейсу користувача на базі PySide6 або FastAPI, а завершальним етапом є валідація результатів на регресійному наборі прикладів та автоматизація процесів тестування.

### 8.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей для стартап-проекту OpenChemEngineering дозволяє оцінити його перспективність на ринку інженерного програмного забезпечення та освітніх технологій. На даному етапі проведено аналіз попиту, характеристику потенційних клієнтів, а також SWOT-аналіз конкурентного середовища.

Ринок інженерного та освітнього програмного забезпечення має позитивну динаміку, середню рентабельність вище середньоринкової й низьку насиченість локальними продуктами, що робить його привабливим для входження з українським open-source рішенням типу OpenChemEngineering, Детальна характеристика якого наведена у таблиці 8.4 [62].

Таблиця 8.4 – Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

Показники стану ринку	Характеристика
1	2
Кількість головних гравців, од.	8–10 основних гравців: «MathWorks», «PTC», «AspenTech», «Honeywell», «Wolfram Research», «DWSIM», «OpenModelica», «Scilab»
Загальний обсяг продаж, грн/ум. од.	Орієнтовно 5–6 млрд грн щорічно для України та суміжних ринків «EdTech» та «CAE Software»
Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає, щорічне збільшення становить 7–10 %

1	2
Наявність обмежень для входу	Висока конкуренція, потреба у сертифікації, відсутність локалізованих українських рішень
Специфічні вимоги до стандартизації	Дотримання стандартів «ISO 9001:2015», сумісність із ЄСКД, ДСТУ та ГОСТ для креслень
Середня норма рентабельності в галузі, %	25–35 %, що вище середнього банківського відсотка та свідчить про привабливість інвестування

Програмне забезпечення OpenChemEngineering задовольняє потребу у виконанні навчальних, наукових та інженерних розрахунків без необхідності купівлі дорогих комерційних ліцензій.

Основними споживачами є навчальні заклади, дослідницькі центри, промислові підприємства та інженерні компанії, характеристика яких представлена в таблиці 8.5 [56].

Таблиця 8.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (сегменти ринку)	Відмінності у поведінці клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Потреба у доступному, точному та відкритому програмному середовищі для інженерних розрахунків	Студенти та викладачі технічних університетів (наприклад, «КПІ», «ЛНТУ», «ЛП», «ХП»), науково-дослідні лабораторії, інженерно-конструкторські бюро, підприємства хімічного, нафтопереробного та енергетичного секторів	Студенти орієнтовані на простоту та безкоштовний навчальний доступ, компанії — на точність, надійність та інтеграцію з існуючими системами, дослідники — на можливість модифікації коду та відкритість формул	Гнучка цінова політика або безкоштовність, модульна структура, наукова достовірність розрахунків, наявність української та англійської локалізації, можливість інтеграції в лабораторні заняття

Сьогодні в умовах динамічного розвитку технологій та зростання конкуренції на ринку успіх стартапу залежить не лише від рівня інноваційності продукту, а й від здатності передбачити потенційні виклики та можливості.

Тому на етапі планування особливу увагу слід приділити виявленню факторів ризику, які наведено у таблиці 8.6 і які можуть перешкоджати ефективній реалізації проекту. Також необхідно провести аналіз перспектив розвитку, представлених у таблиці 8.7, що визначають його довгострокову стійкість і конкурентоспроможність [60].

Таблиця 8.6 – Фактори загроз

Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
Висока конкуренція з боку світових компаній	Домінування «Mathcad», «Matlab», «AspenTech» на ринку	Позиціонування як безкоштовної альтернативи для навчання й малих підприємств
Обмежене фінансування українських освітніх проектів	Нестача державних грантів або інвесторів	Пошук підтримки через гранти «Horizon Europe», «EU4Digital», «EdTech Accelerator»
Недовіра до open-source рішень у промисловості	Стереотипи щодо стабільності та безпеки програмного забезпечення	Публікація верифікованих кейсів і результатів тестів, проведення сертифікації
Кадрові ризики	Залежність від невеликої команди розробників	Залучення спільноти «GitHub» і університетів через модель open collaboration

Таблиця 8.7 – Потенційні можливості розвитку стартап-проєкту

Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
Поширення open-source в освіті	Тренд на використання відкритих інструментів в університетах	Партнерство з технічними ЗВО, розповсюдження безкоштовних академічних версій
Зростання STEM-освіти та дистанційного навчання	Попит на інтерактивні симулятори та візуальні середовища	Інтеграція з платформами «Jupyter», «Colab» і «Moodle»
Висока ціна комерційного ПЗ	Недоступність платних ліцензій для багатьох навчальних закладів	Пропозиція безкоштовного аналога з розширеним функціоналом
Попит на локалізоване українське ПЗ	Потреба у національному програмному продукті	Локалізація інтерфейсу, створення україномовної документації

На наступному етапі дослідження здійснюється покроковий огляд конкурентного середовища, результати якого наведено в таблиці 8.8. Такий аналіз є важливим елементом стратегічного управління, оскільки окремі фактори конкуренції по-різному впливають на ефективність роботи підприємства та його стійкість на ринку[59].

Таблиця 8.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1	2	3
Монополістична конкуренція	Наявність великих гравців типу «Mathcad» чи «Matlab» поряд із багатьма нішевими рішеннями та низькими бар'єрами входу	Позиціонування як спеціалізованого інструменту для хіміків-технологів, що вирішує вузькі задачі краще за універсальні пакети
За рівнем конкурентної боротьби: міжнародний	Глобальна дистрибуція через «GitHub» та «PyPI», пряма конкуренція зі світовими продуктами	Забезпечення двомовності інтерфейсу, дотримання міжнародних стандартів, просування на «Reddit» та «ResearchGate»

1	2	3
За галузевою ознакою: внутрішньогалузева	Боротьба за споживача в межах галузі інженерного ПЗ та «EdTech»	Глибока спеціалізація на потребах машинобудування та інтеграція специфічних бібліотек типу «CoolProp»
За видами товарів: товарно-видова	Змагання між різними способами задоволення потреби: закрите комерційне ПЗ проти «Open Source» на «Python»	Акцент на перевагах відкритого коду, можливості модифікації та сучасності стеку технологій
За характером: нецінова	Боротьба ведеться не за ціну, а за якість функціоналу та зручність, оскільки продукт є безкоштовним	Підвищення якості документації, створення відеоуроків, верифікація розрахунків та покращення UI/UX
За інтенсивністю: немарочна (конкуренція спільнот)	Споживач обирає продукт через функціональність та рекомендації спільноти, а не через відомий бренд	Активна робота в «Telegram» та «GitHub Issues», швидка реакція на запити, формування репутації надійного інструменту

На наступному етапі проводиться детальний аналіз конкурентного середовища галузі за методикою М. Портера, наведений в таблиці 8.9.

Цей інструмент дозволяє отримати всебічне уявлення про стан ринку та фактори, що впливають на бізнес.

Вивчення ключових аспектів — таких як існуючі конкуренти, можливі нові учасники, постачальники, клієнтська база та альтернативні продукти — дає змогу оцінити сильні сторони стартапу та виявити потенційні загрози, що можуть впливати на його розвиток і стратегію [63].

Після проведеного загального аналізу ринку доцільно виконати більш детальний аналіз конкурентного середовища за моделлю п'яти сил М. Портера [55], що дозволяє оцінити інтенсивність конкурентної боротьби, можливості входу на ринок і вплив суміжних сторін (постачальників, клієнтів, товарів-замінників).

Таблиця 8.9 – Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товаризамінники
Складові аналізу	«Mathcad» (PTC), «Matlab» (MathWorks), «AspenTech», «DWSIM», «Scilab». Основна боротьба ведеться у сегменті комерційного інженерного ПЗ та освітніх симуляторів.	Нові «EdTech»-проекти на базі «Python» і «Jupyter» («Colab Simulations», «Engineering Toolbox Online», «PyChemCAD»).	Основними «постачальниками» виступають open-source бібліотеки («NumPy», «SciPy», «CoolProp»), хостингові платформи («GitHub», «PyPI») і волонтерські спільноти.	Основні споживачі — студенти, викладачі, науковці, інженери, підприємства хімічної, енергетичної та нафтопереробної галузей.	Комерційні платформи («Mathcad», «Matlab», «Aspen Plus») або онлайн-сервіси («Wolfram Cloud», «Engineering Toolbox»).
Висновки	Інтенсивність конкуренції середня: великі гравці контролюють комерційний сектор, але практично відсутні відкриті рішення з українською локалізацією, що створює нішу для «OpenChemEngineering».	Ймовірність входу нових гравців помірна — вхід на ринок потребує глибоких знань у термодинаміці, бар'єри високі. Конкуренти можуть з'явитися через 1–2 роки у формі навчальних онлайн-платформ.	Постачальники не мають ринкової сили — більшість технологій безкоштовні або мають відкриту ліцензію. Ризик залежності від постачальників — низький.	Клієнти диктують попит на безкоштовні та локалізовані рішення, що робить open-source формат особливо привабливим. Університети зацікавлені у довгостроковому партнерстві.	Основна загроза від товаризамінників — висока вартість та закритість комерційного ПЗ. Водночас це створює ринкову можливість для безкоштовного відкритого продукту.

В умовах існуючого рівня конкуренції на ринку, середня інтенсивність конкуренції, оскільки великі гравці охоплюють комерційний сектор, але не мають безкоштовних рішень для освіти.

Потенційні конкуренти можуть з'явитися серед нових open-source ініціатив, проте високий бар'єр входу (необхідність експертних знань у термодинаміці) захищає нішу.

Постачальники бібліотек не диктують умов — більшість рішень безкоштовні. Клієнти зацікавлені у локальних, україномовних продуктах — що створює перевагу для OpenChemEngineering.

Виходячи з результатів конкурентного аналізу, з урахуванням специфіки ідеї проєкту, вимог цільової аудиторії до продукту, та факторів маркетингового середовища були визначені ключові фактори конкурентоспроможності. Їхній перелік представлено у таблиці 8.10 [55].

Таблиця 8.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проєктів значущим)
Ціна доступу та ліцензування	Для освітніх установ та студентів відсутність витрат на ліцензії є вирішальним фактором для масового впровадження
Гнучкість та адаптивність	Можливість модифікації коду та підключення зовнішніх бібліотек дозволяє адаптувати інструмент під специфічні наукові та навчальні задачі
Локалізація та зручність інтерфейсу	Наявність україномовного інтерфейсу та методик усуває мовний бар'єр, що критично важливо для швидкого освоєння матеріалу студентами
Інтеграційні можливості	Сумісність із сучасними екосистемами («Python», «Web», «CAD») дозволяє використовувати продукт як частину комплексних досліджень
Наукова достовірність	Використання перевірених інженерних методик (Дитнерський, Павлов) є гарантією точності розрахунків, що є критичним для проєктування
Вартість обслуговування (ТСО)	Використання відкритих технологій мінімізує витрати на підтримку, оновлення та навчання персоналу в довгостроковій перспективі

Виходячи з визначених факторів, було здійснено детальну оцінку сильних і слабких сторін проєкту. Проведений аналіз дозволяє всебічно оцінити потенціал стартапу, виявити його ключові переваги та вразливі місця, що

можуть впливати на ефективність реалізації. Результати цієї оцінки представлені в таблиці 8.11 [55].

Таблиця 8.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «OpenChemEngineering»

Фактор конкурентоспроможності	Бали(1-20)	Рейтинг товарів-конкуrentів у порівнянні з «OpenChemEngineering»						
		-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Доступність ціни (безкоштовність)	20	A, B, C			D			
Відкритість коду (Open Source)	19	A, B, C			D			
Українська локалізація	18		A, B, C		D			
Низькі вимоги до апаратного забезпечення	17		C	B	D	A		
Інтеграційні можливості (API/Python)	16		A		D	B, C		
Зручність інтерфейсу (UI/UX)	14				D	A	B	C
Технічна підтримка та сервіс	13				D		A, B	C
Візуалізація результатів (3D/Графіка)	12				D	A	B	C
Наявність сертифікації (Верифікація)	11				D		A	B, C

де D — Проєкт «OpenChemEngineering» (точка відліку); A — Конкуrent 1: Mathcad (PTC); B — Конкуrent 2: Matlab (MathWorks); C — Конкуrent 3: Ansys.

До ключових переваг проєкту, належать відкритий вихідний код, безкоштовна академічна ліцензія, українська локалізація, а також висока модульність і масштабованість системи.

Ці характеристики разом із низькими вимогами до апаратного забезпечення забезпечують гнучкість у використанні та надають проєкту суттєву перевагу над платними та ресурсомісткими аналогами (Ansys, Matlab), особливо в освітньому секторі. Додатковими сильними сторонами є інтеграція

з іншими системами, зручність інтерфейсу користувача та наявність технічної підтримки спільноту, що підвищує привабливість рішення для кінцевих користувачів.

Водночас аналіз показав, що конкуренти зберігають лідерство у сферах професійної 3D-візуалізації та промислової сертифікації. Також було виявлено певні напрями для вдосконалення проєкту — зокрема, покращення механізмів верифікації розрахунків та підвищення рівня зручності користування.

Отримані результати стануть основою для заключного етапу оцінки ринкових можливостей — проведення SWOT-аналізу, який дозволяє систематизувати сильні й слабкі сторони, можливості розвитку та потенційні загрози впровадження проєкту, таблиця 8.12 [64].

Таблиця 8.12 – SWOT- аналіз стартап-проєкту

Сильні сторони: Відкритий вихідний код (Open Source), відсутність ліцензійних платежів, українська локалізація, низькі вимоги до обладнання, модульність та інтеграція, активна підтримка спільноти	Слабкі сторони: Обмежена 3D-візуалізація, відсутність промислової сертифікації, потреба в покращенні UI/UX, необхідність додаткової верифікації модулів, відсутність цілодобової техпідтримки.
Можливості: Зростання ринку дистанційного навчання, залучення грантів, партнерство з технічними університетами, створення платних Pro-модулів, імпортозаміщення програмного забезпечення.	Загрози: Демпінг з боку великих конкурентів, консерватизм промислових замовників, відтік ключових розробників, складність залучення початкового фінансування, копіювання продукту іншими розробниками

Результати SWOT-аналізу відображають поточний стан і перспективи розвитку стартап-проєкту. Серед сильних сторін — відкритий вихідний код, безкоштовна академічна ліцензія, українська локалізація, модульна архітектура та інтеграція з бібліотеками Python.

ЛМ41мн.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 162
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

Важливим чинником є й активна підтримка спільноти розробників та університетських партнерів.

До слабких сторін належать обмежені людські ресурси, низька впізнаваність на міжнародному рівні, відсутність постійної технічної підтримки й потреба у додатковій верифікації розрахункових модулів.

Серед можливостей виділяються зростання попиту на open-source рішення, доступ до європейських грантових програм і відсутність локальних аналогів. Натомість загрози включають високу конкуренцію з боку міжнародних компаній, потенційну нестачу фінансування, недовіру до безкоштовного ПЗ та ризик копіювання функціоналу іншими проектами [60].

Результати аналізу альтернатив ринкового впровадження наведено у таблиці 8.13. Для початкового етапу доцільно реалізовувати університетсько-грантову модель, що забезпечує швидке залучення користувачів, просту підтримку та високий іміджевий ефект.

Таблиця 8.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів)	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
Університетсько-грантова модель розвитку — розробка та впровадження продукту у співпраці з технічними університетами (КПІ, ЛНТУ, ХПІ), подання заявок на гранти Erasmus+ та Horizon Europe; поширення безкоштовних академічних версій.	Висока	1–2 роки
Комерційна модель “Freemium” — базова версія безкоштовна, професійні модулі (теплообмін, оптимізація, 3D-візуалізація) за передплатою; співпраця з промисловими підприємствами.	Середня	2–3 роки
Відкрита міжнародна співпраця (open community model) — створення спільноти з університетів та ентузіастів з різних країн; публікація коду на GitHub, залучення менторів з Python Foundation та open-source фондів.	Середня	3–4 роки

Для початкового етапу доцільно реалізовувати університетсько-грантову модель, що забезпечує швидке залучення користувачів, просту підтримку та високий іміджевий ефект.

