

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

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

ДО ЗАХИСТУ ДОПУЩЕНО
Завідувач кафедри МАХНВ
_____ Андрій СТЕПАНЮК
“ _____ ” _____ 2026 р.

Дипломний проєкт

**на здобуття ступеня бакалавра
за освітньо-професійною програмою «Комп’ютерно-інтегровані
технології проектування обладнання хімічної інженерії»
спеціальності 133 «Галузеве машинобудування»
на тему: «Модернізація дефлегматора виробництва фенолу та ацетону»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ЛБ-21
Швединський Дмитрій Олександрович _____

Керівник:

старший викладач кафедри МАХНВ, доктор філософії
Григорій Сергійович Подиман _____

Консультант з охорони праці:

Старший викладач кафедри ОПЦБ, канд. техн. наук
Ковтун Андрій Іванович _____

Консультант з економіки:

Старша викладачка кафедри МАХНВ, канд. техн. наук
Гусарова Олена Віталіївна _____

Рецензент:

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(прізвище, ім’я, по батькові)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань.

Студент _____

Київ – 2026

**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 – перший (бакалаврський)

Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування

Освітньо-професійна програма: Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри МАХНВ

_____ Андрій СТЕПАНЮК

“ ____ ” _____ 2026 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Швединському Дмитрію Олександровичу

1. Тема проєкту: Модернізація дефлегматора виробництва фенолу та ацетону

Керівник проєкту: старший викладач кафедри МАХНВ, доктор філософії

Григорій Сергійович Подиман

Затверджені наказом по університету від « ____ » _____ 2026 р. № _____

2. Термін подання студентом проєкту: 08 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до проєкту: Спроекувати дефлегматор установки виробництва фенолу та ацетону. Температура води на вході в теплообмінник – 293 К; температура води на виході – 307 К; гарячий теплоносій – пара ацетону температурою 340 К, витрата $G=4,8$ кг/с. робочий тиск в міжтрубному просторі – МПа, в трубному просторі – 1 МПа.

4. Зміст пояснювальної записки: а) основна частина: обґрунтувати вибір конструкцій; виконати розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкцій, а саме: технологічний, параметричний розрахунки, розрахунки на міцність і надійність елементів дефлегматора;

б) охорона праці: провести аналіз відповідності апарата до вимог охорони праці, викласти основні вимоги безпечної експлуатації апарата;

в) економічна частина: обґрунтувати модернізацію установки та оцінити її ефективність;

г) навести рекомендації щодо монтажу та експлуатації апарата;

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень, плакатів, презентацій тощо): технологічна схема – А1, складальний кресленик апарата – А1, складальний кресленик корпусу – А1, складальний кресленик кришки – А2, складальний кресленик опорної лапи – А3, кресленик трубної решітки – А3, плакат модернізації – А3, модель апарата – А3. До всіх складальних креслень специфікація А4.

6. Консультанти розділів проекту:

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Андрій КОВТУН старший викладач, к.т.н.		
Техніко-економічне обґрунтування доцільності вдосконалення	Олена ГУСАРОВА старша викладачка, к.т.н.		

7. Дата видачі завдання: 20 квітня 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту	Строк виконання етапів проекту	Примітка
1	2	3	4
1	Узгодження теми, вихідних даних, визначення джерел інформації. Обґрунтування актуальності проекту.	20.04.26	
2	Патентне дослідження. Формування змісту модернізації (на основі зміни технологічної схеми, конструкції апарату, його елементів, речовин).	22.04.26	
3	Опис установки. Схема установки. Вибір і опис конструкції. Технічна характеристика установки, апарату. Вибір матеріалів.	25.04.26	
4	Параметричний розрахунок: визначення основних розмірів апарату.	02.05.26	
5	Розробка складальних креслеників апарату і його складальних одиниць.	09.05.26	
6	Розрахунки на міцність. Розробка алгоритмів та програм розрахунку.	15.05.26	
7	Уточнення графічної частини проекту та специфікацій.	20.05.26	
8	Обґрунтування економічної доцільності модернізації.	23.05.26	
9	Розробка вимог до апарату з питань охорони праці.	26.05.26	
10	Оформлення пояснювальної записки. Перевірка відповідності проекту діючим нормам за змістом і оформленням. Підготовка до захисту. Складення плану викладення доповіді, окремих питань.	30.05.26	
11	Попередній захист проекту.	08.06.26	
12	Корегування проекту за результатами попереднього захисту. Отримання рецензії, відзиву. Підготовка до захисту.	09.06.26	

Студент

_____ Дмитрій ШВЕДИНСЬКИЙ
(підпис)

Керівник проекту

_____ Григорій ПОДИМАН
(підпис)

РЕФЕРАТ

УДК 66.081

Модернізація дефлегматора виробництва фенолу та ацетону: Дипломний проєкт освітнього ступеня «Бакалавр» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; керівник Г.С. Подиман. – Київ, 2026. – 123 с.: іл. Викон. – Д. О. Швединський. – Бібліогр.: 94 с.

Пояснювальна записка складається зі вступу, 8 розділів, висновків, переліку використаних джерел із 45 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 96 сторінку основного тексту, містить 18 рисунків, 4 таблиці та 4 додатки.

Метою дипломного проєкту є модернізація дефлегматора виробництва фенолу та ацетону для підвищення ефективності теплообміну, зниження енергетичних витрат та забезпечення стабільної роботи технологічної установки. Запропоновані технічні рішення спрямовані на покращення процесу конденсації парів та підвищення експлуатаційної надійності обладнання.

У проєкті виконано тепловий, гідравлічний, конструктивний та механічний розрахунки апарата, визначено його основні геометричні параметри, проведено перевірку елементів конструкції на міцність і жорсткість. Розроблено рекомендації щодо монтажу та експлуатації дефлегматора, виконано оцінку стандартизації й уніфікації конструкції, техніко-економічне обґрунтування модернізації та аналіз відповідності проєктних рішень вимогам охорони праці.

Графічна частина проєкту включає технологічна схема – А1, складальний кресленик апарата – А1, складальний кресленик корпусу – А1, складальний кресленик кришки – А2, складальний кресленик опорної лапи – А3, кресленик трубної решітки – А3. До всіх складальних креслень специфікація А4. Також наведено схему модернізації та тривимірні моделі апарата.

ДЕФЛЕГМАТОР, КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИЙ АПАРАТ,
КОНДЕНСАЦІЯ ПАРІВ, ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК, МОДЕРНІЗАЦІЯ
ОБЛАДНАННЯ.

ABSTRACT

UDK 66.081

Modernization of the reflux condenser for the production of phenol and acetone: Diploma project for the degree of Bachelor / Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute; supervisor G.S. Podyman. – Kyiv, 2026. – 123 p.: ill. Executor – D. O. Shvedinsky. – Bibliography: 94 p.

The explanatory note consists of an introduction, 8 chapters, conclusions, a list of sources used from 45 names. The total volume of the work is 96 pages of the main text, contains 18 figures, 4 tables and 4 appendices.