#### 8.4 Стратегічне планування виходу стартап-проекту на ринок

Одним із ключових етапів розвитку проекту є глибоке вивчення цільових груп потенційних споживачів, результати якого представлено в таблиці 8.14 [65].

Такий аналіз дає можливість не лише окреслити основні сегменти ринку, а й зрозуміти мотивацію та очікування кожної групи клієнтів, що дозволяє визначити найбільш значущі характеристики продукту для кожної з них.

Таблиця 8.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприймати продукт	Орієнтовний попит у межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
Студенти та викладачі технічних університетів (КПІ, ЛНТУ, ХПІ, ЛП)	Висока (безкоштовність, навчальна орієнтація)	Дуже високий (30–40 тис. користувачів)	Низька (відсутні українські аналоги)	Висока (безкоштовність, навчальна орієнтація)
Науково-дослідні лабораторії та кафедри ЗВО	Висока (можливість адаптації коду)	Середній (5–10 тис. користувачів)	Середня (наявність «DWSIM», «Aspen Plus»)	Висока (можливість адаптації коду)
Інженерно-конструкторські бюро та промислові підприємства	Середня (база для R&D-рішень)	Середній (2–5 тис. користувачів)	Висока (комерційні «Mathcad», «Matlab»)	Середня (база для R&D-рішень)

Для формування сильної репутації стартапу на початкових етапах доцільно зосередити зусилля на студентських та академічних сегментах, де

готовність до використання продукту найвища, а конкуренція мінімальна. Поступово рекомендується розширювати діяльність на науково-дослідні лабораторії та інженерно-конструкторські бюро.

Для реалізації цього підходу обрана стратегія концентрованого маркетингу. Для ефективної роботи у визначених сегментах необхідно розробити базову стратегію розвитку, наведено у таблиці 8.15.

Таблиця 8.15 – Визначення базової стратегії розвитку

Обрана альтернатива розвитку проєкту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Університетсько-грантова модель (освітній сектор)	Концентрований маркетинг	Безкоштовна ліцензія, українська локалізація, легка інтеграція з навчальними платформами	Лідерство за якістю та науковою достовірністю
Модель «Freemium» (розширення для промисловості)	Диференційований маркетинг	Гнучкі тарифи, Pго-модулі, підтримка бібліотек «Python»	Стратегія інноваційного розвитку

Наступним етапом є визначення стратегії поведінки на ринку щодо конкурентів, що відображено у таблиці 8.16.

Таблиця 8.16 – Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

Чи є проєкт «піонером» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурентів, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1	2	3	4
Так, у національному сегменті освіти (український open-source для інженерних розрахунків)	Орієнтація на нових споживачів (студенти, викладачі, ентузіасти «Python»)	Частково — запозичення зручних елементів UI з «DWSIM», «OpenModelica»	Інноваційна стратегія наступу — створення нового продукту з унікальною відкритою архітектурою

Продовження таблиці 8.16

1	2	3	4
У міжнародному контексті — ні (існують аналоги DWSIM, OpenModelica)	Збереження власної ніші через локалізацію й адаптацію під освітні програми	Використання спільних стандартів відкритих бібліотек Python	Стратегія нішевого позиціонування — фокус на національному освітньому ринку

Для формування стратегії позиціонування стартап-проєкту рекомендовано орієнтуватися на нових споживачів у національному освітньому сегменті, поступово зберігаючи власну нішу на міжнародному ринку. Для досягнення цього обрана інноваційна та нішева стратегія позиціонування.

Для ефективної реалізації стратегії визначено ключові напрямки дій, наведені у таблиці 8.17.

Таблиця 8.17 – Визначення стратегії позиціонування

Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проєкту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проєкту (три ключові)
Доступність і безкоштовність, проста інтеграція з навчальними платформами, українська та англійська локалізація, наукова достовірність методик	Стратегія лідерства за якістю та відкритістю	Відкритий код (Open Source), академічна ліцензія, модульна структура	«Open Source for Science» (наукова відкритість), «Ukrainian Engineering Software» (національний продукт), «Learn. Simulate. Innovate» (інноваційне навчання)

Створення доступного та науково достовірного програмного продукту з відкритим кодом і модульною структурою для національної освіти.

## 8.5 Розробка маркетингової стратегії стартап-проєкту

Перший етап маркетингової програми стартап-проєкту передбачає визначення концепції продукту, призначеного для цільових споживачів, що відображено в таблиці 8.18.

Таблиця 8.18 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або ті, що потрібно створити)
Виконання інженерних розрахунків без дорогого ПЗ	Безкоштовний, відкритий доступ, простота використання	Відкритий код, академічна ліцензія, україномовний інтерфейс
Підготовка студентів до роботи з цифровими інструментами	Візуальні розрахункові модулі, інтеграція з «Jupyter», «Colab»	Модульна архітектура, гнучкість та візуалізація процесів
Проведення лабораторних робіт і наукових досліджень	Висока точність методик (Дитнерський, Павлов), зміна параметрів	Достовірність, відкритість формул, перевіреність науковими джерелами
Інтеграція у навчальні курси	Просте підключення через API або CSV, відкриті приклади	Освітня адаптація, універсальність і легкість модифікації

Серед ключових переваг концепції потенційного продукту можна виділити: відкритий і безкоштовний доступ, простоту використання, модульну архітектуру з можливістю візуалізації процесів, наукову достовірність методик та легкість інтеграції у навчальні курси.

Наступним етапом є створення трирівневої маркетингової моделі продукту, яка включає опрацювання ідеї, фізичних характеристик та особливостей застосування програмного забезпечення, що відображено у таблиці 8.19 [66].

Таблиця 8.19 – Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові		
I. Послуга за задумом	Забезпечення доступного, швидкого та точного інструменту для моделювання хіміко-технологічних процесів (ректифікація, теплообмін) для навчання та науки, усунення бар'єрів доступу до інженерних розрахунків		
II. Послуга у реальному виконанні	Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
	Модульна архітектура на базі «Python» (інтеграція «NumPy», «SciPy», «CoolProp»)	Нм	Тх, Тл
	Повна українська локалізація інтерфейсу та методик,	Нм	Е
	Відкритий вихідний код («Open Source»)	Нм	Ор
	Кросплатформеність («Windows», «Linux» хмара).	Нм	Тх
Якість: висока точність, верифікована за методиками Дитнерського та Павлова; відповідність коду стандартам PEP8; стабільність роботи.			
Пакування: цифровий дистрибутив через репозиторій «GitHub», пакет «PyPI», контейнер «Docker» та онлайн-документацію.			
Марка: «OpenChemEngineering» (розробник: команда проекту / НТУУ «КП»)			
III. Послуга із підкріпленням	До продажу: Безкоштовний доступ до демо та коду Відео-уроки, документація, презентації.		
	Після продажу: Регулярні оновлення, виправлення помилок, Підтримка спільноти («Telegram» та «GitHub»).		

Розроблена трирівнева маркетингова модель товару дозволила чітко структурувати ціннісну пропозицію стартапу «OpenChemEngineering». Визначено, що ключовою цінністю продукту (товар за задумом) є забезпечення доступності інженерних розрахунків для освітніх та наукових цілей, що вирішує проблему високої вартості наявних аналогів.

У реальному виконанні продукт являє собою кросплатформне програмне забезпечення з відкритою архітектурою на базі Python та повною українською локалізацією, що є суттєвою конкурентною перевагою на національному ринку.

Важливим елементом стратегії є «товар із підкріпленням», який через систему навчальних матеріалів, документації та підтримку спільноти забезпечує легкий вхід для нових користувачів та формування лояльної аудиторії [55].

Така структура продукту повністю відповідає обраній стратегії концентрованого маркетингу та створює надійну основу для виходу на ринок.

Таблиця 8.20 – Визначення меж встановлення ціни

Рівень цін на товари-замінники	Рівень цін на товари-аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
«Mathcad», «Matlab», «Aspen Plus» (300–1500 \$/рік)	«DWSIM», «OpenModelica» (безкоштовні)	Середній (студенти, викладачі, інженери)	Нижня: 0 \$ (освітня версія); Верхня: 50–100 \$/рік (Pro-модулі, корпоративна ліцензія)

Наступний крок передбачає визначення ефективної системи збуту, що дозволяє обрати оптимальні канали реалізації та способи доставки продукту до споживачів, наведено у таблиці 8.21.

Таблиця 8.21 – Визначення меж встановлення ціни

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Студенти, викладачі, лабораторії (надають перевагу цифровим сервісам)	Онлайн-доступ, автоматичне оновлення, підтримка користувачів	Однорівнева	Власна система розповсюдження («GitHub», офіційний сайт, інтеграція з «Moodle»)
Промислові підприємства (орієнтація на технічну підтримку та стабільність)	Ліцензування, адаптація під корпоративні потреби, технічний супровід	Дворівнева	Через партнерські компанії або консультантів (інжинірингові фірми, університети)

Найбільш ефективним підходом для реалізації продукту є поєднання власної системи збуту для освітніх та наукових установ із партнерськими каналами для промислових підприємств.

Така модель дозволяє забезпечити прямий онлайн-доступ, підтримку користувачів та автоматичне оновлення для академічного сегменту, а також надійне ліцензування та технічний супровід для корпоративних клієнтів, що підвищує загальну ефективність і конкурентоспроможність стартап-проєкту.

Заключним етапом маркетингової програми є розробка концепції маркетингових комунікацій, наведена у таблиці 8.22, яка базується на позиціонуванні продукту та специфіці поведінки цільових споживачів [64].

Таблиця 8.22 – Формування системи збуту

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Студенти й викладачі (активно користуються онлайн-платформами)	«GitHub», «Telegram», «LinkedIn», конференції, «YouTube»	«Open Source for Science», «Learn. Simulate. Innovate.»	Популяризація open-source технологій для освіти, підвищення впізнаваності	«OpenChemEngineering — українська інженерна платформа нового покоління»
Інженери й науковці (шукають надійні та перевірені рішення)	«ResearchGate», «Google Scholar», технічні спільноти	«Ukrainian Engineering Software», «Verified by Science»	Підкреслити наукову достовірність і можливість застосування у R&D	«Моделювання процесів — перевірка гіпотез — вдосконалення технології»

У результаті розробки маркетингової програми буде сформована комплексна концепція комунікацій, що включає вибір каналів для цільових

аудиторій, ключові позиції для позиціонування та завдання рекламних повідомлень.

Програма базується на специфіці поведінки студентів, викладачів, інженерів та науковців, а також на конкурентних перевагах продукту, тенденціях ринку і стратегічних цілях стартап-проєкту. Маркетингова програма OpenChemEngineering базується на комбінації освітнього та комерційного підходів, де безкоштовне ядро використовується для популяризації, а платні модулі — для розвитку.

Система збуту орієнтована на онлайн-дистрибуцію та університетські партнерства, що мінімізує витрати, а комунікації мають цифровий, освітньо-науковий та репутаційний характер, спрямований на формування довіри до українських інженерних технологій. Результатом впровадження стане створення національної open-source екосистеми для розрахунків і моделювання процесів ПОХТ, сумісної з міжнародними стандартами Python Engineering Tools.

## 8.6 Висновки до розділу

Комплексний маркетинговий аналіз підтвердив високу ймовірність успішної комерціалізації стартап-проєкту «OpenChemEngineering» [52, 53].

Ринок EdTech характеризується стабільним зростанням, а відсутність прямих відкритих аналогів в Україні створює вільну ринкову нішу для впровадження національної програмної екосистеми.

Технологічний аудит довів здійсненність проєкту на базі екосистеми Python та класичних розрахункових методик. Модульна архітектура та відкритий код забезпечують гнучкість системи й низькі бар'єри входження в освітній сегмент. Проблему початкового фінансування планується вирішити через залучення грантових коштів.

Стратегія виходу на ринок базується на моделі концентрованого маркетингу з фокусом на технічні університети. Обрана бізнес-модель Freemium передбачає безкоштовний доступ для академічної спільноти та платні розширені можливості для промислових підприємств. Дистрибуція продукту здійснюватиметься через цифрові канали.

Підсумовуючи, стартап-проект «OpenChemEngineering» є економічно та технологічно доцільним до реалізації. Його впровадження сприятиме цифровізації інженерної освіти в Україні та підвищенню конкурентоспроможності вітчизняних фахівців [56]

## **Висновки**

У магістерській дисертації на тему «Модернізація азотно-кисневої установки з розробкою ректифікаційної колони та теплообмінника» спроектовано основне технологічне обладнання та запропоновано модернізацію трубного простору теплообмінника шляхом використання труб скрученого профілю. Це рішення забезпечує інтенсифікацію теплообміну завдяки турбулізації потоку, підвищення коефіцієнта теплопередачі, зниження гідравлічного опору та зменшення забруднення поверхонь.

У роботі проаналізовано технологічний процес низькотемпературної ректифікації, обґрунтовано вибір конструкційних матеріалів та проведено порівняльний аналіз техніко-економічних показників із наявними аналогами. Патентні дослідження підтвердили актуальність та перспективність прийнятих технічних рішень.

Працездатність та надійність запроєктованої конструкції підтверджено виконаними конструктивними, параметричними та перевірочними розрахунками на міцність та стійкість основних вузлів, зокрема з використанням програмного середовища Mathcad.

Розроблено систему автоматизації технологічного процесу, визначено заходи з охорони праці та надано рекомендації щодо монтажу й безпечної експлуатації обладнання. Економічну доцільність модернізації обґрунтовано в розділі стартап-проєкту.

Графічна частина проєкту представлена 13 аркушами форматів А1, А2 та А3, що включають технологічні схеми, складальні креслення апаратів та їхніх вузлів, а також плакати з результатами моделювання.

Результати роботи апробовано у трьох публікаціях на XXXVI та XXXVII Всеукраїнських науково-практичних конференціях студентів, аспірантів і молодих вчених.

## Conclusion

In the master's thesis on the topic "Modernization of the nitrogen-oxygen plant with the development of a rectification column and heat exchanger", the main technological equipment was designed, and a modernization of the heat exchanger tube space using twisted profile tubes (Twisted Tube) was proposed. This solution ensures heat transfer intensification due to flow turbulization, an increase in the heat transfer coefficient, a reduction in hydraulic resistance, and a decrease in surface fouling.

The technological process of low-temperature rectification was analyzed in the work, the choice of construction materials was substantiated, and a comparative analysis of technical and economic indicators with existing analogues was carried out. Patent research confirmed the relevance and prospects of the adopted technical decisions.

The operability and reliability of the designed structure were confirmed by constructive, parametric, and verification calculations for the strength and stability of the main units, particularly using the Mathcad software environment.

An automation system for the technological process was developed, labor protection measures were determined, and recommendations for installation and safe operation of the equipment were provided. The economic feasibility of the modernization is substantiated in the startup project section.

The graphic part of the project is presented by 13 sheets of formats A1, A2, and A3, including technological schemes, assembly drawings of the apparatuses and their units, as well as posters with modeling results.

The results of the work were tested in three publications at the XXXVI and XXXVII All-Ukrainian Scientific and Practical Conferences of students, postgraduates, and young scientists.

## Перелік посилань

1. Концевой А. Л. Технологія зв'язаного азоту: технологія та алгоритми розрахунків виробництва азоту, кисню і водню [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія». Електронні текстові дані (1 файл: 5,55 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 196 с.
2. Корнієнко Я. М., Гайдай С. С. Процеси та обладнання хімічної технології – 3. Масообмінні процеси. Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для здобувачів ступеня бакалавра. Електронні текстові дані (1 файл: 9,93 МБ). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 255 с.
3. Щербина В. Ю., Степанюк А. Р. Кожухотрубні теплообмінники. Конструкторське проектування обладнання. Рекомендації до виконання курсового проекту [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студентів, які навчаються за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування». Електронні текстові дані (1 файл: 15,28 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 117 с.
4. Колонні апарати [Електронний ресурс] : навч. посіб. / уклад. І. А. Андреев. Електронні текстові дані (1 файл: 3,16 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. 74 с.
5. Methylamine distillation equipment and separation purification component : pat. 119971537 A China : IPC B01D 3/14, B01D 3/32. № 202510466128.5 ; filed 15.04.2025 ; publ. 13.05.2025. 14 p.
6. Tower plate structure for distillation tower : pat. 223516961 U China : IPC B01D 3/24. № 202423127708.1 ; filed 18.12.2024 ; publ. 07.11.2025. 7 p.
7. Mechanical device for chemical distillation : pat. 120733373 A China : IPC B01D 3/14, B01D 3/32. № 202511154556.0 ; filed 18.08.2025 ; publ. 03.10.2025. 17 p.

8. Anti-blocking component for chemical distillation tower : pat. 120884913 A China : IPC B01D 3/32, B01D 3/00. № 202511204078.X ; filed 27.08.2025 ; publ. 04.11.2025. 16 p.

9. High and low pressure dual-purpose distillation tower plate structure : pat. 120919667 A China : IPC B01D 3/32, B01D 3/14. № 202511463469.3 ; filed 14.10.2025 ; publ. 11.11.2025. 18 p.

10. Troidal shell-and-tube heat exchanger with anti-blocking function : pat. 120926778 A China : IPC F28D 7/16, F28F 19/01. № 202511214736.3 ; filed 28.08.2025 ; publ. 11.11.2025. 18 p.

11. Device for improving disproportionation reaction efficiency : pat. 120961110 A China : IPC B01J 19/24, B01J 19/00. № 202511215765.1 ; filed 28.08.2025 ; publ. 18.11.2025. 18 p.

12. Shell-and-tube heat exchanger and refrigeration unit : pat. 120252390 A China : IPC F28D 7/16, F28F 9/24. № 202510672866.5 ; filed 23.05.2025 ; publ. 04.07.2025. 14 p.

13. Shell-and-tube heat exchanger that is easy to maintain : pat. 120538348 A China : IPC F28D 7/16, F28G 15/04. № 202510822747.3 ; filed 19.06.2025 ; publ. 26.08.2025. 19 p.

14. Titanium-steel composite tube sheet for LNG vaporizer device : pat. 223447983 U China : IPC F16L 57/02, F16L 58/10. № 202423205479.0 ; filed 25.12.2024 ; publ. 17.10.2025. 5 p.

15. Андреев І. А. Конструювання і розрахунків кожухотрубних теплообмінників [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». Електронні текстові дані (1 файл: 5,28 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 140 с.

16. Коган В. Б., Фридман В. М., Кафаров В. В. Равновесие между жидкостью и паром : в 2 т. Москва : Наука, 1976. 1426 с.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 176
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

17. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. Москва : Химия, 1991. 496 с.

18. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва : Химия, 1973. 780 с.

19. Павлов К. Ф., Романков П. Г., Носков А. А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие для вузов. Москва : Альянс, 2007. 576 с.

20. Розрахунок і конструювання типового обладнання – 1. Розрахунок і конструювання тонкостінних посудин, опор та стропових пристроїв [Електронний ресурс] : метод. вказівки / уклад. І. А. Андреев. Київ : НТУУ „КПІ ім. Ігоря Сікорського”, 2017. 105 с.

21. Андреев І. А. Розрахунок колонних апаратів на міцність і стійкість [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». Електронні текстові дані (1 файл: 4,53 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 112 с.

22. Андреев І. А. Розрахунок та конструювання основних елементів посудин та апаратів: вимоги до розрахунково-графічної роботи [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». Електронні текстові дані (1 файл: 2,5 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 97 с.

23. Андреев І. А. Укріплення отворів в посудинах та апаратах [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування». Електронні текстові дані (1 файл: 3,1 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 72 с.

24. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. 3-е изд. Москва : ООО "Старс", 2006. 720 с.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 177
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

25. Рид Р., Праусниц Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей : справ. пособие. Ленинград : Химия, 1982. 592 с.

26. Филиппов В. В. Теплообмен в химической технологии : учеб. пособие. Самара : СГТУ, 2014. 197 с.

27. Методичні вказівки до виконання розділу «Охорона праці» в дипломних проектах : навч. посіб. / уклад.: Ю. О. Полукаров, Н. А. Праховнік та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 28 с.

28. Про охорону праці : Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ.

29. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. Київ : МОЗ України, 1999.

30. ДСТУ-Н Б А.3.2-1:2007. Настанова щодо визначення небезпечних і шкідливих факторів та захисту від їх впливу при виробництві будівельних матеріалів і виробів. Київ : Мінрегіонбуд України, 2008.

31. ПУЕ:2017. Правила улаштування електроустановок. Харків : Форт, 2017. 617 с.

32. ДСТУ EN 60529:2018. Ступені захисту, що забезпечуються кожухами (Код IP) (EN 60529:1991; A1:2000; A2:2013, IDT; IEC 60529:1989; A1:1999; A2:2013, IDT).

33. ДНАОП 1.1.10-1.07-01. Правила експлуатації електрозахисних засобів. Затверджено наказом Мінпраці України від 05.06.2001 № 253.

34. ДСТУ Б В.2.5-82:2016. Електробезпека в будівлях і спорудах. Вимоги до захисного заземлення та зрівнювання потенціалів. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2016.

35. ДСТУ EN ISO 12100:2016. Безпечність машин. Загальні принципи проектування. Оцінювання ризиків та зменшення ризиків (EN ISO 12100:2010, IDT; ISO 12100:2010, IDT).

36. НПАОП 0.00-1.65-88. Правила безпеки при виробництві та споживанні продуктів розділення повітря.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 178
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

37. НПАОП 45.2-1.09-81 (НАОП 1.1.10-1.09-81). Правила техніки безпеки при виконанні теплоізоляційних, обмурувальних та антикорозійних робіт.

38. ГОСТ 12.2.062-81. ССБТ. Оборудование производственное. Ограждения защитные.

39. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

40. ДСН 3.3.6.039-99. Державні санітарні норми виробничої загальної та локальної вібрації.

41. ДСТУ EN ISO 20345:2016. Засоби індивідуального захисту. Взуття безпечне (EN ISO 20345:2011, IDT; ISO 20345:2011, IDT).

42. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ : Мінрегіонбуд України, 2018.

43. ДСТУ 7115:2009 (ІЕС 60079-14:2007). Вибухонебезпечні середовища. Частина 14. Проектування, вибір та монтаж електроустановок.

44. ДСТУ Б В.1.1-36:2016. Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою.

45. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги.

46. ДБН В.2.5-56:2014. Системи протипожежного захисту.

47. Мікульонок І. О. Виготовлення, монтаж та експлуатація обладнання хімічних виробництв [Електронний ресурс] : підручник. Електронні текстові дані (1 файл: 12,1 Мбайт). Київ : НТУУ «КПІ», 2012.

48. НПАОП 0.00-1.81-18. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском. Затверджено наказом Мінсоцполітики від 05.03.2018 № 333.

49. РД 50-33-80. Методичні вказівки. Визначення рівня уніфікації та стандартизації виробів.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 179
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

50. Ao M. K., Promtep P., Roddy K., Edison J. Python based demonstration for designing distillation columns for ternary mixtures [Electronic resource] // ASEE Peer. URL: <https://peer.asee.org/python-based-demonstration-for-designing-distillation-columns-for-ternary-mixtures.pdf> (дата звернення: 27.11.2025).

51. Marathe P. McCabe-Thiele method in Python [Electronic resource] // Medium. URL: <https://medium.com/@pukumarathe/mccabe-thiele-method-in-python-791e5760b6b1> (дата звернення: 27.11.2025).

52. A1pat. Distillation: Data Science and Machine Learning using a distillation column simulator [Electronic resource] // GitHub. URL: <https://github.com/a1pat/Distillation> (дата звернення: 27.11.2025).

53. Dayakaran. Extractive Distillation Simulation [Electronic resource] // GitHub. URL: [https://github.com/dayakaran/Ext\\_Distill\\_Sim](https://github.com/dayakaran/Ext_Distill_Sim) (дата звернення: 27.11.2025).

54. Kdavid. Rectification project: Автоматический расчёт ректификационной колонны и подбор теплообменников [Electronic resource] // GitHub. URL: [https://github.com/kdavid/rectification\\_project](https://github.com/kdavid/rectification_project) (дата звернення: 27.11.2025).

55. Маркетинг стартап-проектів : навч. посіб. для усіх спец. другого освіт. ступеню «магістр» / С. О. Солнцев та ін. ; за заг. ред. С. О. Солнцева. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 218 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/27437>.

56. Semeniuk S. [et al.] Overcoming barriers to digitalization of small and medium-sized enterprises under martial law // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Vol. 3, № 13 (129). P. 57–69. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.304997.

57. Yudina N. V. Methods of the Startup-Project Developing Based on ‘the Four-Dimensional Thinking’ in Information Society // Marketing and Management of innovations. 2017. № 3. P. 245–256. DOI: 10.21272/mmi.2017.3-23.

ЛМ41мн.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 180
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

58. Yudina N. Future Study Implementation Into Marketing Activity Of Companies // Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". 2021. № 19. P. 1–9.

59. Yudina N. Business Forecasting of Marketing Activity Riskiness of Companies in Markets // Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute". 2020. № 17. P. 372–383.

60. Yudina N. Economic “Butterfly” and Futurology of the War in Ukraine // Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". 2022. № 23. P. 77–82. DOI: 10.20535/2307-5651.23.2022.264637.

61. Розроблення стартап-проекту : метод. рек. до виконання розділу магістер. дисертацій для студ. інженер. спец. / за заг. ред. О. А. Гавриша. Київ : НТУУ «КПІ», 2016. 28 с.

62. Yudina N. Instrumenty Zarządzania Przyszłością // Marketing Instytucji Naukowych i Badawczych. 2020. Vol. 38, issue 4. P. 1–19. DOI: 10.2478/minib-2020-0027.

63. Yudina N. Algorithm of Marketing Decision Making // Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". 2022. № 22. P. 1–9. DOI: 10.20535/2307-5651.22.2022.260163.

64. Yudina N., Pidlisna O. Marketing Perception Of Technological Uncertainty By Decision-Makers // Economic Bulletin of National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute". 2021. № 18. P. 1–10. DOI: 10.20535/2307-5651.18.2021.238105.

65. Перерва П. Г., Коциски Д., Сакай Д., Верешне Шомоши М. Трансфер технологій : монографія. Харків : Віровець А. П. «Апостроф», 2012. 668 с.

ЛМ41мп.066211.001.ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова	Аркуш 181
----------------------	---------------	-----------------	------	--------------

66. Царьова Т. О. Оцінювання конкурентоспроможності технології: п'ятирівнева модель технології як товару // Бізнес-Інформ. 2014. № 6 (437). С. 413–418.

## Додаток А Автоматизація технологічного процесу азотно-кисневої установки

Автоматизація технологічних процесів є ключовим напрямом розвитку сучасної кріогенної техніки, оскільки саме вона забезпечує стабільність роботи обладнання, високу чистоту отриманих продуктів та раціональне використання енергетичних ресурсів. В азотно-кисневих установках процеси стискання, охолодження, зрідження повітря та ректифікації є взаємопов'язаними й надзвичайно чутливими до коливань тиску, температури та витрат, що зумовлює необхідність застосування надійних автоматизованих систем керування.

Застосування сучасних мікропроцесорних засобів дає змогу в режимі реального часу здійснювати контроль параметрів у ректифікаційній колоні та теплообміннику, оперативно реагувати на відхилення та підтримувати оптимальні режими роботи установки.

Метою даного розділу є висвітлення основних принципів контролю й керування, що застосовуються при модернізації азотно-кисневої установки, з акцентом на засобах вимірювання, обробці сигналів і системах автоматичного регулювання.

Схема автоматизації азотно-кисневої установки зображена на рисунку А.1.

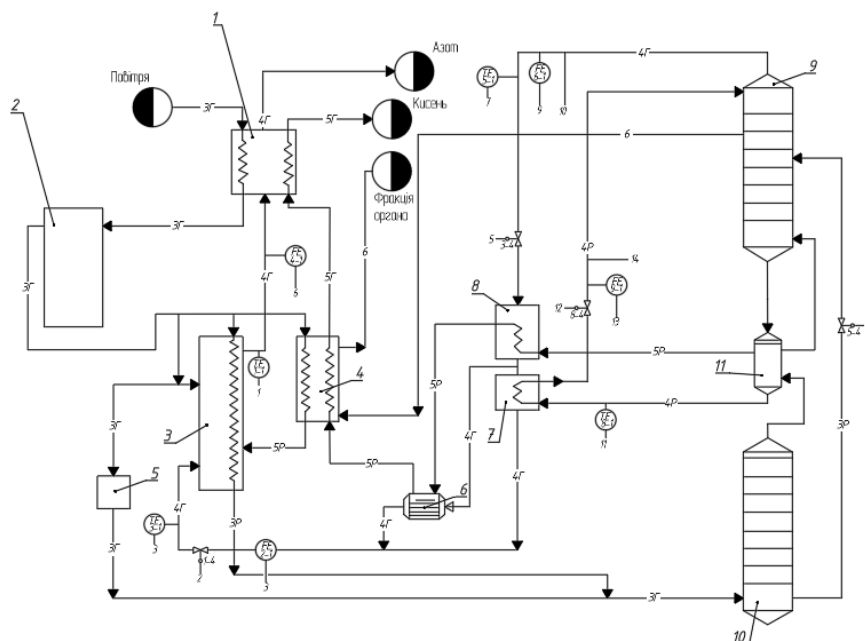


Рисунок А.1 – Схема автоматизації азотно-кисневої установки

## Аналіз технологічного процесу як об'єкта автоматизації

### **Система автоматичного контролю і сигналізації**

Схема автоматичного контролю включає ряд контурів для моніторингу витрат і тиску в ключових точках установки.

Контур 2 забезпечує контроль витрати азоту на вході в теплообмінник та включає: електромагнітний витратомір RKMAG (2-1); індикатор технологічний мікропроцесорний ITM-11(B) (2-2); лампи сигнальні світлодіодні ЛС-47М (HL1, HL2).

Контур 4 забезпечує контроль витрати азоту на виході з теплообмінника та включає: електромагнітний витратомір RKMAG (4-1); індикатор технологічний мікропроцесорний ITM-11(B) (4-2); лампи сигнальні світлодіодні ЛС-47М (HL3, HL4).

Контур 6 забезпечує контроль витрати азоту на виході з ректифікаційної колони та включає: електромагнітний витратомір RKMAG (6-1); індикатор технологічний мікропроцесорний ITM-11(B) (6-2); лампи сигнальні світлодіодні ЛС-47М (HL5, HL6).

Контур 7 забезпечує контроль тиску азоту на виході з ректифікаційної колони та включає: датчик надлишкового тиску СА ФІР ДІ (7-1); перетворювач тензометричний надлишкового тиску Сапфир-22ДИ (7-2); лампи сигнальні світлодіодні ЛС-47М (HL7, HL8).

Контур 9 забезпечує контроль витрати рідкого азоту з переохолоджувача та включає: електромагнітний витратомір RKMAG (9-1); індикатор технологічний мікропроцесорний ITM-11(B) (9-2); лампи сигнальні світлодіодні ЛС-47М (HL9, HL10).

Контур 10 забезпечує контроль тиску рідкого азоту з переохолоджувача та включає: датчик надлишкового тиску СА ФІР ДІ (10-1); перетворювач тензометричний надлишкового тиску Сапфир-22ДИ (10-2); лампи сигнальні світлодіодні ЛС-47М (HL11, HL12).

## **Система автоматичного регулювання**

Система автоматичного регулювання призначена для підтримки заданих температурних режимів.

Контур 1 забезпечує контроль та регулювання температури азоту на виході з теплообмінника та включає: термоелектричний перетворювач ТХА-1-3Н (1-1); мікропроцесорний ПІД-регулятор МІК-111 (1-2); блок ручного керування аналоговий БРУ-17 (1-3); механізм виконавчий електродвигунний WCB (1-4).

Контур 3 забезпечує контроль та регулювання температури азоту на вході в теплообмінник та включає: термоелектричний перетворювач ТХА-1-3Н (3-1); мікропроцесорний ПІД-регулятор МІК-111 (3-2); блок ручного керування аналоговий БРУ-17 (3-3); механізм виконавчий електродвигунний WCB (3-4).