The purpose of the diploma project is to modernize the reflux condenser for the production of phenol and acetone to increase the efficiency of heat exchange, reduce energy costs and ensure stable operation of the technological installation. The proposed technical solutions are aimed at improving the vapor condensation process and increasing the operational reliability of the equipment.

The project includes thermal, hydraulic, structural and mechanical calculations of the apparatus, its main geometric parameters are determined, structural elements are tested for strength and rigidity. Recommendations for the installation and operation of the reflux condenser are developed, an assessment of standardization and unification of the structure is performed, a feasibility study of the modernization and an analysis of the compliance of design solutions with labor protection requirements are performed.

The graphic part of the project includes a technological scheme - A1, assembly drawing of the apparatus - A1, assembly drawing of the body - A1, assembly drawing of the cover - A3, assembly drawing of the support leg - A3, drawing of the pipe grid - A3. All assembly drawings are accompanied by an A4 specification. A modernization scheme and three-dimensional models of the apparatus are also provided.

DEPHLEGMATOR, SHELL-TUBE HEAT EXCHANGER, VAPOR CONDENSATION, RECTIFICATION, THERMAL CALCULATION, EQUIPMENT MODERNIZATION.

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

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

**ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ
на здобуття ступеня бакалавра**

Спеціальність: 133 Галузеве машинобудування

Освітня програма: Комп'ютерно-інтегровані технології проектування
обладнання хімічної інженерії

на тему: Модернізація дефлегматора виробництва фенолу та ацетону

Київ – 2026

ЗМІСТ

Вступ.....	13
1 Призначення та область застосування апарату.....	16
1.1 Опис технологічного процесу.....	16
1.2 Вибір типу підігрівача і його місце в технологічній схемі.....	18
2 Технічна характеристика підігрівача.....	21
3 Опис та обґрунтування вибраної конструкції апаратів.....	22
3.1 Опис конструкції, основних складальних одиниць та деталей апарата.....	22
3.2 Опис модернізації апарата	24
3.3 Вибір матеріалів	26
3.4 Порівняння основних показників розробленої конструкції підігрівача з аналогами	28
3.4 Патентний огляд конструкції підігрівача	35
4 Охорона праці.....	42
5 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність	49
конструкцій.....	49
5.1 Визначення основних геометричних розмірів апарата.....	49
5.2 Розрахунок штуцерів	55
5.3 Гідравлічний розрахунок.....	57
5.4 Розрахунок еліптичного днища	59
5.5 Розрахунок опорних лап.....	61
5.6 Розрахунок фланцевого з'єднання	64
5.7 Розрахунок геометричних розмірів деталей для укріплення поодинокого отвору	74

Відповідальна організація МАХНВ	Технічне узгодження: НОВОХАТ	Вид документа Пояснювальна записка	Статус документа опублікований			
Власник документа КПІ ім. Ігоря Сікорського	Розробник документа: ШВЕДИНСЬКИЙ	Назва, додаткова назва Модернізація дефлегматора виробництва фенолу та ацетону	ЛБ21.07.101.001 ПЗ			
	Документ затверджено: ПОДИМАН		Інд.змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 8

5.8 Розрахунок товщини теплоізоляційного шару	77
5.9 Розрахунок товщини стінки циліндричної обичайки.....	79
6 Рекомендації з монтажу та експлуатації апарата	81
7 Рівень стандартизації та уніфікації	84
8 Техніко-економічне обґрунтування модернізації.....	86
Висновки	90
Conclusions	92
Перелік посилань	94
Додаток А Документація до патентного дослідження.....	100
Додаток Б Програмний розрахунок елементу апарата	104
Додаток В Патенти, які використані в патентному дослідженні.....	106
Додаток Г Публікації автора.....	111

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ, УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА ТЕРМІНІВ

C – теплоємність, Дж/(кг·K);

D – діаметр апарата, м;

F – площа поверхні теплообміну, м²;

K – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·K);

N – потужність, Вт;

V – об'єм, м³;

m – маса, кг;

Δt_6 – менша різниця температур на кінцях теплообмінника, °C;

Δt_m – менша різниця температур на кінцях теплообмінника, °C;

$\Delta t_{\text{сер}}$ – середня різниця температур, °C;

G – масова витрата, кг/с;

n – кількість труб;

p – тиск, Па;

Q – кількість переданої теплоти, Вт;

S – площа поперечного перерізу, м²;

$t_{\text{Ік}}$ – кінцева температура теплоносія, К (°C);

$t_{\text{Іп}}$ – початкова температура теплоносія, К (°C);

$t_{\text{пл}}$ – температура плівки конденсату, К (°C);

z – кількість ходів;

$[\sigma]$ – напруження, МПа;

E – модуль пружності, МПа;

φ – коефіцієнт зварного шва;

b_4 – ширина плити основи опорної лапи, а також ширина кільця жорсткості, м;

b_2 – ширина підкладного листа, м;

g – відстань між середніми лініями ребер, м;

h_1 – висота опорної лапи, м;

S – товщина стінки обичайки, днища, м;

C – додаток до розрахункової товщини, м;
 S_0 , - товщина втулки фланця, м;
 h - товщина фланця, м;
 h_n – товщина прокладки, м;
 $D_{\text{сп}}$ - середній діаметр прокладки, м;
 f_b - площа поперечного перерізу для болтів, м;
 Q_d - навантаження від тиску, м;
 y_n - податливість прокладки, м/МН;
 y_b – податливість болтів м/МН;
 l_0 - параметр довжини втулки, м;
 y_ϕ - Кутова податливість фланця при затяжці, $\frac{1}{\text{МН}\cdot\text{м}}$;
 S_Δ - Еквівалентна товщина конічної втулки фланця, м;
 $h_{\text{ш}}$ – товщина шайби, м;
 σ_{b1} - напруження в болтах фланцевих з'єднань при затягуванні, МПа;
 σ_{b3} - напруження в болтах фланцевих з'єднань робочих умовах, МПа;
 $[\sigma]_M^b$ - допустиме напруження для болтів при затягуванні, МПа;
 σ_R^M - радіальне напруження плоского фланця в умовах затягування, МПа;
 σ_0^P - меридіальне згинаюче напруження в обичайці плоского фланця, МПа;
 $[\theta]_K$ - допустимий кут повороту кільця вільного фланця, рад.;
 d_{op} - діаметр отвору, м;
 R_{tot} - пір теплопередачі теплоізоляційної конструкції, $(\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}$;
 R_k – термічний опір теплоізоляційної конструкції, $(\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}$;
 δ_k - товщина ізоляції для циліндричної поверхні, м;
 α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;
 δ – товщина стінки труби, м;
 ξ – коефіцієнт місцевого опору;
 λ – коефіцієнт теплопровідності, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$;
 μ – коефіцієнт динамічної в'язкості, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості, $\text{м}^2/\text{с}$;

ρ – густина, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Вступ

Фенол та ацетон займають стратегічно важливе місце у сучасній хімічній промисловості, виступаючи базовими продуктами органічного синтезу та ключовими напівпродуктами для отримання широкого спектра матеріалів і речовин. Фенол є незамінною сировиною для виробництва фенолформальдегідних, епоксидних та полікарбонатних смол, синтетичних волокон, антиоксидантів і фармацевтичних препаратів, тоді як ацетон широко використовується як універсальний розчинник, компонент органічного синтезу та проміжний продукт у виробництві метилметакрилату, бісфенолу-А та інших важливих сполук. Зростання попиту на полімерні матеріали, фармацевтичну продукцію та високоякісні хімічні реагенти обумовлює постійне підвищення вимог до ефективності, надійності та екологічної безпеки виробництва фенолу й ацетону [1, 2].