Контур 5 забезпечує контроль та регулювання температури азоту на виході з ректифікаційної колони та включає: термоелектричний перетворювач ТХА-1-3Н (5-1); мікропроцесорний ПІД-регулятор МІК-111 (5-2); блок ручного керування аналоговий БРУ-17 (5-3); механізм виконавчий електродвигунний WCB (5-4).

Контур 8 забезпечує контроль та регулювання температури рідкого азоту з переохолоджувача та включає: термоелектричний перетворювач ТХА-1-3Н (8-1); мікропроцесорний ПІД-регулятор МІК-111 (8-2); блок ручного керування аналоговий БРУ-17 (8-3); механізм виконавчий електродвигунний WCB (8-4).

Специфікація на технологічні засоби автоматизації наведена в таблиці А.1.

## **Висновки**

Завдяки вдалій автоматизації розроблених апаратів, участь людини у керуванні процесом зведена до мінімуму. Оператор здійснює моніторинг температури, тиску та витрат за допомогою пульта керування, а автоматична система забезпечує стабілізацію параметрів.

Таблиця А.1 – Специфікація на технологічні засоби автоматизації технологічного процесу

Позиція на схемі	Технологічний параметр	Середовище і місце відбору інформації	Граничне значення параметра	Місце монтажу	Назва та характеристика	Тип моделі	Кількість	Завод-виробник
1	2	3	4	5	6	7	8	
1-1	Температура	Трубопровід	87,5 °С	Трубопровід	Термоелектричний перетворювач ТХА-9311 (тип К, хромель-алюмель) для вимірювання температур, робочий діапазон -40...400 °С	ТХА-1-3Н	1	ЧАО «Тера», м. Чернігів
1-2	-	-	-	Пульт керування	Мікропроцесорний ПІД-регулятор – вимірювання, контроль та автоматичне регулювання одного технологічного параметра від будь-якого типу датчика з уніфікованими сигналами, термоперетворювачів опору та термопар.	МІК-111	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ
1-3	-	-	-	Пульт керування	Блок ручного керування аналоговий; аналоговий вхід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В; аналоговий вихід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В.	БРУ-17	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
1-4	-	Трубопровід	-	Трубопровід	Механізм виконавчий електродвигунний однообертовий, робоче джерело живлення: 24 В постійного струму, 220 В змінного струму, 380 В змінного струму, 16 – номінальний обертовий момент на вихідному валу, Н·м; номінальний тиск: 1,6...25 МПа, потужність валу: 60Вт; температура регульованого середовища:	WCB	1	Tianjin Freya Automation Technology Co, Ltd. ок. Сіцин у Тяньцзіні, Китай
2-1	Витрата	Трубопровід	3,2 кг/с	Трубопровід	Електромагнітний витратомір; матеріал електродів – хастеллой, $D_{тр} = 50...300$ мм; температура вимірюваного середовища (-10)...80 °С, максимальна швидкість потоку 10м/с; основна похибка $\pm 0,5$ %; $I_{вих} = 4...20$ мА	RKMAG	1	LTH Electronics, м. Бердфордшир, Великобританія
2-2	-	-	-	Пульт керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; вхідні сигнали: 0...75 мВ, 0...200 мВ, 0...2 В, 0...10 В, 0...5 мА, 4...20 мА	ITM-11(B)	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
2-3	-	-	-	Щит керування	Блок ручного керування аналоговий; аналоговий вхід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В; аналоговий вихід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В.	БРУ-17	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ
3-1	Температура	Трубопровід	93,5 °С	Трубопровід	Термоелектричний перетворювач ТХА-9311 (тип К, хромель-алюмель) для вимірювання температур, робочий діапазон -40...400 °С	ТХА-1-3Н	1	ЧАО «Тера», м. Чернігів
3-2	-	-	-	Пульт керування	Мікропроцесорний ПІД-регулятор – вимірювання, контроль та автоматичне регулювання одного технологічного параметра від будь-якого типу датчика з уніфікованими сигналами, термоперетворювачів опору та термопар.	МІК-111	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ
3-3	-	-	-	Пульт керування	Блок ручного керування аналоговий; аналоговий вхід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В; аналоговий вихід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В.	БРУ-17	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3-4	-	Трубопровід	-	Трубопровід	Механізм виконавчий електродвигунний однообертовий, робоче джерело живлення: 24 В постійного струму, 220 В змінного струму, 380 В змінного струму, 16 – номінальний обертовий момент на вихідному валу, Н·м; номінальний тиск: 1,6...25 МПа, потужність валу: 60Вт; температура регульованого середовища:	WCB	1	Tianjin Freya Automation Technology Co, Ltd. ок. Сіцин у Тяньцзіні, Китай
4-1	Витрата	Трубопровід	3,2 кг/с	Трубопровід	Електромагнітний витратомір; матеріал електродів – хастеллой, $D_{тр} = 50...300$ мм; температура вимірюваного середовища (-10)...80 °С, максимальна швидкість потоку 10м/с; основна похибка $\pm 0,5$ %; $I_{вих} = 4...20$ мА	RKMAG	1	LTH Electronics, м. Бердфордшир, Великобританія

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4-2		-	-	Пульт керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; вхідні сигнали: 0...75 мВ, 0...200 мВ, 0...2 В, 0...10 В, 0...5 мА, 4...20 мА	ІТМ-11(В)	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ
4-3		-	-	Щит керування	Блок ручного керування аналоговий; аналоговий вхід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В; аналоговий вихід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В.	БРУ-17	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ
5-1	Температура	Трубопровід	100 °С	Трубопровід	Термоелектричний перетворювач ТХА-9311 (тип К, хромель-алюмель) для вимірювання температур, робочий діапазон -40...400 °С	ТХА-1-3Н	1	ЧАО «Тера», м. Чернігів
5-2	-	-	-	Пульт керування	Мікропроцесорний ПІД-регулятор – вимірювання, контроль та автоматичне регулювання одного технологічного параметра від будь-якого типу датчика з уніфікованими сигналами, термоперетворювачів опору та термопар.	МІК-111	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
5-3	-	-	-	Пульт керування	Блок ручного керування аналоговий; аналоговий вхід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В; аналоговий вихід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В.	БРУ-17	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ
5-4	-	Трубопровід	-	Трубопровід	Механізм виконавчий електродвигунний однообертовий, робоче джерело живлення: 24 В постійного струму, 220 В змінного струму, 380 В змінного струму, 16 – номінальний обертовий момент на вихідному валу, Н·м; номінальний тиск: 1,6...25 МПа, потужність валу: 60Вт; температура регульованого середовища:	WCB	1	Tianjin Freya Automation Technology Co, Ltd. ок. Сіцин у Тяньцзіні, Китай
6-1	Витрата	Трубопровід	0,33 кг/с	Трубопровід	Електромагнітний витратомір; матеріал електродів – хастеллой, $D_{тр} = 50...300$ мм; температура вимірюваного середовища (-10)...80 °С, максимальна швидкість потоку 10м/с; основна похибка $\pm 0,5$ %; $I_{вих} = 4...20$ мА	RKMAG	1	LTH Electronics, м. Бердфордшир, Великобританія

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6-2		-	-	Пульт керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; вхідні сигнали: 0...75 мВ, 0...200 мВ, 0...2 В, 0...10 В, 0...5 мА, 4...20 мА	ІТМ-11(В)	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ
6-3		-	-	Щит керування	Блок ручного керування аналоговий; аналоговий вхід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В; аналоговий вихід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В.	БРУ-17	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ
7-1	Тиск	Трубопровід	0,6 МПа	Трубопровід	Датчик надлишкового тиску, $P_{max} = 1$ МПа, температура 5...50 °С, матеріал мембрани – сплав 36НХТЮ, клас точності 0,25; $I_{вих} = 0...5$ мА.	САФІР ДІ, мод. 5110	1	ЗАТ «Манометр», м. Харків
7-2	Тиск	-	-	Пульт керування	Перетворювач тензометричний надлишкового тиску, границя вимірювання 16 МПа, клас точності 0,5; $I_{вих} = 4...20$ мА.	Сапфир – 22Д И 2130	1	ЗАТ «Манометр», м. Харків
8-1	Температура	Трубопровід	100 °С	Трубопровід	Термоелектричний перетворювач ТХА-9311 (тип К, хромель-алюмель) для вимірювання температур, робочий діапазон -40...400 °С	ТХА-1-3Н	1	ЧАО «Тера», м. Чернігів

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8-2	-	-	-	Пульт керування	Мікропроцесорний ПІД-регулятор – вимірювання, контроль та автоматичне регулювання одного технологічного параметра від будь-якого типу датчика з уніфікованими сигналами, термоперетворювачів опору та термопар.	МК-111	1	ВАТ «Підприємство “МІКРОЛ”», м. Івано-Франківськ
8-3	-	-	-	Пульт керування	Блок ручного керування аналоговий; аналоговий вхід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В; аналоговий вихід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В.	БРУ-17	1	ВАТ «Підприємство “МІКРОЛ”», м. Івано-Франківськ
8-4	-	Трубопровід	-	Трубопровід	Механізм виконавчий електродвигунний однообертовий, робоче джерело живлення: 24 В постійного струму, 220 В змінного струму, 380 В змінного струму, 16 – номінальний обертовий момент на вихідному валу, Н·м; номінальний тиск: 1,6...25 МПа, потужність валу: 60Вт; температура регульованого середовища:	WCB	1	Tianjin Freya Automation Technology Co, Ltd. ок. Сіцин у Тяньцзіні, Китай

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
9-1	Витрата	Трубопровід	0,8 кг/с	Трубопровід	Електромагнітний витратомір; матеріал електродів – хастеллой, $D_{тр} = 50...300$ мм; температура вимірюваного середовища $(-10)...80$ °С, максимальна швидкість потоку 10м/с; основна похибка $\pm 0,5$ %; $I_{вих} = 4...20$ мА	RKMAG	1	LTH Electronics, м. Бердфордшир, Великобританія
9-2		-	-	Пульт керування	Індикатор технологічний мікропроцесорний одноканальний; вхідні сигнали: 0...75 мВ, 0...200 мВ, 0...2 В, 0...10 В, 0...5 мА, 4...20 мА	ІТМ-11(В)	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ
9-3		-	-	Щит керування	Блок ручного керування аналоговий; аналоговий вхід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В; аналоговий вихід: 0...5 мА; 0(4)...20 мА ; 0...10 В.	БРУ-17	1	ВАТ «Підприємство «МІКРОЛ»», м. Івано-Франківськ
10-1	Тиск	Трубопровід	0,6 МПа	Трубопровід	Датчик надлишкового тиску, $P_{max} = 1$ МПа, температура 5...50 °С, матеріал мембрани – сплав 36НХТЮ, клас точності 0,25; $I_{вих} = 0...5$ мА.	САФІР ДІ, мод. 5110	1	ЗАТ «Манометр», м. Харків

Продовження таблиці А.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
10-2	Тиск	-	-	Пульт керування	Перетворювач тензOMETричний надлишкового тиску, границя вимірювання 16 МПа, клас точності 0,5; $I_{вих} = 4 \dots 20$ мА.	Сапфир – 22Д И 2130	1	ЗАТ «Манометр», м. Харків
HL1, HL2, HL3, HL4, HL7, HL8, HL9, HL10, HL11, HL12.	-	-	-	Пульт керування	Лампа сигнальна світлодіодна ( <i>LED</i> ) з жовтим індикатором (матриця), $W_{max} = 0,01$ Вт, $U_{ном} = 230$ В, 50 Гц, монтажна глибина ніші: 72,5 мм.	ЛС-47М	2 0	ІЕК Україна, м. Вишневе Київська обл.

## Додаток Б Документація до патентного дослідження

### Довідка про пошук № ЛМ41мп.РП

Завдання на проведення патентних досліджень ЛМ41.066231.000, 27.09.2025  
(номер, дата)

Етап Проектування апарата та його складових частин.

Номер, дата регламенту пошуку ЛМ41мп.1.РП, 29.11.2025.

Початок пошуку 27.09.2021 Закінчення пошуку 29.11.2025

Для визначення області та глибини пошуку було розроблено регламент, оформлений відповідно до вимог ДСТУ 3575-97 (форма Б.1). Повний регламент пошуку наведено в Таблиці Б.1.

Таблиця Б.1 – Регламент пошуку (форма Б.1 згідно ДСТУ 3575-97)

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Мета пошуку інформації	Держава пошуку	Класифікаційні індекси МПК, НПК, МКПЗ, МКТП, УДК	Ретроспективність пошуку	Джерела інформації
Ректифікаційна колона, теплообмінник	Визначення патентоздатності проєктованого апарата й тенденцій розвитку цього напрямку в техніці	Кита, США, Україна, ЄС	B01D 3/14; B01D 3/32; B01D 3/42; F28D 7/16; F28F 9/24.	2024-2025 рр.	Бази даних патентних відомств CNIPA, WIPO, Укрпатент

Джерела інформації, які були використані під час проведення пошуку наведені в таблиці Б.2.

Таблиця Б.2. – Джерела інформації, які використані під час патентного пошуку

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Інформаційна база, використана під час пошуку	Бібліографічні данні першого та останнього за хронологією джерела інформації	
				Патентна інформація	Інше
Ректифікаційна колона, теплообмінник	Китай, світ	B01D 3/14; B01D 3/32; B01D 3/42; F28D 7/16; F28F 9/24.	Національне управління інтелектуальної власності Китаю (CNIPA).	CN 119971537 A CN 120252390 A CN 120538348 A CN 120733373 A CN 120884913 A CN 120919667 A CN 120926778 A CN 120961110 A CN 223447983 U CN 223516961 U	—

У результаті проведення патентного пошуку для подальшого аналізу відібрано патентні документи, перелік яких наведено в Таблиці Б.3

Таблиця Б.3 – Патентна документація, відібрана для подальшого аналізу

ОГД, його складові частини	Документи на об'єкти промислової власності	
	Бібліографічні дані	Відомості щодо їхньої дії
Ректифікаційна колона (обладнання)	Patent CN 119971537 A, Pub. date 13.05.2025	Діє
Тарілка ректифікаційної колони	Patent CN 223516961 U, Pub. date 07.11.2025	Діє
Обладнання для хімічної дистиляції	Patent CN 120733373 A, Pub. date 03.10.2025	Діє
Компонент захисту від блокування колони	Patent CN 120884913 A, Pub. date 04.11.2025	Діє
Тарілка колони високого/низького тиску	Patent CN 120919667 A, Pub. date 11.11.2025	Діє
Кільцевий кожухотрубний теплообмінник	Patent CN 120926778 A, Pub. date 11.11.2025	Діє
Пристрій для підвищення ефективності реакції теплообміну	Patent CN 120961110 A, Pub. date 18.11.2025	Діє
Кожухотрубний теплообмінник та холодильна установка	Patent CN 120252390 A, Pub. date 04.07.2025	Діє
Легкообслуговуваний кожухотрубний теплообмінник	Patent CN 120538348 A, Pub. date 26.08.2025	Діє
Титано-сталева композитна трубна решітка	Patent CN 223447983 U, Pub. date 17.10.2025	Діє

Аналіз новизни, винахідницького рівня та промислової придатності проєктованого об'єкта наведено в таблиці Б.4.

Таблиця Б.4 – Аналіз відповідності об'єкта критеріям патентоздатності

ОГД, його складові частини		Найближчий аналог		Очікуваний результат	Можливості використання у промисловості або іншій сфері діяльності	Номер патенту, дата публікації
Назва	Сукупність ознак	Бібліографічні дані	Сукупність ознак			
1	2	3	4	5	6	7
Компонент захисту від блокування хімічної ректифікаційної колони	Механічні штовхачі, що входять в отвори; автовиведення шлаку.	Дытнерский Ю.И. Процессы и аппараты химической технологии. Ч.2. М.: Химия, 1995.	Тарілки з фіксованими отворами без системи очищення.	Запобігання забиванню отворів тарілок.	Хімічна промисловість (забруднені середовища)	CN 120884913 A, 04.11.2025

Продовження таблиці Б.4

1	2	3	4	5	6	7
Кільцевий кожухотрубний теплообмінник з функцією захисту від блокування	Кільцева форма кожуха, дугоподібні решітки, плавний вхід.	Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты хим. технологии. М.: Химия, 1971.	Прямолінійний кожух, плоскі трубні решітки.	Зниження гідравлічного опору потоку.	Хімічна промисловість	CN 120926778 A, 11.11.2025
Легкообслуговуваний кожухотрубний теплообмінник	Рухомі скребки всередині труб під дією потоку.	Щербина В. Ю., Степанюк А. Р. Кожухотрубні теплообмінники. Конструкторське проектування обладнання... Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024	Необхідність зупинки для ручного чищення.	Автоматичне очищення труб без зупинки.	Нафтопереробна промисловість	CN 120538348 A, 26.08.2025
Титано-сталева композитна трубна решітка для пристрою випарника	Титано-сталевий композит з ребрами жорсткості.	Щербина В. Ю., Степанюк А. Р. Кожухотрубні теплообмінники. Конструкторське проектування обладнання... Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024	Суцільна металева конструкція (сталь).	Підвищена стійкість до корозії та ударів.	Кріогенна техніка	CN 223447983 U, 17.10.2025
Обладнання для ректифікації метиламіну та компонент розділення і очищення, процес очищення	Регулювання відстані між тарілками, моніторинг протікань.	Андреев І.А. Колонні апарати. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.	Фіксована геометрична відстань між тарілками.	Адаптація гідродинаміки під навантаження.	Хімічна промисловість	CN 119971537 A, 13.05.2025
Тарілчаста структура для ректифікаційної колони	Розбірна конструкція з сегментів, спрощений доступ.	Андреев І.А. Колонні апарати. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.	Цілісна зварна конструкція тарілки.	Спрощення монтажу та ремонту всередині.	Хімічна промисловість	CN 223516961 U, 07.11.2025
Механічне обладнання для хімічної дистиляції	Плаваючі блоки з шипами, використання енергії кипіння.	Андреев І.А. Колонні апарати. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.	Пасивний барботаж пари крізь рідину.	Інтенсивне розбивання плівки рідини.	Хімічна промисловість	CN 120733373 A, 03.10.2025

Продовження таблиці Б.4

1	2	3	4	5	6	7
Конструкція тарілки ректифікаційної колони подвійного призначення високого та низького тиску	Змінна геометрії для режимів високого та низького тиску.	Андреев І.А. Колонні апарати. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025.	Конструкція, оптимізована під один тиск.	Універсальність для різних режимів роботи.	Хімічна промисловість	CN 120919667 А, 11.11.2025
Пристрій для підвищення ефективності реакції диспропорціонування	Вигнуті перегородки і змішування, подвійне піногасіння.	Щербина В.Ю., Степанюк А.Р. Кожухотрубні теплообмінники. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.	Стандартний обігрів, ризик утворення піни.	Ефективне змішування та піногасіння.	Хімічна промисловість	CN 120961110 А, 18.11.2025
Кожухотрубний теплообмінник та холодильна установка	Вбудовані дефлектори для вирівнювання швидкостей.	Щербина В.Ю., Степанюк А.Р. Кожухотрубні теплообмінники. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024.	Нерівномірний розподіл потоку по трубах.	Стабілізація потоку та температури.	Хімічна промисловість	CN 120252390 А, 04.07.2025

## Додаток В Комп'ютерні розрахунки

Блок-схема розрахунку колонного апарата на міцність наведена на рисунку

В.1

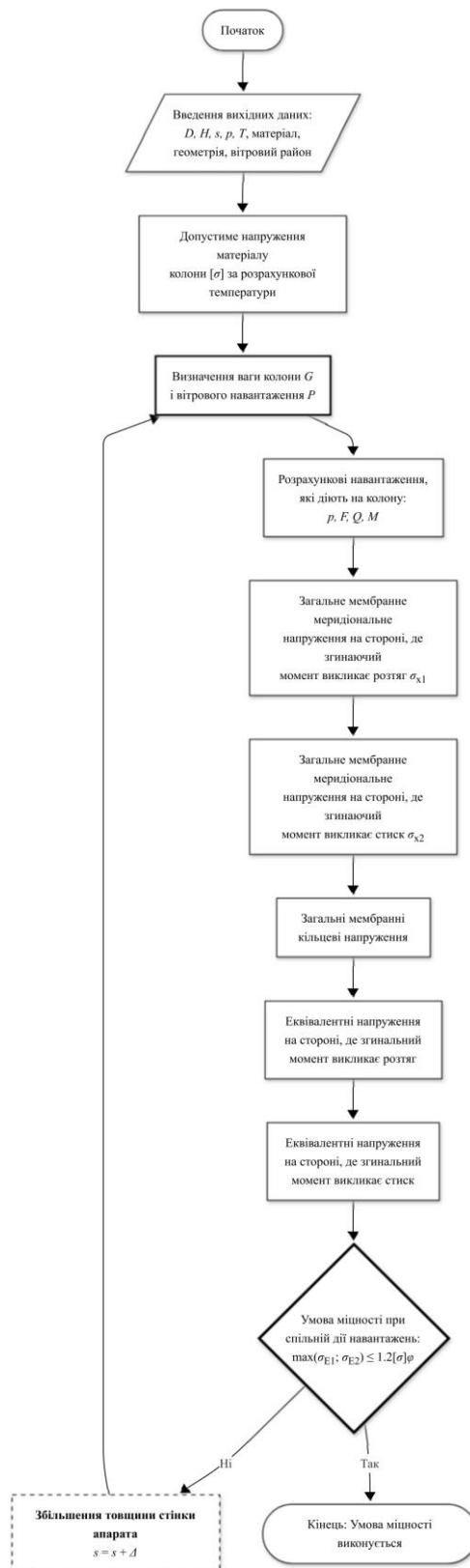


Рисунок В.1 – Блок-схема розрахунку колонного апарата на міцність

# Програма розрахунку колонного апарата на міцність (MathCad)

Вихідні дані:

$$D := 0.8$$

$$S_0 := 0.005$$

$$C_0 := 0.003$$

$$G := 0.204421$$

$$M_V := 0.082405$$

$$M_{VR} := 0.001918$$

Допустиме напруження матеріалу опорної обичайки і колони:

$$\sigma := 174$$

МПа - для сталі 12Х18Н10Т при 100 °С

$$\sigma_0 := 174$$

$$M_G := 0$$

$$S_0 := S$$

$$C_0 := C$$

$$D_0 := D$$

Розрахункові навантаження, які діють на опорну обичайку:

$$p := 0.6 \quad \text{МПа} \quad Q := 0$$

$$F := G = 0.204 \quad \text{МН} \quad M := M_G + \max(M_V, M_{VR}) = 0 + \max(0.082405, 0.001918) = \text{НМм}$$

$$M_V = 2.134 \quad M_{VR} = 11.31$$

Загальне мембранне меридіональне напруження в опорній обичайці колонного апарата в розрахунковому перерізі на стороні, де згинаючий момент викликає розтяг:

$$\sigma_{x1} := \frac{-p \cdot (D_0 + S_0)}{4(S_0 - C_0)} - \frac{F}{\pi \cdot D_0 \cdot (S_0 - C_0)} + \frac{4M}{\pi \cdot D_0^2 \cdot (S_0 - C_0)} = \frac{-0.6 \cdot (0.8 + 0.005)}{4 \cdot (0.005 - 0.003)} - \frac{0.204421}{\pi \cdot 0.8 \cdot (0.005 - 0.003)} + \frac{4 \cdot 0.082405}{\pi \cdot 0.8^2 \cdot (0.005 - 0.003)} = -19.073 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_{x1} := \text{round}(\sigma_{x1}, 3) = -19.073$$

Загальне мембранне меридіональне напруження в опорній обичайці колонного апарата в розрахунковому перерізі на стороні, де згинаючий момент викликає стиск:

$$\sigma_{x2} := \frac{-p \cdot (D_0 + S_0)}{4(S_0 - C_0)} - \frac{F}{\pi \cdot D_0 \cdot (S_0 - C_0)} - \frac{4M}{\pi \cdot D_0^2 \cdot (S_0 - C_0)} = \frac{-0.6 \cdot (0.8 + 0.005)}{4 \cdot (0.005 - 0.003)} - \frac{0.204421}{\pi \cdot 0.8 \cdot (0.005 - 0.003)} - \frac{4 \cdot 0.082405}{\pi \cdot 0.8^2 \cdot (0.005 - 0.003)} = -183.013 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_{x2} := \text{round}(\sigma_{x2}, 3) = -183.013$$

Загальні мембранні кільцеві напруження:

$$\sigma_y := \frac{-p \cdot (D_0 + S_0)}{2(S_0 - C_0)} = \frac{-0.6 \cdot (0.8 + 0.005)}{2 \cdot (0.005 - 0.003)} = -120.75 \quad \text{МПа}$$

$$\sigma_y := \text{round}(\sigma_y, 3) = -120.75$$

Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі опорної обичайки на стороні, де згинальний момент викликає розтяг:

$$\sigma_{E.1} := \max(|\sigma_{x1} - \sigma_y|, |\sigma_y|, |\sigma_{x1}|) = \max(|-19.073 - (-120.75)|, |-120.75|, |-19.073|) = 120.7 \text{ МПа}$$

Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі опорної обичайки на стороні, де згинальний момент викликає стиск:

$$\sigma_{E.2} := \max(|\sigma_{x2} - \sigma_y|, |\sigma_y|, |\sigma_{x2}|) = \max(|-183.013 - (-120.75)|, |-120.75|, |-183.013|) = 183. \text{ МПа}$$

Умова міцності опорної обичайки при спільній дії навантажень:

$$\varphi := 1$$

$$\max(\sigma_{E.1}, \sigma_{E.2}) \leq 1.2 \cdot \sigma \cdot \varphi = \max(120.75, 183.013) \leq 1.2 \cdot 174 \quad \text{Умова міцності виконується}$$

Всі ідентифікатори використані в програмі розрахунку наведені в таблиці

В.1.

Таблиця В.1 – Перелік ідентифікаторів

Найменування величини	Позначення	Ідентифікатор	Розмірність
1	2	3	4
Внутрішній діаметр обичайки	D	D	м
Розрахунковий тиск	p	p	МПа
Розрахункова температура	t	t	°С
Допустиме напруження	[σ]	σ <sub>0</sub>	МПа
Розрахункові навантаження	G	F	МН

Продовження таблиці А.1			
1	2	3	4
Розрахунковий згинаючий момент від дії вітрового навантаження	$M_V$	$M_V$	$H^*m$
Коефіцієнт міцності зварного шва	$\varphi$	$\varphi$	
Виконавча товщина стінки	$S$	$S$	$m$
Сума додатків розрахункової товщини	$C$	$C$	$m$

Результати отримані за програмою розрахунку кришок на міцність наведені в таблиці В.2.

Таблиця В.2 – Результати розрахунку

Найменування величини	Позначення	Числове значення	Розмірність
Розрахункові навантаження, які діють на опорну обичайку	$M$	0,082405	$MH^*m$
Загальне мембранне меридіональне напруження в опорній обичайці колонного апарата в розрахунковому перерізі на стороні, де згинаючий момент викликає розтяг	$\sigma_{x1}$	-19,073	$MPa$
Загальне мембранне меридіональне напруження в опорній обичайці колонного апарата в розрахунковому перерізі на стороні, де згинаючий момент викликає стиск	$\sigma_{x2}$	-183,013	$MPa$
Загальні мембранні кільцеві напруження	$\sigma_y$	-120,75	$MPa$
Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі опорної обичайки на стороні, де згинальний момент викликає розтяг	$\sigma_{E.1}$	120,7	$MPa$
Еквівалентні напруження в розрахунковому перерізі опорної обичайки на стороні, де згинальний момент викликає стиск	$\sigma_{E.2}$	183	$MPa$

(19) 国家知识产权局



(12) 发明专利申请



(10) 申请公布号 CN 119971537 A

(43) 申请公布日 2025.05.13

(21) 申请号 202510466128.5

B08B 7/02 (2006.01)

(22) 申请日 2025.04.15

C07C 209/84 (2006.01)

C07C 211/04 (2006.01)

(71) 申请人 杭州海尔希畜牧科技有限公司  
地址 311200 浙江省杭州市萧山区戴村镇  
张家弄村890号

申请人 河南海尔希生物科技有限公司

(72) 发明人 徐海宝 帅江稳 楼杭波 岳远志  
孙锦州

(74) 专利代理机构 河南商企云专利代理有限公司  
41239

专利代理师 项珍珍

(51) Int. Cl.

B01D 3/14 (2006.01)

B01D 3/32 (2006.01)

B01D 3/42 (2006.01)

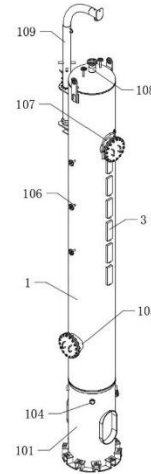
权利要求书2页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

甲胺精馏设备及分离提纯组件、提纯工艺

(57) 摘要

本发明公开了甲胺精馏设备及分离提纯组件、提纯工艺,涉及甲胺加工技术领域,甲胺精馏设备包括塔体,塔体的底部设有裙座,裙座的侧面开设有人孔,塔体的底部设有排液管,裙座的侧面设有换气孔,塔体的侧面底部设有蒸汽导入管,塔体的侧面设有进液管,塔体的侧面顶部两侧分别设有回流管和塔体顶部吊柱,塔体的顶端设有蒸汽导出管,塔体的内部顶侧设有气液分离器,塔体的内部竖直交错设有塔板组件,本发明实现对塔板之间距离的调节以降低液泛风险,而且在塔板发生漏液现象时及时监测以及时调整工艺参数,另外,便于根据生产需要对塔板上液体的流速进行调整,并且在塔板发生堵塞时便于及时干预清堵。



(19) 国家知识产权局



(12) 实用新型专利



(10) 授权公告号 CN 223516961 U

(45) 授权公告日 2025. 11. 07

(21) 申请号 202423127708.1

(22) 申请日 2024. 12. 18

(73) 专利权人 沈阳施博达仪器仪表有限公司  
地址 110000 辽宁省沈阳市铁西区经济技术  
开发区开发北二十六号路18号

(72) 发明人 汤博 汤军帅

(74) 专利代理机构 沈阳友和欣知识产权代理事  
务所(普通合伙) 21251  
专利代理师 郭悦

(51) Int.Cl.  
B01D 3/24(2006.01)

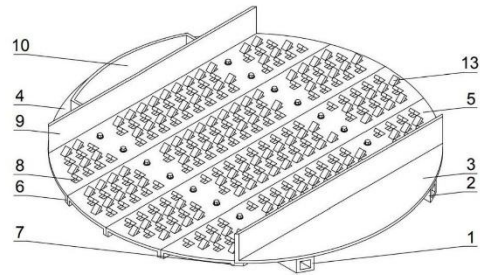
权利要求书1页 说明书3页 附图3页

(54) 实用新型名称

一种精馏塔用塔板结构

(57) 摘要

本实用新型公开了一种精馏塔用塔板结构,涉及精馏塔板技术领域,包括一号支撑梁及二号支撑梁,所述一号支撑梁及所述二号支撑梁的上表面一侧设有受液板,所述一号支撑梁及所述二号支撑梁的上表面另一侧设有降液板,所述一号支撑梁及所述二号支撑梁的上表面且在所述受液板与所述降液板之间设有塔板,所述塔板的数量为四块,四块所述塔板之间下端设有限位沿,外侧所述塔板与所述受液板及所述降液板对应的位置设有固定沿,四块所述塔板上均贯穿设有滤孔,所述受液板及所述降液板的上表面内侧端均设有溢流堰,所述降液板上贯穿设有降液管,在保证塔板外径基本与塔体的内径基本一致的同时,工作人员拆装维护作业更加简便。



CN 223516961 U

(19) 国家知识产权局



(12) 发明专利申请



(10) 申请公布号 CN 120733373 A

(43) 申请公布日 2025. 10. 03

(21) 申请号 202511154556.0

(22) 申请日 2025.08.18

(71) 申请人 安徽祥源科技股份有限公司

地址 233000 安徽省蚌埠市兰陵路1号办公楼

(72) 发明人 赵培 张浩 徐龙 周红志 吕晨  
吴健健 岳磊

(74) 专利代理机构 合肥市科深知识产权代理事务  
所(普通合伙) 34235

专利代理师 郭苗苗

(51) Int. Cl.