Промислове отримання фенолу та ацетону здійснюється переважно кумольним методом, який базується на окисненні ізопропілбензену (кумолу) з подальшим розкладанням гідропероксиду кумолу. Даний процес характеризується високою селективністю, проте супроводжується складною багатостадійною технологічною схемою, що включає реакційні, масообмінні та теплообмінні операції. Важливою складовою цієї схеми є процеси конденсації та ректифікації, ефективність яких значною мірою визначається роботою теплообмінного обладнання, зокрема дефлегматорів [3].

Дефлегматор як різновид теплообмінного апарата виконує функцію часткової конденсації парової суміші з метою її розділення за різницею температур кипіння компонентів. Його робота забезпечує повернення частини конденсату у вигляді флегми в ректифікаційну колону, що сприяє підвищенню ступеня розділення та стабілізації технологічного режиму. Таким чином, ефективність дефлегматора безпосередньо впливає на якість кінцевих продуктів, енергетичні витрати процесу та загальну продуктивність установки.

Разом із тим аналіз сучасного стану експлуатації дефлегматорів свідчить про наявність ряду суттєвих недоліків їх конструкцій. До них належать недостатня інтенсивність теплопередачі, нерівномірний розподіл теплоносіїв у міжтрубному просторі, утворення застійних зон, підвищений гідравлічний опір, а також обмежена можливість компенсації температурних деформацій. У сукупності ці фактори призводять до зниження коефіцієнта теплопередачі, збільшення енергоспоживання та погіршення умов експлуатації апарата.

Сучасні науково-технічні тенденції розвитку теплообмінного обладнання спрямовані на інтенсифікацію процесів теплопередачі та оптимізацію гідродинаміки потоків. Це досягається шляхом використання ребрих поверхонь теплообміну, впровадження ефективних типів перегородок (сегментних, диско-кільцевих, спіральних), застосування труб із внутрішнім профілюванням, а також удосконалення схем руху теплоносіїв. Значна увага приділяється також підвищенню надійності конструкцій, зниженню матеріалоємності та забезпеченню умов для ефективного очищення поверхонь теплообміну.

Метою дипломного проєкту є модернізація дефлегматора виробництва фенолу та ацетону шляхом удосконалення його конструкції, виконання необхідних інженерних розрахунків та обґрунтування технічних рішень, спрямованих на підвищення ефективності теплообміну, надійності, енергоефективності та безпечності експлуатації обладнання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати технологічну схему виробництва фенолу та ацетону та визначити функції дефлегматора у технологічному процесі;
- виконати аналіз існуючих конструкцій дефлегматорів і кожухотрубних теплообмінних апаратів, а також провести патентний огляд сучасних технічних рішень;
- обґрунтувати вибір конструкції модернізованого дефлегматора;
- виконати тепловий розрахунок апарата;

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 14
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

- провести конструктивний та гідравлічний розрахунки дефлегматора і визначити його основні технічні характеристики;
- визначити основні геометричні параметри апарата;
- виконати розрахунки на міцність та жорсткість основних елементів конструкції;
- обґрунтувати вибір конструкційних матеріалів для виготовлення апарата;
- розробити складальне креслення дефлегматора та креслення його основних вузлів і деталей;
- виконати креслення технологічної схеми модернізованої установки та відповідні специфікації;
- провести аналіз відповідності конструкції вимогам охорони праці та розробити заходи щодо безпечної експлуатації обладнання;
- виконати техніко-економічне обґрунтування модернізації та оцінити її ефективність;
- розробити рекомендації щодо монтажу, технічного обслуговування та експлуатації дефлегматора.

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 15
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

1 Призначення та область застосування апарату

1.1 Опис технологічного процесу

На рисунку 1.1 показана технологічна схема виробництва фенолу та ацетону через гідроперекис ізопропілбензолу [4].

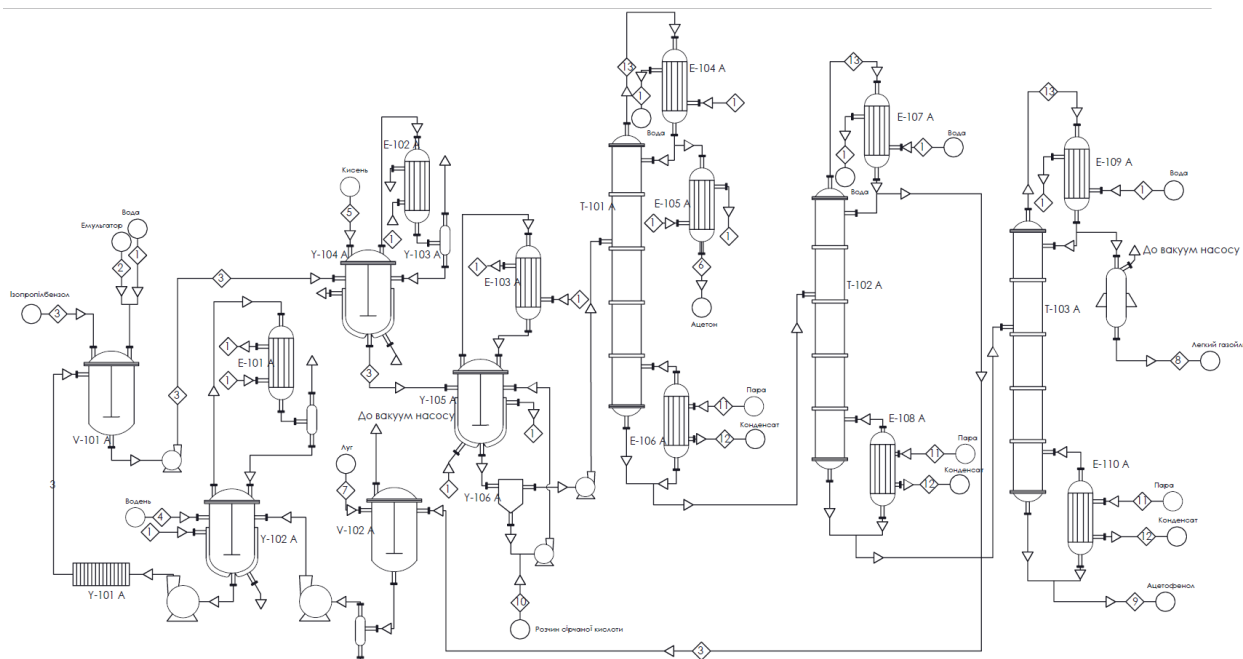


Рисунок 1.1 – Схема виробництва фенолу та ацетону через гідроперекис ізопропілбензолу [4]

В апараті 1 при інтенсивному перемішуванні готують емульсію ізопропілбензолу у воді. Для цього в апарат подають свіжий ізопропілбензол з цеху алкілування бензолу, зворотний ізопропілбензол, очищений гідруванням від а-метилстиролу, емульгатор (лаурилсульфат або натрію стеарат) і воду, в якій попередньо розчиняють карбонат натрію. Співвідношення свіжого та

зворотного ізопропілбензолу приблизно 1:4. Емульсію ізопропілбензолу перекачують в апарат 6 для окиснення. Тут при 130°C через рідину під тиском пропускають повітря. Після того як у гідроперекисі перетвориться близько 25% ізопропілбензолу, реакційну рідину направляють на розкладання сірчаною кислотою в апарат 9.