B01D 3/14 (2006.01)

B01D 3/32 (2006.01)

B01D 3/42 (2006.01)

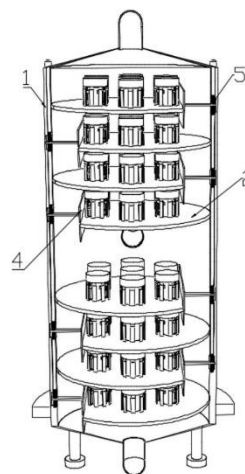
权利要求书2页 说明书5页 附图10页

(54) 发明名称

一种化工精馏用机械设备

(57) 摘要

本发明公开了一种化工精馏用机械设备,涉及化工精馏技术领域,包括精馏塔,精馏塔内部固设有塔板,塔板表面固设有固定筒,该固定筒与塔板上的气孔相连通,固定筒底部一端沿周向分布有四组通孔机构;所述通孔机构包括:固设于塔板表面的限位板;活动穿设于限位板中部的推动柱,其一端固连有置于气孔内部的推动板;固连于推动柱另一端的推动块二;多个竖直固设于推动板内侧的凸点。本发明利用塔板表面液体沸腾时浮块的自然上下浮动,驱动凸点、扎破锥部件往复运动,对气孔处的气膜进行机械冲击和扎破,该过程完全依赖液体沸腾的能量,无需外部动力,降低了能耗和运行成本,且能随气膜形成动态响应,破除更及时。



CN 120733373 A

(19) 国家知识产权局



(12) 发明专利申请



(10) 申请公布号 CN 120884913 A

(43) 申请公布日 2025. 11. 04

(21) 申请号 202511204078.X

(22) 申请日 2025. 08. 27

(71) 申请人 南通锦华分离工程科技有限公司  
地址 226000 江苏省南通市通州区五接镇  
工业区桃园村13组

(72) 发明人 王井华 朱建

(74) 专利代理机构 南通宁竞智凡专利代理事务  
所(普通合伙) 32666  
专利代理师 蔡伟伟

(51) Int.Cl.

B01D 3/32 (2006.01)

B01D 3/00 (2006.01)

B01D 46/12 (2022.01)

B01D 46/681 (2022.01)

B01D 46/42 (2006.01)

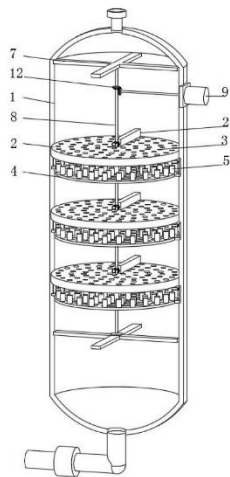
权利要求书2页 说明书5页 附图9页

(54) 发明名称

一种化工精馏塔的防堵组件

(57) 摘要

本发明公开了一种化工精馏塔的防堵组件,涉及精馏塔技术领域,包括塔体,塔体的内部设有多个过滤防堵结构;过滤防堵结构包括:塔板,塔板的内部开设有多个过滤孔;清理机构,用于对多个过滤孔内部的杂质进行清理;导出机构,用于对从过滤孔内部顶出的杂质与塔板顶部的杂质进行收集和导出至塔体外部;该化工精馏塔的防堵组件,通过驱动各项柱向上移动并分别插入各过滤孔的内部,将过滤孔内部的杂质顶出,实现了对过滤孔的深度清理,解决了过滤孔容易出现堵塞且清理不彻底的问题,通过自动转化为公转的顶柱带动塔板转动,配合导出机构将此时位于塔板顶部的杂质一起导出至塔体外部,解决了塔体内部清理出来的杂质难以排出至塔体外部的的问题。



CN 120884913 A

(19) 国家知识产权局



## (12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120919667 A

(43) 申请公布日 2025. 11. 11

(21) 申请号 202511463469.3

B01D 3/42 (2006.01)

(22) 申请日 2025.10.14

(71) 申请人 上海电气集团国控环球工程有限公司

地址 030000 山西省太原市迎泽区太堡街  
72号71幢A段11层

(72) 发明人 贾瑞杰 何秀风 李珊珊 张凯军  
王洁 安孟佳 牛保平 李秀杰  
贾建军 樊思思

(74) 专利代理机构 山西星辉知识产权代理事务  
所(普通合伙) 14132

专利代理师 李研墩

(51) Int. Cl.

B01D 3/32 (2006.01)

B01D 3/14 (2006.01)

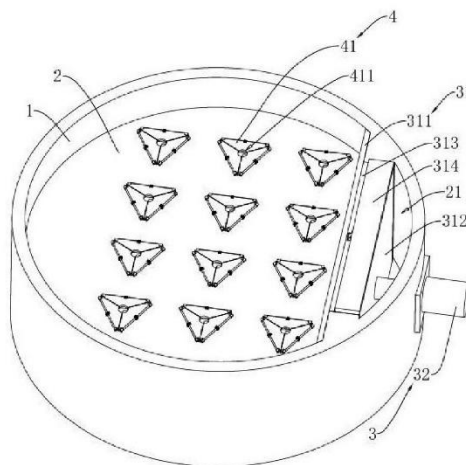
权利要求书3页 说明书8页 附图7页

### (54) 发明名称

一种高低压两用精馏塔板结构

### (57) 摘要

本申请涉及一种高低压两用精馏塔板结构，涉及精馏塔的技术领域，其包括受液板、溢流组件、换孔组件和驱动组件，溢流组件包括溢流部、动力缸和调节部，溢流部包括第一溢流板、第二溢流板、第一调节板和第二调节板，调节部包括动力块、第一滑杆、第一调节杆、第二滑杆、第二调节杆和调节连杆，换孔组件包括低压孔板和高压孔板，驱动组件包括动力环、低压驱动部、高压驱动部和传动部，低压驱动部包括推板、驱动杆、翻转齿条和翻转齿轮，高压驱动部包括推块、驱动轴和翻转块，传动部包括连接杆、推杆、传动齿条和传动齿圈，通过对溢流结构和气相口直径的调节，使得塔板能切换精馏模式。本申请具有使塔板能切换高压精馏模式和低压精馏模式的效果。



CN 120919667 A

(19) 国家知识产权局



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120926778 A

(43) 申请公布日 2025. 11. 11

(21) 申请号 202511214736.3

(22) 申请日 2025.08.28

(71) 申请人 抚顺华恒化工机械有限公司  
地址 113000 辽宁省抚顺市顺城区高山路  
北寒江路8号

(72) 发明人 徐嘉鸿 戴龙 唐浩洪 宗华

(74) 专利代理机构 辽宁铭合专利代理事务所  
(普通合伙) 21262  
专利代理师 迟春筱

(51) Int.Cl.  
F28D 7/16 (2006.01)  
F28F 19/01 (2006.01)  
F28F 9/24 (2006.01)

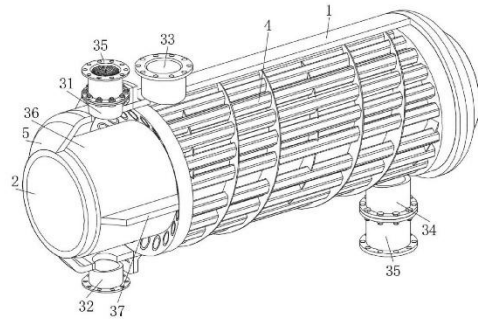
权利要求书2页 说明书7页 附图9页

(54) 发明名称

一种具有防堵功能的环形管壳式换热器

(57) 摘要

本发明公开了一种具有防堵功能的环形管壳式换热器,本发明涉及换热器技术领域。本发明包括换热管,换热管的两端均设置有管板,换热管的外侧面与管板的内侧面固定连接,管板的内侧面与内筒的外侧面固定连接,管板的外侧面与外壳的内侧面固定连接,两个管板相互远离的一侧均设置为弧面状,换热管的端部与管板的弧面侧平滑设置,弧面状的管板能够降低与管程流体之间的撞击,降低污垢的附着,避免管板处污垢堆积造成堵塞,换热管的端部与管板的弧面侧平滑设置,能够同理降低换热管端部的污垢堆积,避免污垢堆积后造成换热管管口处粗糙度增加,避免水垢的附着面增加,延长水垢堆积造成堵塞的时间,延长维护间隔。



CN 120926778 A

(19) 国家知识产权局



(12) 发明专利申请



(10) 申请公布号 CN 120961110 A

(43) 申请公布日 2025. 11. 18

(21) 申请号 202511215765.1

(22) 申请日 2025. 08. 28

(71) 申请人 海南华盛新材料科技有限公司  
地址 572600 海南省东方市八所镇园区五  
路1号

(72) 发明人 邓小春 陈建煌 裴瑞清 许顶  
张志成

(51) Int. Cl.

B01J 19/24 (2006.01)

B01J 19/00 (2006.01)

B01J 4/00 (2006.01)

B01F 23/45 (2022.01)

B01F 25/23 (2022.01)

B01F 35/21 (2022.01)

B01F 35/60 (2022.01)

B01D 3/32 (2006.01)

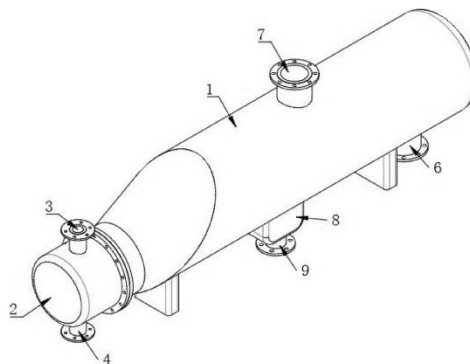
权利要求书2页 说明书6页 附图10页

(54) 发明名称

一种提高歧化反应效率的装置

(57) 摘要

本发明涉及蒸馏塔外置设备技术领域,且公开了一种提高歧化反应效率的装置,包括再沸器壳体,再沸器壳体的一端通过法兰固定连接有益盖,端盖的上表面和下表面分别固定连接有益蒸汽管和凝液管,再沸器壳体中部的上表面固定连接有益气相管,再沸器壳体远离端盖一端的底面固定连接有益液相管。该种提高歧化反应效率的装置,通过混合盒内弧形挡板与弯管的配合设计,使苯酚与DMC物料在喷射过程中形成对冲混合,显著缩短混合时间,提高反应物初始接触均匀性;双重除沫网配合浮管随液位自动调节功能,可高效破除气液混合物中的泡沫,减少气相损失。



CN 120961110 A

(19) 国家知识产权局



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120252390 A

(43) 申请公布日 2025.07.04

(21) 申请号 202510672866.5

(22) 申请日 2025.05.23

(71) 申请人 珠海格力电器股份有限公司

地址 519031 广东省珠海市珠海横琴新区  
汇通三路108号办公608

(72) 发明人 武永强 王小勇 郑威 卢杏斌

(74) 专利代理机构 中国贸促会专利商标事务所  
有限公司 11038

专利代理师 艾春慧

(51) Int.Cl.

F28D 7/16 (2006.01)

F28F 9/24 (2006.01)

F25B 39/02 (2006.01)

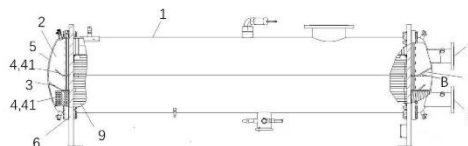
权利要求书2页 说明书9页 附图3页

(54) 发明名称

管壳式换热器及制冷机组

(57) 摘要

本申请提供了一种管壳式换热器及制冷机组。管壳式换热器包括筒体、换热管束、两个流体室、隔板和控流部件。至少一个流体室内设置有隔板,隔板将所在的流体室分隔为不同的腔室以使换热管束形成多个管程的多个换热管组。至少一个腔室内设置有控流部件,控流部件位于所在的腔室连通的两个换热管组之间,控流部件包括连通两个换热管组的均流结构和/或将两个换热管组中处于上游的换热管组的出口的管程流体朝向两个换热管组中处于下游的换热管组的入口引导的导流结构。通过设置包括均流结构和/或导流结构的控流部件,使各管程流体流动更均匀,温度和流量分布波动性更小。



CN 120252390 A



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 120538348 A

(43) 申请公布日 2025.08.26

- (21) 申请号 202510822747.3 F28G 15/04 (2006.01)
- (22) 申请日 2025.06.19 F28G 3/04 (2006.01)
- (71) 申请人 抚顺华恒化工机械有限公司 F28G 15/00 (2006.01)  
地址 113000 辽宁省抚顺市顺城区高山路北寒江路8号
- (72) 发明人 徐嘉鸿 戴龙 唐浩洪 宗华
- (74) 专利代理机构 辽宁铭合专利代理事务所  
(普通合伙) 21262  
专利代理师 冉清泉
- (51) Int.Cl.  
F28D 7/16 (2006.01)  
F28F 9/22 (2006.01)  
F28F 13/02 (2006.01)  
F28F 9/24 (2006.01)  
F28G 1/08 (2006.01)

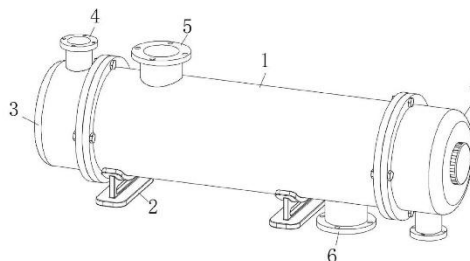
权利要求书2页 说明书9页 附图8页

(54) 发明名称

一种便于维护的管壳式换热器

(57) 摘要

本发明涉及管壳式换热器技术领域,并具体公开了一种便于维护的管壳式换热器,所述主体的侧面固定连接有支架,所述主体的一端固定连接管箱一,所述管箱一的侧面固定连接流体接口。该一种便于维护的管壳式换热器,设置有传热机构,通过冷流体持续的冲击力,从而使得移动套在连接轴上,跟随冷流体的冲击力进行移动,从而使得移动套通过连接架以及连接板,带动刮板与传热管的内壁进行接触移动,冷流体流动时,在传热管内壁会形成边界层,这会阻碍热量传递,刮板在冷流体冲击力作用下沿传热管内壁移动,能够破坏边界层,使冷流体与管壁之间的热交换更加充分,强化传热过程,提高换热器的传热效率。





(12) 实用新型专利

(10) 授权公告号 CN 223447983 U

(45) 授权公告日 2025. 10. 17

- (21) 申请号 202423205479.0
- (22) 申请日 2024.12.25
- (73) 专利权人 南京佳利来金属复合材料有限公司  
地址 210000 江苏省南京市浦口区石桥镇新石路10号
- (72) 发明人 李小雷 刘远华
- (74) 专利代理机构 安徽海远知成知识产权代理有限公司 (普通合伙) 34295  
专利代理师 闫日旭
- (51) Int. Cl.  
F16L 57/02 (2006.01)  
F16L 58/10 (2006.01)

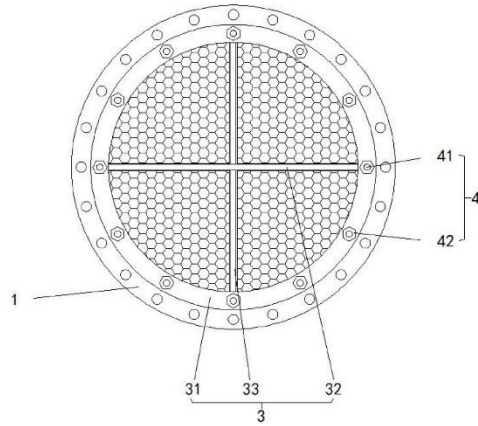
权利要求书1页 说明书3页 附图1页

(54) 实用新型名称

一种LNG汽化器装置用钛钢复合管板

(57) 摘要

本实用新型涉及钛钢复合管板技术领域,且公开了一种LNG汽化器装置用钛钢复合管板,包括钛钢复合管板主体,所述钛钢复合管板主体的外壁设置有耐腐蚀层,所述钛钢复合管板主体的前后两侧壁均设置有加固组件,所述加固组件与钛钢复合管板主体之间通过连接组件连接。该LNG汽化器装置用钛钢复合管板,通过设置前后两个加固组件,由加固圆环、第一加强筋和第二加强筋的设置,可以有效的提高钛钢复合管板主体的结构强度,在受到冲击时,能够较好的避免其形变,提高了钛钢复合管板的实用性,通过设置耐腐蚀层的设置可以有效的提高钛钢复合管板的抗腐蚀能力,避免其在恶劣环境下出现腐蚀和裂纹的现象,进一步提高了装置的实用性。



**Додаток Д Публікації автора**

**СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

студента групи ЛМ-41мп

**СТАСЮКА АНДРІЯ ЮРІЙОВИЧА**

1. MODERNIZATION OF AN AIR SEPARATION UNIT WITH THE DESIGN OF A DISTILLATION COLUMN AND HEAT EXCHANGER / Stasiuk A. Y., Haidai S. S. // «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»: XXXVI всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, (Київ 28-29 травня 2025 р.): зб. тез доп. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2025. – Секція 3. – 322-324.
2. ANALYSIS OF EXISTING NITROGEN-OXYGEN INSTALLATIONS AND DETERMINATION OF THE DIRECTION OF OWN MODERNIZATION / Stasiuk A. Y., Haidai S. S. // «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»: XXXVII всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, (Київ 01-10 грудня 2025 р.): зб. тез доп. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2025. – Секція 3. – 328-332.
3. MODERNIZATION OF THE HEAT EXCHANGER OF THE AIR SEPARATION UNIT / Stasiuk A. Y., Haidai S. S. // «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів»: XXXVII всеукраїнська науково-практична конференція студентів, аспірантів і молодих вчених, (Київ 01-10 грудня 2025 р.): зб. тез доп. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2025. – Секція 3. – 333-337.