Розкладання гідроперекису ізопропілбензолу на фенол та ацетон протікає з виділенням великої кількості тепла (400 ккал на 1 кг гідроперекису). Швидкість реакції залежить від концентрації застосовуваної кислоти і гідроперекису. При пропущенні газоподібного сірчистого ангідриду через концентрований гідроперекис розкладання супроводжується вибухом. У присутності 1%-ної сірчаної кислоти розкладання триває 5 год, при використанні 10%-ної кислоти воно триває 1 год. Тому процес розкладання гідроперекису на фенол і ацетон у виробничих умовах проводять при дотриманні відповідних запобіжних заходів (інтенсивне відведення реакційного тепла, застосування досить розведеної сірчаної кислоти і т. д.). Надлишкове тепло відводять у зворотному холодильнику 8.

З апарату 9 рідина перетікає розділювач 11; сірчана кислота, що відокремлюється, знову може бути використана для розкладання гідроперекису. Продукти реакції, що містять після виділення сірчаної кислоти: 8% ацетону, 14% фенолу, 76% непрореагованого ізопропілбензолу і до 2% домішок (а-метилстирол, ацетофенон та ін), направляють на ректифікацію. У ректифікаційній колоні 12 відганяють ацетон; в колоні 13 при розрідженні відганяють ізопропілбензол з домішками а-метилстиролу та фенолу. Ці домішки заважають нормальному перебігу реакції окиснення, тому ізопропілбензол піддають очищенню.

В апараті 10 його обробляють водним розчином лугу, в результаті чого фенол перетворюється на фенолят і перетворюється на розчин, який у розділювальному посудині відокремлюється від вуглеводневого шару. В апараті 3 через ізопропілбензол у присутності суспендованого металевого

нікелю (каталізатор) пропускають водень. При цьому а-метилстирол гідрується в ізопропілбензол. Далі ізопропілбензол через фільтр 2 направляють на змішування зі свіжим ізопропілбензолом апарат 1.

Кубова рідина з колони 13 перетікає в колону ректифікації 14, де при розрідженні фенол відокремлюється від ацетофенону. Пари фенолу відводять з верхньої частини колони і кристалізують у приймачі 18. Кубова рідина з колони містить 14 головним чином ацетофенон.

На 1 т фенолу, що отримується за кумольним методом, витрачається 1,288 т ізопропілбензолу; при цьому додатково виходить близько 600 кг ацетону [4].

1.2 Вибір типу підігрівача і його місце в технологічній схемі

У технологічній схемі виробництва фенолу та ацетону кумольним методом важливе місце займає дефлегматор, який встановлюється у верхній частині ректифікаційної колони та забезпечує часткову конденсацію парового потоку. Його основна функція полягає у створенні флегмового потоку, що повертається в колону, завдяки чому досягається підвищення ефективності масообміну та глибини розділення компонентів [5].

Дефлегматор працює в умовах конденсації багатокомпонентних парових сумішей, що характерно для процесів ректифікації органічних речовин. Як зазначається у фундаментальних роботах з теплопередачі, процес конденсації є одним із найбільш інтенсивних видів теплообміну, оскільки супроводжується виділенням прихованої теплоти пароутворення, що суттєво підвищує ефективність теплообмінного апарата [6].

Для забезпечення стабільної роботи технологічної установки до дефлегматора висуваються вимоги щодо високої інтенсивності теплообміну, мінімального гідравлічного опору, рівномірного розподілу потоків та стійкості до забруднення поверхонь. З урахуванням умов експлуатації у виробництві фенолу та ацетону найбільш доцільним є застосування вертикального

кожухотрубного дефлегматора. Такий тип апарата широко використовується в хімічній промисловості завдяки своїй універсальності, надійності та здатності працювати при значних теплових навантаженнях [7].

Вертикальне виконання дефлегматора має ряд технологічних переваг. По-перше, воно забезпечує природне стікання конденсату під дією сили тяжіння, що запобігає накопиченню рідини та утворенню застійних зон. По-друге, така конструкція сприяє рівномірному змочуванню поверхні труб і стабільності процесу теплообміну. Крім того, вертикальні апарати зручні для інтеграції безпосередньо у верхню частину ректифікаційної колони, що дозволяє зменшити теплові втрати та гідравлічні опори системи.

Для інтенсифікації теплообміну у міжтрубному просторі доцільно застосовувати перегородки (бафли), які змінюють напрям руху потоку та сприяють його турбулізації. Як показано у сучасних дослідженнях, використання сегментних або диско-кільцевих перегородок дозволяє підвищити коефіцієнт тепловіддачі за рахунок покращення гідродинамічних умов руху теплоносія [8].

Крім того, ефективність дефлегматора може бути підвищена шляхом використання труб з розвиненою поверхнею теплообміну, зокрема оребрених або профільованих труб. Такі рішення сприяють збільшенню площі теплообміну та інтенсифікації процесу без значного збільшення габаритів апарата [9].

Місце дефлегматора у технологічній схемі визначається його функціональним призначенням. Він працює у взаємозв'язку з ректифікаційною колоною та кип'ятильником, утворюючи замкнений тепловий контур. Пари, що виходять з верхньої частини колони, надходять у дефлегматор, де частково конденсуються; частина конденсату повертається у вигляді флегми, а інша частина відводиться як дистилат. Отже, вибір вертикального кожухотрубного дефлегматора є технічно та економічно обґрунтованим рішенням для виробництва фенолу та ацетону. Його застосування дозволяє забезпечити

ефективний перебіг процесу ректифікації, підвищити якість продуктів і знизити енергетичні витрати установки в цілому [8, 9].

2 Технічна характеристика підігрівача

Технічна характеристика теплообмінного апарату наведена у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічні характеристики

№	Параметри, розмірність	Значення
1	Продуктивність за парами ацетону, кг/с	4,8
2	Температура початкова парів ацетону, К	340
3	Температура кінцева парів ацетону, К	340
4	Температура початкова води, К	293
5	Температура кінцева води, К	307
6	Поверхня теплообміну, м ²	147
7	Кількість труб, штук	389
8	Зовнішній діаметр труб, м	0,02
9	Внутрішній діаметр труб, м	0,016
10	Довжина труб, м	6
11	Діаметр апарату, м	0,6
12	Габаритні розміри, мм:	
	- довжина	934
	- висота	6657
	- ширина	934

3 Опис та обґрунтування вибраної конструкції апаратів

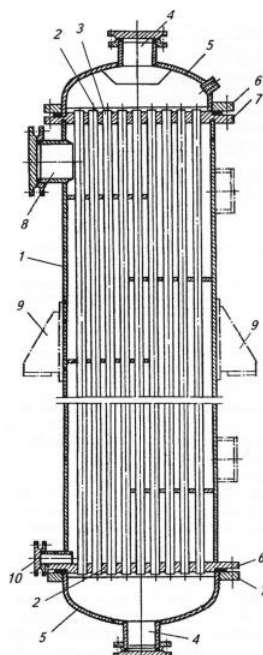
3.1 Опис конструкції, основних складальних одиниць та деталей апарата

Конструкція дефлегматора, наведена на рисунку 3.1, включає циліндричний корпус (кожух) 1, всередині якого розміщено трубний пучок, закріплений у двох трубних решітках 2. У даному випадку застосовується нерухома (жорстко закріплена) трубна решітка, що забезпечує герметичне розділення міжтрубного та трубного просторів. Трубна решітка виконується з металу, стійкого до корозійного впливу робочих середовищ, та має отвори для щільного закріплення теплообмінних труб методом вальцювання або зварювання. Трубний пучок складається з прямолінійних труб 3, розташованих у певному порядку (зазвичай шаховому або трикутному), що забезпечує максимальну щільність розміщення та ефективну площу теплообміну. Всередині труб рухається охолоджуючий агент (як правило, вода або інший теплоносіє), тоді як у міжтрубному просторі відбувається конденсація парів технологічної суміші.

Для інтенсифікації теплообміну у міжтрубному просторі встановлюються поперечні перегородки, які спрямовують потік пари та конденсату, створюючи турбулентний режим руху. Це дозволяє підвищити коефіцієнт тепловіддачі та забезпечити більш ефективне використання поверхні теплообміну. Перегородки можуть мати сегментну або диско-кільцеву форму, а їх розташування визначається з урахуванням допустимого гідравлічного опору.

У верхній частині апарата передбачено патрубок для підведення парової суміші, яка надходить з ректифікаційної колони. У процесі руху через міжтрубний простір пари охолоджуються і частково конденсуються. Утворений конденсат стікає вниз під дією сили тяжіння та відводиться через відповідний

патрубок, причому частина його повертається у колону як флегма. Неконденсовані пари виводяться з апарата через верхній вихідний патрубок.



1 – корпус, 2 – трубні решітки, 3 – нагрівальні трубки, 4, 8, 10 – штуцери, 5 – кришки, 6 – прокладки, 7 – фланці, 9 – опорні лапи

Рисунок 3.1 – Вертикальний кожухотрубний дефлегматор [10]

Нижня частина дефлегматора обладнана патрубками для підведення та відведення охолоджуючого агента. Зазвичай реалізується протитечійна схема руху теплоносіїв, яка забезпечує максимальну різницю температур уздовж апарата і, відповідно, підвищує ефективність теплопередачі.

Особливістю дефлегматора з нерухомою трубною решіткою є відсутність компенсації температурних деформацій між кожухом і трубами, що обмежує область його застосування умовами невеликих температурних перепадів. Проте в умовах роботи дефлегматора у виробництві фенолу та ацетону ці обмеження є допустимими, оскільки температурні градієнти не перевищують критичних значень [11].

3.2 Опис модернізації апарата

Сучасні підходи до модернізації кожухотрубних дефлегматорів базуються на:

- оптимізації геометрії трубного пучка (зміна кроку розташування труб);
- використанні оребрених або профільованих труб;
- впровадженні турбулізаторів у трубному просторі;
- модифікації конфігурації перегородок у міжтрубному просторі [10].

Найбільш перспективним напрямом є зміна гідродинаміки міжтрубного простору без істотного збільшення гідравлічного опору (рисунок 3.2).

Пропонується застосування системи сегментованих перегородок спеціальної конфігурації, розташованих під кутом $15\text{--}25^\circ$ до осі апарата з чергуванням напрямку сегментації. Така компоновка формує квазіспіральний (наближений до гвинтового) рух парового потоку в міжтрубному просторі.

Суть удосконалення полягає у наступному:

1. Інтенсифікація турбулентності. Квазіспіральний рух запобігає утворенню застійних зон і забезпечує рівномірне омивання трубного пучка.
2. Підвищення коефіцієнта тепловіддачі. Завдяки зростанню локальної швидкості потоку зменшується товщина прикордонного шару, що підвищує інтенсивність конденсації.
3. Рівномірність температурного поля. Поліпшується розподіл температур у міжтрубному просторі, зменшується ризик локального перегріву чи переохолодження.
4. Оптимізація гідравлічного опору. Порівняно з традиційними поперечними перегородками, сегментована система дозволяє досягти більшого коефіцієнта теплопередачі при помірному прирості втрат тиску.

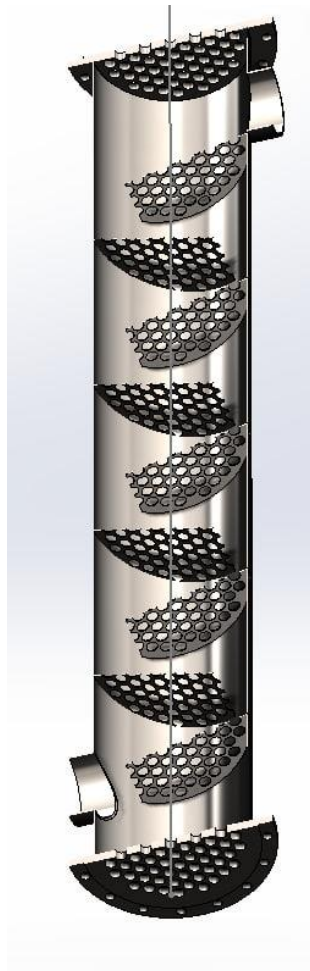


Рисунок 3.2 –Зображення перегородок під кутом

Для процесу часткової конденсації фенолу та ацетону це означає підвищення ступеня селективної конденсації важкої фракції, стабілізацію флегмового числа та зменшення енергетичних витрат на охолодження.

Впровадження сегментованих перегородок із формуванням квазіспірального потоку забезпечує:

- підвищення коефіцієнта теплопередачі на 10–20 %;
- зменшення металомісткості апарата за рахунок скорочення довжини теплообмінної поверхні при тій самій продуктивності;
- зниження експлуатаційних витрат;
- підвищення стабільності роботи ректифікаційної колони.

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 25
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

Таким чином, модернізація дефлегматора є не лише конструктивним удосконаленням, а й інструментом підвищення енергоефективності всього виробництва фенолу та ацетону [11].

3.3 Вибір матеріалів

Вибір конструкційних матеріалів для вертикального кожухотрубного дефлегматора з нерухомою трубною решіткою здійснюється з урахуванням умов реалізації процесу (температури, тиску), фізико-хімічних властивостей робочих середовищ, а також вимог до міцності, корозійної стійкості та теплопровідності. У виробництві фенолу та ацетону апарат працює в умовах контакту з органічними речовинами (ацетон, фенол, ізопропілбензол), залишковими кислотами, а також при підвищених температурах (до 120–150 °C) і помірних тисках. Це обумовлює необхідність застосування матеріалів, стійких до корозійного впливу органічних середовищ та здатних забезпечити довготривалу експлуатацію без втрати міцності [12].