**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»  
Інженерно-хімічний факультет**

**Збірник тез доповідей XXXVI Всеукраїнської науково-практичної  
конференції студентів, аспірантів і молодих вчених**

**”ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ  
І ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ”**

28-29 травня  
Київ 2025р.

Збірник тез доповідей XXXVI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів"

УДК 66.048.37:621.59

## MODERNIZATION OF AN AIR SEPARATION UNIT WITH THE DESIGN OF A DISTILLATION COLUMN AND HEAT EXCHANGER

Stasiuk A. J., Haidai S. S.

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**ABSTRACT:** *The operation of a cryogenic air separation unit has been analyzed, and the need for modernization of the distillation column and heat exchanger has been substantiated.*

**KEY WORDS:** AIR SEPARATION UNIT, DISTILLATION COLUMN, HEAT EXCHANGER, CRYOGENIC TECHNOLOGY.

## МОДЕРНІЗАЦІЯ АЗОТНО-КИСНЕВОЇ УСТАНОВКИ З РОЗРОБКОЮ РЕКТИФІКАЦІЙНОЇ КОЛОНИ ТА ТЕПЛООБМІННИКА

Стасюк А. Ю., Гайдай С. С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**АНОТАЦІЯ:** Проаналізовано роботу криогенної азотно-кисневої

установки та обґрунтовано необхідність модернізації ректифікаційної колони та теплообмінника.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** АЗОТНО-КИСНЕВА УСТАНОВКА, РЕКТИФІКАЦІЙНА КОЛОНА, ТЕПЛООБМІННИК, КРИГЕННА ТЕХНОЛОГІЯ.

**Air Separation Units (ASUs)** separate atmospheric air into high-purity oxygen and nitrogen, widely used in various industries. The main method is cryogenic rectification, based on differences in boiling points of air components.

The process involves air purification, compression (5–10 bar), cooling via heat exchangers and expanders, liquefaction, and separation in a two-column distillation

Збірник тез доповідей XXXVI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів"

system. Trays or packing enhance mass transfer, and argon is additionally separated. Efficiency depends on the reflux ratio, internal elements, and operating conditions.

The rectification column is the core of the unit. Its modernization includes improved contact elements, optimized geometry, effective cleaning, and corrosion-resistant materials. Heat exchanger upgrades focus on larger surface areas, reduced pressure drops, and high thermal conductivity materials.

Modernization aims to improve separation efficiency, reduce energy use, and ensure stable, cost-effective operation.

### Simplified Operating Principle of ASU:

1. Air purification from dust, moisture, and CO<sub>2</sub>
2. Compression and cryogenic cooling
3. Rectification to separate oxygen, nitrogen, and argon
4. Product withdrawal and storage/use

The process scheme is shown in **Figure 1**, where purified and cooled air is separated in the column: nitrogen rises, oxygen sinks, and argon concentrates in the middle. High-purity gases are collected at designated points, Figure 1.

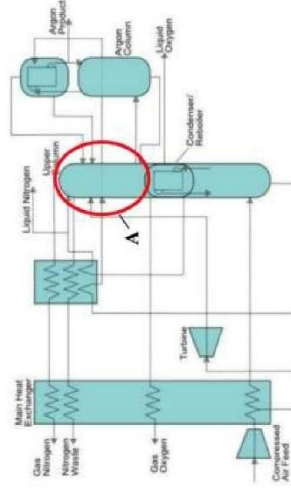


Figure 1 – Cryogenic air separation unit producing argon in addition to oxygen and nitrogen.

The unit offers several advantages, including high separation efficiency, energy efficiency, and the ability to recover argon. However, it also has drawbacks such as complex design, high cost, and sensitivity to process stability.

Modernization of the distillation column may include the use of more efficient packing with lower hydraulic resistance, optimization of geometry, fouling prevention, and corrosion-resistant materials. For the heat exchanger, improvements may involve increasing the heat transfer surface area, reducing pressure drops, enhancing thermal performance, and ensuring surface cleanliness. These measures aim to reduce energy consumption, improve product quality, and enhance overall unit performance.

#### **REFERENCES:**

1. Pintilie M., Şerban A., Popa V., Popa C. L. Design analysis of low pressure distillation column for cryogenic air separation. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 595 (2019), 012023, pp. 1–7.
2. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, 4th Edition, Vol. 12, Wiley-Interscience, 2004, pp. 480–553.
3. Kumar L. Analysis of Steady State Cryogenic Air Separation Unit of Rourkela Steel Plant and Simulation of Fixed Bed Adsorption Separation of Air. Department of Mechanical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela-769008, Odisha, June 2014.



**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»  
Інженерно-хімічний факультет**

**Збірник тез доповідей XXXVII Всеукраїнської науково-практичної  
конференції студентів, аспірантів і молодих вчених**

**”ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ  
І ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ”**

01-10 грудня  
Київ 2025р.

## ANALYSIS OF EXISTING NITROGEN-OXYGEN INSTALLATIONS AND DETERMINATION OF THE DIRECTION OF OWN MODERNIZATION

Student Stasiuk A. Y., associate professor Haidai S. S.

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**ABSTRACT:** *A detailed analysis of the operation of a nitrogen-oxygen plant based on cryogenic technologies was carried out, and the need for modernization of the rectification column and heat exchanger to increase their efficiency and adapt to modern standards was substantiated.*

**Keywords:** *NITROGEN-OXYGEN PLANT, RECTIFICATION COLUMN, HEAT EXCHANGER, CRYOGENIC TECHNOLOGY, MODERNIZATION.*

## АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ АЗОТНО-КИСНЕВИХ УСТАНОВОК ТА ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМКУ ВЛАСНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ

Студент Стасюк А.Ю., доцент, к.т.н. Гайдай С. С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**АНОТАЦІЯ:** *Здійснено детальний аналіз роботи азотно-кисневої установки, що базується на криогенних технологіях, та обґрунтовано необхідність модернізації ректифікаційної колони й теплообмінника для підвищення їхньої ефективності й адаптації до сучасних стандартів.*

**КЮЧОВІ СЛОВА:** *АЗОТНО-КИСНЕВА УСТАНОВКА, РЕКТИФІКАЦІЙНА КОЛОНА, ТЕПЛОБІМІННИК, КРІОГЕННА ТЕХНОЛОГІЯ, МОДЕРНІЗАЦІЯ.*

This paper examines the development of cryogenic air separation technologies, ranging from historical origins to modern innovations that improve the efficiency of industrial processes [1], [2], [3]. The primary focus is on the improvement of rectification columns and heat exchangers, which are critical for the high-quality production of oxygen and nitrogen, as well as for compliance with modern environmental and economic requirements [4], [5].

The analysis relies on historical research data, particularly the works of Carl von Linde, and modern technologies to enhance energy efficiency and reduce costs [1], [6]. Improving these systems helps reduce energy consumption and increase plant productivity, which is essential for competitiveness [7], [8]. Potential issues are also considered, such as the reduction of the phase contact surface area, which can lower separation efficiency due to insufficient interaction between liquid and vapor [2], [3].

The historical overview of rectification column modernization begins with Carl von Linde's research (1895–1910), which laid the theoretical and practical foundations for cryogenic air separation using a single rectification column for oxygen production [1]. In 1910, a double column system (high and low pressure) with a heat exchanger was introduced, allowing for the simultaneous production of high-quality oxygen and nitrogen—a key milestone in the technology's development [2]. The classic Linde scheme is still used in modern nitrogen-oxygen plants, confirming its efficiency and adaptability [1].

In the 1980s, column modernization included the application of structured packings instead of tray columns, which reduced hydraulic pressure drop and lowered energy consumption by 15–20% [3]. Extending the operating range reduced loads by up to 30%, ensuring operational flexibility under variable modes and facilitating argon production [7]. In 2011, packing optimization allowed for the production of pure argon without additional columns while maintaining high purity and product yield, although the reduction in phase contact surface area sometimes lowers separation efficiency due to decreased liquid-vapor contact [8].

Linde's double distillation column (1905) enabled the production of pure oxygen and nitrogen, and by 1912, the technology expanded to industrial argon production with the integration of molecular sieves for water and CO<sub>2</sub> removal, enhancing process safety and efficiency [1]. The transition from simple distillation to fractional distillation with reflux—returning part of the condensed vapor to enrich the vapor phase—improved separation selectivity [2]. Rectification columns with trays or structured packings optimize liquid-vapor contact, though hydraulic losses affecting energy efficiency must be considered [3]. The use of centrifugal forces in the column intensifies the separation process and reduces reliance on gravitational effects, which is particularly effective for high-viscosity media [5].

Heat exchanger modernizations cover the evolution from early designs to modern innovations aimed at increasing thermal efficiency and adapting to complex cryogenic conditions [4]. Early systems utilized an integrated condenser- evaporator with a minimal temperature difference of  $dT \approx 1.4$  K, ensuring basic heat exchange in the process [1]. In 2000, cascade condensers emerged, improving heat transfer efficiency, while downflow condensers (2006) and reflux condensers (2008) allowed for integration with rectification systems and reduced equipment footprint [6]. These solutions eliminated the need for external pipelines for oxygen and nitrogen, saving up to 15% of energy over the last 10 years [7].

Optimized plate-fin heat exchangers with enhanced fins (2015) significantly increased thermal efficiency, while internal compression (1978) reduced reliance on external compressor equipment, lowering risks and operating costs [8]. Plate-fin heat exchangers are popular due to the high thermal conductivity of materials such as aluminum (204 W/(m·K) at 20°C), allowing for  $\Delta T < 1$  K, although fouling can reduce the effective surface area [4].

Cascade cycles with precooling, Joule-Thomson (J-T) expansion, and turbo-expanders reduce energy consumption by 17%, confirming their effectiveness [1]. Integrating heat exchangers into argon separation processes in nitrogen-oxygen plants

increases energy efficiency [5]. Modern heat-integrated rectification columns utilize minimum pressure for uniform heat distribution across column segments, providing over 17% savings thanks to a non-equilibrium mass transfer model [6].

Exergy analysis, which determines the maximum useful work of the system, indicates losses of up to 30% in rectification columns, driving the optimization of system flexibility [7]. Integration with renewable energy contributes to sustainable development, while additive manufacturing allows for the creation of compact and efficient designs for columns and heat exchangers [8]. Three-column systems and flexible high-pressure processes (2012) reduce the need for additional compressors for small plants, increasing economic attractiveness [3]. Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC) systems with ASU integration (Texaco, Shell, 1980s) increase efficiency to 41–43% due to hot gas cleaning and improved heat exchangers [6].

Combining adsorption processes with cryogenic columns effectively removes impurities, lowering energy consumption, although the reduction of phase contact surface area can affect separation quality [7]. Integrating heat exchangers into nitrogen systems ensures temperature stability, which is critical for continuous operation [8].

The direction of the proposed modernization is based on a comprehensive analysis of modern trends in cryogenic air separation, focusing on increasing energy efficiency through improved heat integration, reduced operating pressure, and refined plant structural elements [1], [4]. The proposed strategy envisages the development of a rectification column integrated with a heat exchanger, allowing for a reduction in energy consumption with estimated savings of 15–20% while ensuring stability and high quality of the final products [6], [7]. A key aspect of this modernization is increasing system flexibility and its ability to adapt to modern environmental and economic sustainability requirements, making it competitive on an industrial scale. Particular attention is paid to potential negative effects associated with reduced phase

contact surface area, which may lead to decreased mass transfer efficiency; specific compensation mechanisms are proposed to neutralize these effects [2]. The approach is based on synthesizing the historical principles laid down by Linde with modern technological achievements, specifically the use of structured packings, optimized condensers, cascade heat exchangers, and adsorption precoolers, to create a compact, energy-efficient, and high-performance system for modern industrial needs [3], [5], [8].

### References

1. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology : vol.7, Cryogenics / John Wiley & Sons. – New York : Wiley Interscience, 1998. – C. 325–326.
2. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology : vol.8, Distillation / John Wiley & Sons. – New York : Wiley Interscience, 1998. – C. 155.
3. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology: vol.21, Centrifugal Separation / John Wiley & Sons. – New York : Wiley Interscience, 1998. – C. 396.
4. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology : vol.12, Heat Transfer / John Wiley & Sons. – New York : Wiley Interscience, 1998. – C. 481.
5. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology : vol.13, Helium Group Gases / John Wiley & Sons. – New York : Wiley Interscience, 1998. – C. 4.
6. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology : vol.6, Gasification / John Wiley & Sons. – New York : Wiley Interscience, 1998. – C. 267.
7. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology : vol.1, Adsorption / John Wiley & Sons. – New York : Wiley Interscience, 1998. – C. 251.
8. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology : vol.11, Nitrogen / John Wiley & Sons. – New York : Wiley Interscience, 1998. – C. 216.



**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут  
імені Ігоря Сікорського»  
Інженерно-хімічний факультет**

**Збірник тез доповідей XXXVII Всеукраїнської науково-практичної  
конференції студентів, аспірантів і молодих вчених**

**”ОБЛАДНАННЯ ХІМІЧНИХ ВИРОБНИЦТВ  
І ПІДПРИЄМСТВ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ”**

01-10 грудня  
Київ 2025р.

UDC 66.045.1

## MODERNIZATION OF THE HEAT EXCHANGER OF THE AIR SEPARATION UNIT

Student Stasiuk A. Y., associate professor Haidai S. S.

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**ABSTRACT:** *The efficiency of heat recovery in the Air Separation Unit was analyzed. A modernization of the tubular space of the heat exchanger by replacing smooth tubes with twisted type tubes was proposed. The thermohydraulic advantages of the new design, including high compactness and fouling mitigation, were substantiated.*

**Keywords:** *HEAT EXCHANGER, TWISTED TUBE, AIR SEPARATION UNIT, HEAT TRANSFER ENHANCEMENT, SWIRL FLOW.*

## МОДЕРНІЗАЦІЯ ТЕПЛОБІМІННОГО АПАРАТУ УСТАНОВКИ РОЗДІЛЕННЯ ПОВІТРЯ

Студент Стасюк А.Ю., доцент, к.т.н. Гайдай С. С.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**АНОТАЦІЯ:** *Проведено аналіз ефективності рекуперації тепла в установці розділення повітря. Запропоновано модернізацію трубного простору теплообмінника шляхом заміни гладких труб на труби скрученого типу. Обґрунтовано переваги нової конструкції, включаючи високу компактність та стійкість до забруднень.*

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** *ТЕПЛОБІМІННИК, СКРУЧЕНА ТРУБА, ПОВІТРОРІЗДІЛЬНА УСТАНОВКА, ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛОБІМІНУ, ЗАКРУЧЕНИЙ ПОТІК.*

333

**Introduction.** Heat exchange equipment plays a decisive role in the technological schemes of Air Separation Units (ASU) based on cryogenic rectification, ensuring deep cooling of the incoming compressed air stream to liquefaction temperatures.