Для виготовлення корпусу (кожуха) дефлегматора доцільно використовувати низьколеговані або вуглецеві сталі, такі як 16ГС або 09Г2С, які характеризуються достатньою міцністю, доброю зварюваністю та відносно низькою вартістю. За довідковими даними, межа міцності таких сталей становить 390–540 МПа, що є достатнім для роботи при помірних тисках. Однак з огляду на можливу наявність агресивних компонентів у паровій фазі доцільним є застосування внутрішніх антикорозійних покриттів або використання нержавіючих сталей для більш відповідальних елементів [13, 14].

Трубний пучок є основним теплообмінним елементом, тому до матеріалу труб висуваються підвищені вимоги щодо теплопровідності та корозійної стійкості. У даному випадку доцільно застосовувати корозійностійкі аустенітні сталі, зокрема 12Х18Н10Т (аналог AISI 321) або AISI 316L. Ці матеріали характеризуються високою стійкістю до дії органічних кислот і продуктів

окиснення, а також мають достатню теплопровідність ($\sim 14\text{--}16 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$) та межу міцності на рівні $500\text{--}700 \text{ МПа}$. Використання таких сталей дозволяє знизити інтенсивність корозійних процесів і збільшити термін служби апарата.

Трубні решітки, які забезпечують герметичне закріплення труб, виготовляються з матеріалів, сумісних із матеріалом труб для запобігання гальванічній корозії. У більшості випадків застосовують ті ж марки сталей, що й для трубного пучка (наприклад, 12X18H10T), або комбіновані варіанти з антикорозійним наплавленням. Це забезпечує надійність з'єднання та довговічність конструкції [15, 16]. Для виготовлення перегородок (бафлів) та допоміжних елементів допускається використання вуглецевих або низьколегованих сталей, оскільки вони працюють у менш агресивних умовах. Водночас у випадку підвищеної корозійної активності середовища також може бути доцільним застосування нержавіючих сталей або нанесення захисних покриттів.

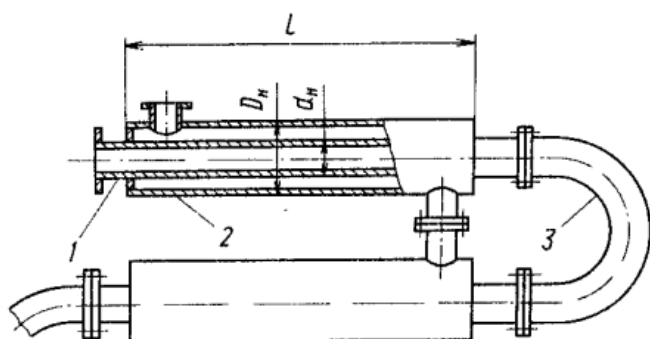
Важливою характеристикою матеріалів є їх теплопровідність, яка безпосередньо впливає на ефективність теплообміну. Згідно з даними літератури, теплопровідність вуглецевих сталей становить близько $45\text{--}60 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, тоді як для нержавіючих сталей цей показник значно нижчий ($14\text{--}25 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$). Проте вибір матеріалу труб визначається не лише теплопровідністю, а й корозійною стійкістю, яка у даному випадку є більш критичною [17].

Крім механічних та теплофізичних властивостей, при виборі матеріалів враховують їх технологічність (зварюваність, оброблюваність), доступність та економічну доцільність. Як зазначається у сучасних дослідженнях з проєктування теплообмінників, оптимальним є компроміс між вартістю матеріалу та його експлуатаційними характеристиками.

3.4 Порівняння основних показників розробленої конструкції підігрівача з аналогами

1) Теплообмінники типу «труба в трубі»

Теплообмінники типу «труба в трубі» (рисунок 3.3) використовуються при відносно невеликих теплових навантаженнях, коли необхідна площа теплообміну, як правило, не перевищує 20–30 м². Конструктивно кожен елемент такого апарата складається із зовнішньої труби більшого діаметра (кожуха) та розміщеної всередині неї співвісно теплообмінної труби.



1 – теплообмінна труба; 2 – кожухова труба; 3 – калач

Рисунок 3.3 – Нерозбірний теплообмінник типу «труба в трубі» [18]

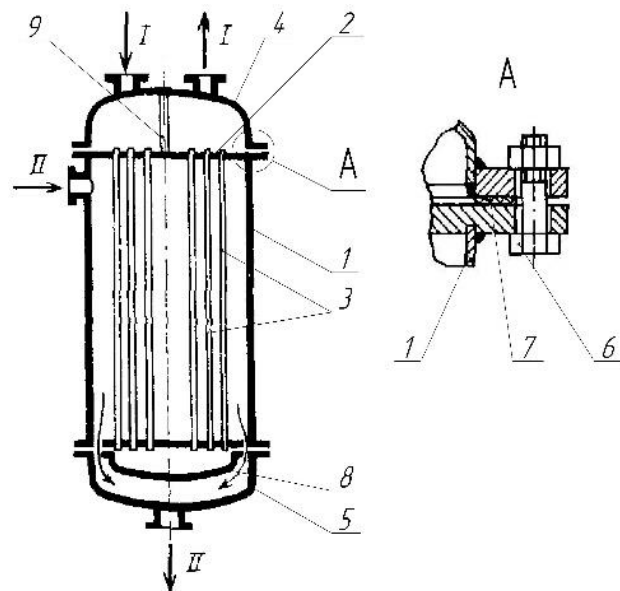
Теплообмінні труби з'єднуються між собою послідовно за допомогою знімних колін (калачів), що забезпечує послідовний рух теплоносія. Зовнішні труби (кожухи) також з'єднуються послідовно за допомогою приварених штуцерів. У випадку значних витрат теплоносіїв такі теплообмінники компонуються з декількох паралельно з'єднаних секцій, що дозволяє збільшити сумарну площу поперечного перерізу як трубного, так і міжтрубного просторів.

Залежно від конструктивного виконання теплообмінники «труба в трубі» поділяються на нерозбірні однопоточні (одно-, дво- та багатосекційні) та розбірні одно-, дво- і багатопоточні. Нерозбірні конструкції можуть мати один або декілька ходів теплоносія, зазвичай парну їх кількість.

До основних переваг теплообмінників типу «труба в трубі» належать високі коефіцієнти теплопередачі, що досягаються завдяки значним швидкостям руху обох теплоносіїв, а також відносна простота виготовлення. Водночас такі апарати мають ряд недоліків, серед яких — значні габарити, підвищена матеріаломісткість через використання зовнішніх труб, що безпосередньо не беруть участі у теплообміні, а також ускладнений процес очищення міжтрубного простору [18].

2) Кожухотрубчастий теплообмінник з U-подібними трубами

Теплообмінний апарат складається з корпусу (кожуха) 1, у якому встановлена нерухома трубна решітка 2, до якої закріплюються U-подібні теплообмінні труби 3, теплообмінник зображено на рисунку 3.4.