The energy efficiency of the process is directly dependent on minimizing the temperature difference at the warm end of the apparatus and reducing hydraulic resistance. Standard shell-and-tube heat exchangers [1, p. 12] are characterized by operational reliability; however, the presence of segmental baffles creates "dead zones" with low heat transfer intensity and high hydraulic losses.

To address these issues, a modernization is proposed by introducing Twisted Tube technology, which replaces the conventional tube bundle with a self-supporting bundle of oval twisted tubes [2, p. 296].

The profile geometry of such a tube and the flow scheme are shown in Fig. 1.



Fig. 1. Geometry of the twisted tube and flow scheme

**Research and analysis.** The geometric configuration of twisted tubes creates a unique hydraulic regime. According to recent studies [3, p. 10], the twisted tube acts as a swirl flow device that generates an active centrifugal force flow field. This force promotes radial velocity changes inside the tubes, disrupting the boundary laminar sublayer and significantly enhancing heat and mass transfer. A critical advantage highlighted in the literature [3, p. 7] is the fouling mitigation effect: the high turbulence and elimination of stagnant zones prevent particle deposition, ensuring stable long-term operation of the ASU. The thermohydraulic performance is quantified by the Nusselt number correlation described in mathematical models [4, p. 1133]:

334

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4} \cdot \left[ 1 + 3,74 \left( \frac{s}{d_{max}} \right)^{-1} \right] \cdot \left( \frac{T_w}{T_b} \right)^n \quad (1)$$

where  $Re$  – Reynolds number;  $Pr$  – Prandtl number;  $s$  – tube twist pitch;  $d_{max}$  – maximum diameter of the oval profile;  $T_w$  and  $T_b$  – wall temperature and bulk mean temperature, respectively;  $n$  – experimental coefficient.

Which confirms that optimizing the twist pitch leads to higher convective heat transfer. Furthermore, the baffle-free design reduces the shell-side pressure drop compared to the zig-zag flow in conventional units.

Detailed calculations [4, p. 1134] indicate that the compactness factor for such exchangers exceeds  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ , making them ideal for space-constrained Air Separation Units. Comparative analysis data [4, p. 1135] for identical operating conditions are presented in Table 1.

Table 1. Comparison of parameters of standard and modernized heat exchangers

Parameter, Symbol, Unit	Shell-and-Tube HE (Standard)	Twisted Tube HE (Modernized)
Heat duty $Q$ , kW	4339	4339
Surface area $A$ , $\text{m}^2$	0.30	0.46
Compactness Factor, $\text{m}^2/\text{m}^3$	< 500	> 700
Shell-side HTC $h_o$ , $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	3514	5675
Overall HTC $U$ , $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$	892	1672
Pressure drop (shell) $\Delta P$ , $\text{kN}/\text{m}^2$	4.31	3.14

The modernization results in an 87% increase in the overall heat transfer coefficient  $U$  and a simultaneous reduction in shell-side pressure drop. This confirms

the theoretical findings [5, p. 38] that twisted tube technology offers superior energy recovery performance compared to conventional designs, allowing for flexible design optimization: either reducing the heat transfer area by up to 40% for the same duty or minimizing pumping costs.

A comparison of the hydrodynamic flow structure is shown in Fig. 2.

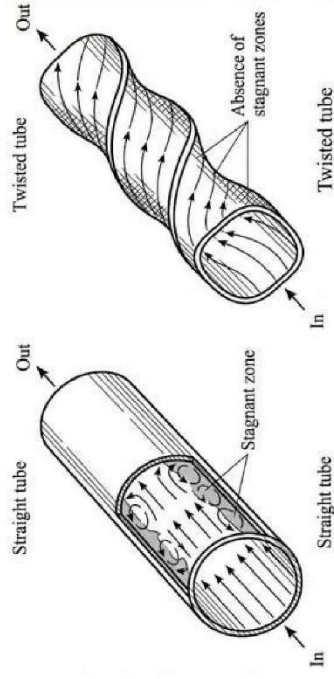


Fig. 2. Comparison of flow structures: absence of stagnant zones in Twisted Tube

**Conclusions.** The proposed modernization of the heat exchanger tube space is technically justified as it ensures intensification of heat transfer due to secondary swirl flows and boundary layer disruption, reduction of hydraulic resistance and pumping costs due to longitudinal flow, high compactness (greater than  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$ ) with self-cleaning properties due to the elimination of dead zones, and vibration resistance of the self-supporting tube bundle.

**References**

1. Andreev I. Design and calculation of shell-and-tube heat exchangers: study guide. Kyiv : Igor Sikorsky KPI, 2022. 140 p.

2. Pathade P., Singh A. Twisted Type Shell and Tube Heat Exchangers. International Journal of Engineering Development and Research. 2017. Vol. 5, Issue 2. P. 296–299. ISSN: 2321-9939.
3. Barraza-Colón J., Picón-Núñez M. Improved heat recovery using twisted tube exchanger technology. Cleaner Engineering and Technology. 2022. Vol. 10. 100557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100557>.
4. Design, Fabrication and Performance of Twisted Tube Heat Exchanger / K. Patel et al. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2022. Vol. 10, Issue III. P. 1132–1135. DOI: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.40836>.
5. Danielsen S. O. Investigation of a twisted-tube type shell-and-tube heat exchanger : Master of Science in Energy and Environment thesis. Trondheim : Norwegian University of Science and Technology, 2009. 119 p.

4.

### Додаток Е Комп'ютерне моделювання

Модернізація трубного простору кожухотрубного теплообмінника шляхом впровадження труб типу "скручена труба" вирішує більшість проблем, притаманних традиційним конструкціям.

Загальний вигляд схеми модернізації зображено на рисунку Е.1 (а), а поперечний переріз самої скрученої труби показано на рисунку Е.1 (б).

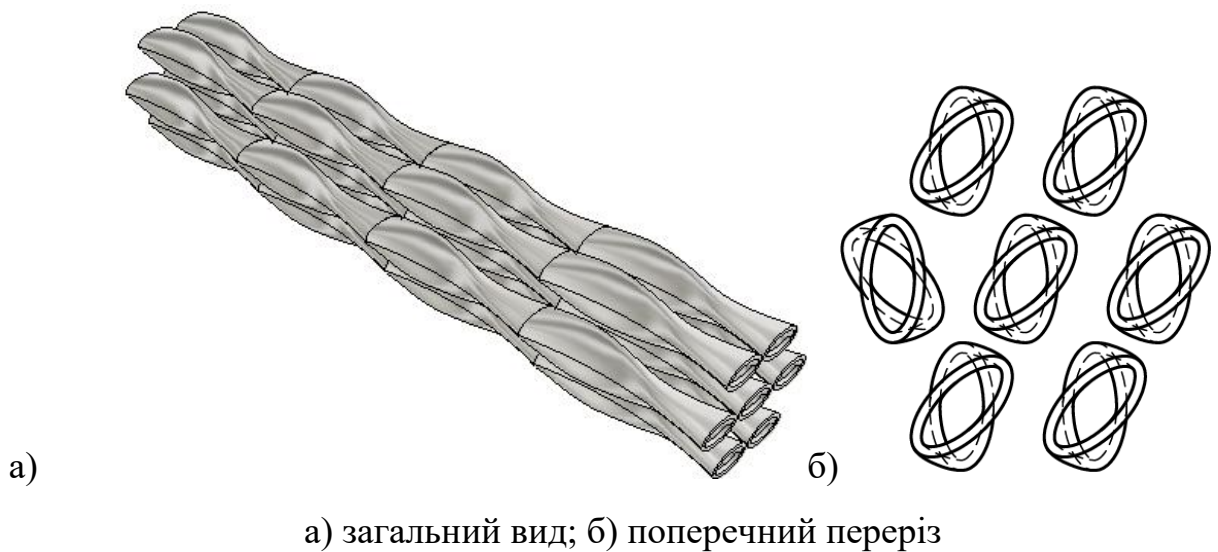


Рисунок Е.1 – Схема модернізації закрученої труби

В основі цієї технології лежить концепція закрученого потоку рідини, яка підвищує теплогидравлічні характеристики та збільшує загальну ефективність теплопередачі.

Теплова продуктивність теплообмінника зі скрученими трубами (ТСТ) є відмінною: його термічна ефективність сягає 90-95%, тоді як у традиційних апаратів цей показник становить 60-70%.

Конструктивною особливістю є жорстке вирівнювання труб, що усуває ймовірність вібрації, спричиненої потоком.

Крім того, відсутність зон застою та рівномірний потік значно зменшують забруднення поверхонь.

Використання ТСТ дозволяє зменшити габаритні розміри апарата у 1,25–1,4 рази при збереженні теплової потужності.

Для дослідження процесів, що відбуваються в модернізованому каналі, було проведено комп'ютерне моделювання, результати симуляційного експерименту якого наведені на рисунку Е.2.

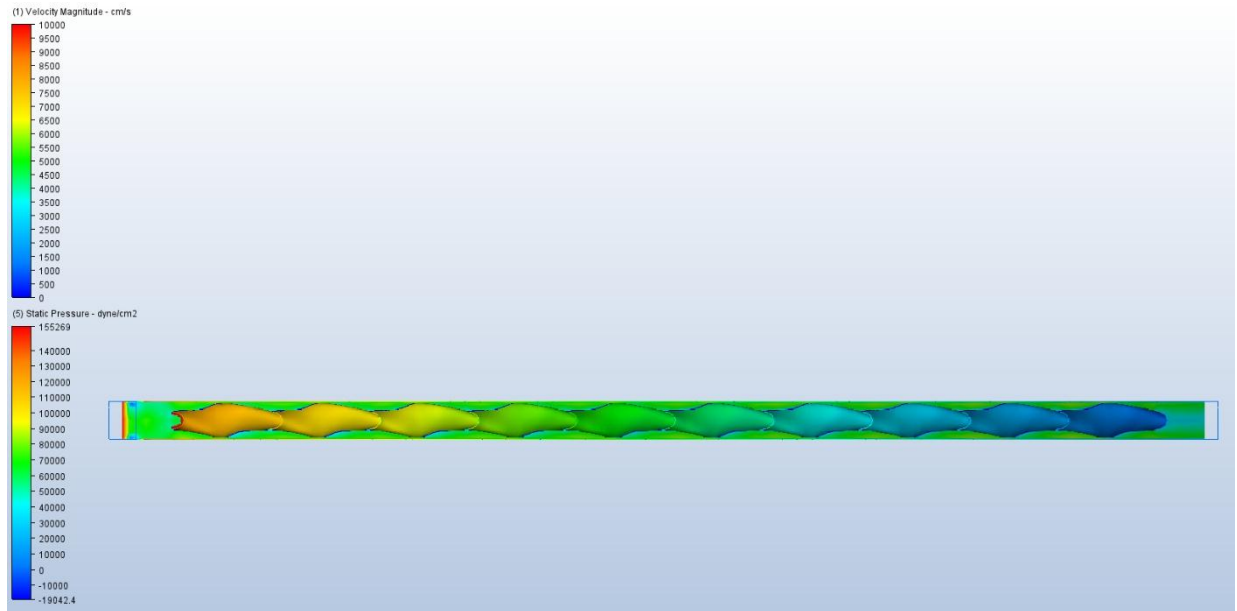


Рисунок Е.2 – Результати симуляційного експерименту

Моделювання демонструє, що завдяки унікальній геометрії каналу потік набуває стійкого спіралеподібного руху. Розподіл швидкостей, із максимумом на периферії та мінімумом біля стінок, свідчить про турбулізацію та руйнування пристінного шару, що є ключовим фактором інтенсифікації теплообміну.

CFD-ескіз потоку повітря в скрученій трубі наведено на рисунку Е.3.

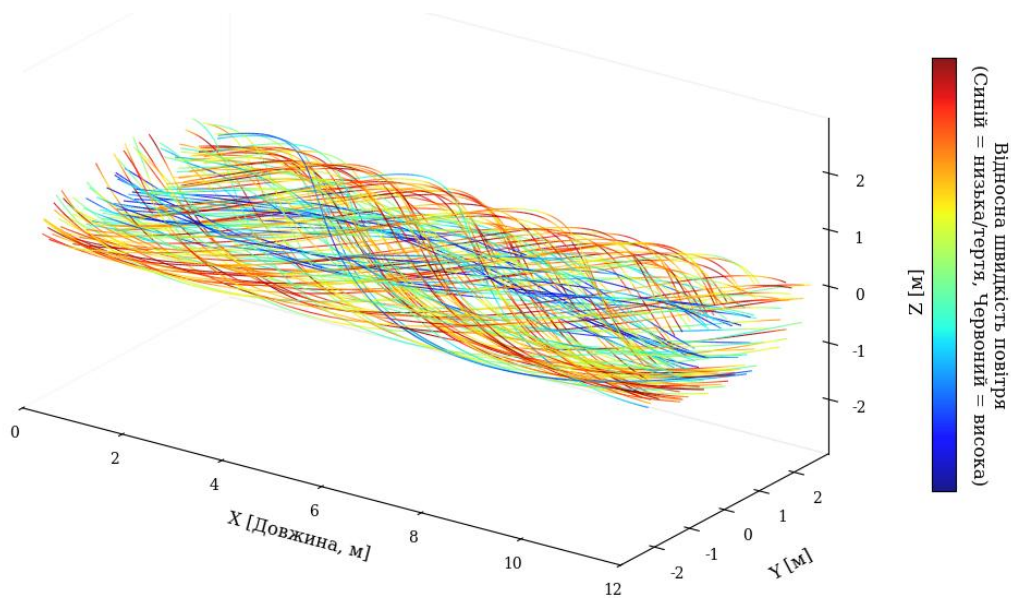


Рисунок Е.3 – CFD-ескіз потоку повітря в скрученій трубі

Детальні кількісні результати порівняння традиційної та модернізованої конструкцій зведено таблиці Е.1

Дані таблиці 1 свідчать, що при незмінній тепловій потужності 4338.9 кВт впровадження скручених труб дозволило зменшити їх кількість з 918 до 594 одиниць.

При цьому перепад тиску на кожуховій стороні знизився з 4.31 кН/м<sup>2</sup> до 3.136 кН/м<sup>2</sup>.

Внутрішній коефіцієнт тепловіддачі зріс з 3810.9 до 6956.45 Вт/м<sup>2</sup>°С, а зовнішній — з 2737 до 4450.34 Вт/м<sup>2</sup>°С. У результаті загальний коефіцієнт теплопередачі (U) значно зріс з 834.8 Вт/м<sup>2</sup>°С до 1065.58 Вт/м<sup>2</sup>°С.

Незважаючи на те, що ТСТ має вищу початкову вартість, термін його окупності є коротшим завдяки суттєвому покращенню ефективності та експлуатаційних характеристик.

Таблиця Е.1 – Результати впровадження модернізації

Параметр	Одиниця виміру	Звичайна конструкція труб	Модернізована конструкція труб (кручена труба)
Теплова потужність (Q)	кВт	4338.9	4338.9
Площа поверхні труб	м <sup>2</sup>	0.30	0.46
Кількість труб	-	918	594

Внутрішній тепловіддачі	коефіцієнт	Вт/м <sup>2</sup> °С	3810.9	6956.45
Зовнішній тепловіддачі	коефіцієнт	Вт/м <sup>2</sup> °С	2737	4450.34
Загальний теплопередачі	коефіцієнт	Вт/м <sup>2</sup> °С	834.8	1065.58
Перепад тиску труб		кН/м <sup>2</sup>	7.26	11.26
Перепад тиску кожуха		кН/м <sup>2</sup>	4.31	3.136
Термічна ефективність		%	60-70	90-95