1 – кожух; 2 – трубна решітка; 3 – U-подібні труби; 4 – кришка; 5 – перегородка; 6 – болт; 7 – прокладка; I і II – теплоносії

Рисунок 3.4 – Кожухотрубчастий теплообмінник з U-подібними трубами [19]

До кожуха за допомогою болтових з'єднань 6 із використанням ущільнювальних прокладок 7 приєднується кришка 4. Компенсація температурних деформацій у даній конструкції досягається за рахунок осьового переміщення трубного пучка відносно кожуха. У кришці передбачена

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 29
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

перегородка 5, яка розділяє трубний простір на дві зони та забезпечує протитечійний або змінний напрямок руху теплоносія.

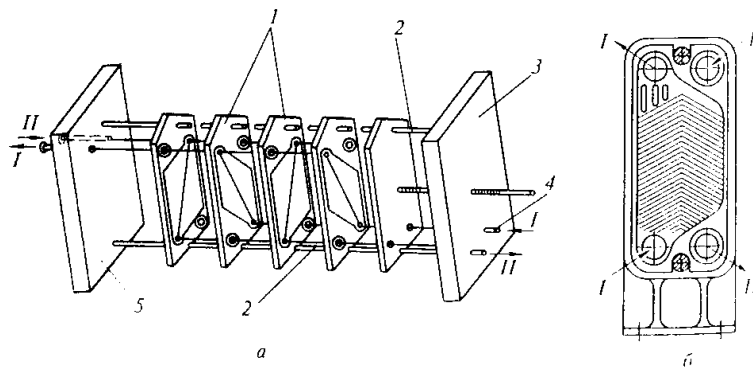
Один із теплоносіїв (I) подається у трубний простір і рухається по U-подібних трубах 3, після чого змінює напрямок і повертається у простір між кришкою 4 та трубою решіткою 2. Другий теплоносій (II) проходить через міжтрубний простір. Передача теплоти відбувається через стінки труб, що розділяють середовища, забезпечуючи ефективний теплообмін між потоками.

Переваги: дана конструкція дозволяє компенсувати значні температурні деформації, що виникають при великій різниці температур між трубами та кожухом; характеризується високою надійністю та конструктивною простотою; забезпечує зручність проведення ремонтних робіт і очищення апарата від відкладень.

Недоліки: зміна напрямку руху теплоносія в трубах призводить до зростання гідравлічного опору; конструкція ускладнює процес монтажу труб у трубні решітки; також виникають труднощі при очищенні внутрішніх поверхонь труб від накипу [19].

3) Пластинчастий теплообмінний апарат Пластинчасті теплообмінні апарати (рисунок 3.5) складаються з пакета паралельно розташованих пластин, виготовлених із тонких гофрованих металевих листів. Між пластинами за допомогою спеціальних еластичних ущільнень формуються вузькі канали шириною приблизно 3–6 мм.

Через одні канали рухається гарячий теплоносій, через інші — холодний. Режим руху теплоносіїв може бути як протитечійним, так і перехресним. Завдяки гофрованій поверхні пластин стінки каналів мають хвилясту форму, що сприяє інтенсивній турбулізації потоку і, відповідно, підвищенню коефіцієнта теплопередачі.



а – складальна схема; б – пластина; 1 – пластини; 2 – балка; 3, 5 – рухомі та нерухомі плити; 4 – патрубок; I, II - теплоносія

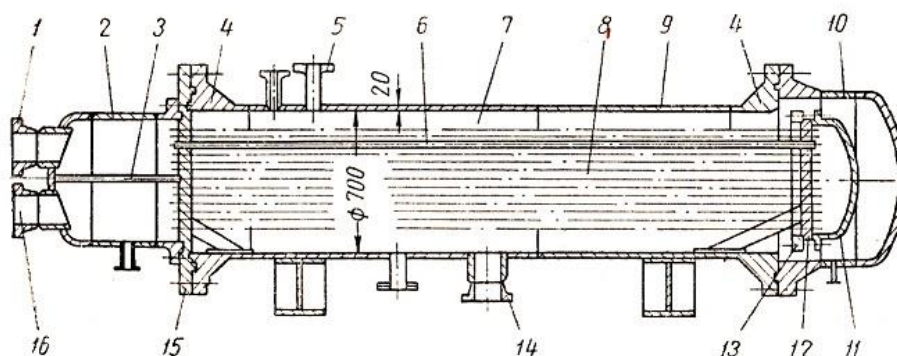
Рисунок 3.5 – Пластиначастий теплообмінник [20]

До основних переваг пластиначастих теплообмінників належать їх компактність, високі значення коефіцієнтів теплопередачі, а також можливість повного розбирання апарата для очищення теплообмінної поверхні від забруднень.

Разом із тим такі апарати мають і певні недоліки. Зокрема, вони обмежені у застосуванні при високих тисках, вимагають забезпечення надійної герметизації великої кількості каналів, а також ускладнюють підбір еластичних ущільнювальних матеріалів, стійких до агресивних середовищ [20].

4) Теплообмінник з плаваючою головкою

Теплообмінник з плаваючою головкою (рисунок 3.6) є одним із різновидів кожухотрубних апаратів і застосовується у випадках, коли необхідно компенсувати значні температурні деформації. Даний апарат призначений для нагрівання рідини, що рухається трубним простором, за рахунок тепла пари, яка подається у міжтрубний простір [20].



1, 5, 14, 16 – штуцери, 2, 10, 11 - кришка, 3 - перегородка, 4 – фланці, 6 - труби, 7 – корпус, 8 – трубний пучок, 9 – обичайка, 12, 15 – трубна решітка, 13 – болти

Рисунок 3.6 – Теплообмінник з плаваючою головою [19]

Конструктивно теплообмінник складається з корпусу 7, трубного пучка 8 та двох кришок (днищ) 2 і 10. Корпус виконаний у вигляді циліндричної обичайки 9, з привареними фланцями 4 для з'єднання з іншими елементами апарата. Усередині корпусу розміщується трубний пучок, який складається з великої кількості прямих труб 6, закріплених у двох трубних решітках 12 і 15 методом вальцювання.

Один кінець трубного пучка жорстко кріпиться до корпусу через трубну решітку 15 за допомогою болтового з'єднання. Інший кінець виконаний у вигляді плаваючої головки: він закривається кришкою 11, яка з'єднується з кільцем 13 болтами, але не має жорсткого з'єднання з корпусом. Така конструкція забезпечує можливість вільного осьового переміщення трубного пучка при температурних деформаціях.

Другий торець корпусу закривається кришкою 10, що складається з фланця, обичайки та сферичного днища. З протилежного боку до трубної решітки 15 приєднується кришка 2, яка також має фланець, обичайку та сферичне днище і розділена перегородкою 3 на дві секції. До кожної секції підведено по два штуцери (1 і 16) для подачі та відведення теплоносія.

Під час роботи апарата трубний пучок нагрівається і подовжується. Плаваюча головка компенсує ці температурні деформації, дозволяючи трубному пучку переміщуватися відносно корпусу без виникнення додаткових напружень, що підвищує надійність і довговічність конструкції.

Перевагами апарату є ефективна компенсація температурних деформацій при значній різниці температур між трубами і кожухом; підвищена надійність роботи та довговічність апарата; можливість застосування при високих температурах і тисках; зручність очищення трубного пучка та проведення ремонтних робіт.

До недоліків мона віднести складну конструкцію порівняно з апаратами з нерухомою трубною решіткою; вища вартість виготовлення та монтажу; більша маса та габарити; складність забезпечення герметичності вузла плаваючої головки [20]. У таблиці 3.1 наведено порівняльну характеристику теплообмінників та дефлегматора.

Таблиця 3.1 – Порівняльна характеристика теплообмінників та дефлегматора

Показник	Теплообмінник «труба в трубі» [18]	Пластинчастий теплообмінник [19]	Кожухотрубний U-подібний [20]	Кожухотрубний з плаваючою головкою [20]	Модернізований вертикальний дефлегматор з нерухомим і трубними решітками
Робота при підвищеному тиску	До 10 МПа (5)	до 1,6 МПа (1)	До 10 МПа (5)	до 4,0 МПа (3)	до 4,0 МПа (5)
Допустима температура експлуатації	до 400 °С у корпусі (5)	до 180 °С (2)	до 400 °С у корпусі (5)	до 350 °С у корпусі (4)	до 350 °С у корпусі (4)

Продовження таблиці 3.1

Показник	Теплообмінник «труба в трубі» [18]	Пластинчастий теплообмінник [19]	Кожухотрубний U-подібний [20]	Кожухотрубний з плаваючою головкою [20]	Модернізований вертикальний дефлегматор з нерухомими трубними решітками
Компенсація температурних деформацій	добра (5)	Обмежена (2)	добра (5)	добра (5)	відсутня/обмежена (2)
Механічне очищення	міжтрубний простір очищати складно (2)	зручне розбирання та очищення (5)	трубний простір обмежено, переважно хімічне очищення U-колін (2)	добре очищення труб і міжтрубного простору (5)	трубний простір очищується, міжтрубний — обмежено (3)
Компактність	середня (3)	висока (5)	середня (3)	середня (3)	середня (3)
Конструктивна простота	висока (4)	середня (3)	висока (4)	нижча через складну конструкцію (2)	висока (5)
Металоємність / собівартість	Підвищена (2)	помірна (4)	помірна (4)	висока (2)	помірна (4)
Придатність до роботи саме як дефлегматор у схемі ректифікації	обмежена (2)	обмежена через прокладки та вузькі канали (2)	добра (4)	добра (4)	дуже добра (5)
Надійність у безперервному хімічному виробництві	середня (3)	середня (3)	висока (4)	висока (4)	висока (5)
Σ	31	27	36	32	36

Отже, запропонована конструкція вертикального дефлегматора з нерухожими трубними решітками є найбільш доцільною для даного процесу, оскільки поєднує конструктивну простоту, достатню міцність, придатність до роботи при підвищених температурах і тисках та добру інтеграцію у верхню частину ректифікаційної колони. Його головною перевагою є висока відповідність умовам дефлегмації парів фенолу, ацетону та супутніх компонентів. Недоліком є обмежена компенсація температурних деформацій, однак для прийнятого режиму роботи це не є критичним. За сукупністю показників саме ця конструкція отримує найбільший сумарний бал.

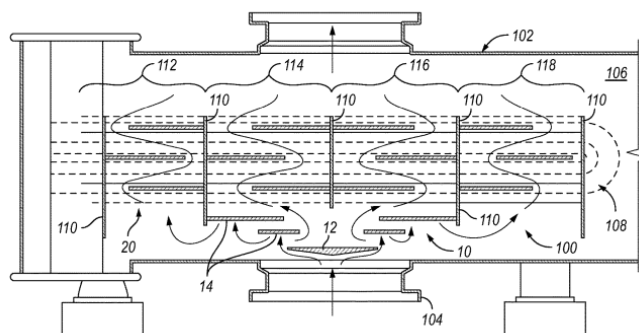
3.4 Патентний огляд конструкції підігрівача

Патент US 20250146759A1 [21] описує впровадження модернізованої системи розподілу потоку у кожухо-трубному теплообміннику, що дозволяє значно підвищити ефективність тепловіддачі та рівномірність розподілу потоку в корпусній частині апарата.

Запропонований винахід включає комплекс досить специфічних елементів для розподілу потоку (рисунок 3.7): перед входом у пучок труб (108) у кожухотрубному теплообміннику (102) через вхідне сопло (104) встановлюється розподільник вхідного потоку (10), який включає вхідну розподільну пластину (12) та кілька віконних розподільних пластин (14) з вікнами (18), розташованих у вертикальному штабелі.

Кожна наступна віконна розподільна пластина (14) має вікно (18) більшої площі, що формує багатоетапний розподіл потоку перед основним контактом із пучком труб (108). Далі, у зоні пучка труб (108), розташована система скерування потоку (20), яка включає перегородки (110) зі спеціальними отворами, що забезпечують переміщення флуїду не лише вздовж осі труб, але й у поперечному напрямку між зонами (112, 114, 116, 118) пучка труб. Така конфігурація в кожусі (106) викликає змієподібну траєкторію потоку,

підвищення турбулентності, рівномірне охоплення всієї поверхні пучка труб (108) і рівномірну швидкість руху у всіх зонах (112, 114, 116, 118) корпусу, сформованих перегородками (110).



10 – розподільник вхідного потоку, 12 – вхідна розподільна пластина,
14 – віконна розподільна пластина, 18 – вікно, 20 – система скерування
потоку, 100 – розподільник потоку з боку кожуха, 102 – кожухотрубний
теплообмінник, 104 – вхідне сопло, 106 – кожух, 108 – пучок труб,
110 – перегородки, 112, 114, 116, 118 – зони пучка труб

Рисунок 3.7 – Схема теплообмінника [21]

Завдяки таким елементам модернізації підвищується коефіцієнт тепловіддачі, зменшуються застійні зони та досягається більш ефективне використання всієї поверхні теплообміну, що може підвищити теплову ефективність апарата на 30–50 % порівняно з традиційними теплообмінниками без таких розподільчих елементів.

Переваги такого рішення полягають у значному покращенні тепловіддачі та рівномірності потоку, що сприяє підвищенню продуктивності та стабільності технологічного процесу. Недоліки включають складність конструкції, необхідність точного виготовлення розподільних пластин та потенційне збільшення гідравлічних втрат через складні маршрути течії.

Патент WO 2026029715A1 [22] стосується конструкції мікроканального теплообмінного апарата, який оптимізує процес теплопередачі шляхом застосування дуже вузьких каналів для проходження робочих середовищ у

протитечійному режимі. В основі цього винаходу лежить множина мікроканалів, розташованих усередині плоских чи пластинчастих елементів апарата. Завдяки мінімальному гідравлічному діаметру таких каналів загальна площа теплообміну значно перевищує площу традиційного кожухо-трубного теплообмінника при тих же габаритах. Протитечійна конфігурація потоків сприяє максимальному температурному градієнту вздовж усього апарата, що дозволяє ефективніше здійснювати передачу тепла між гарячою і холодною фазами.

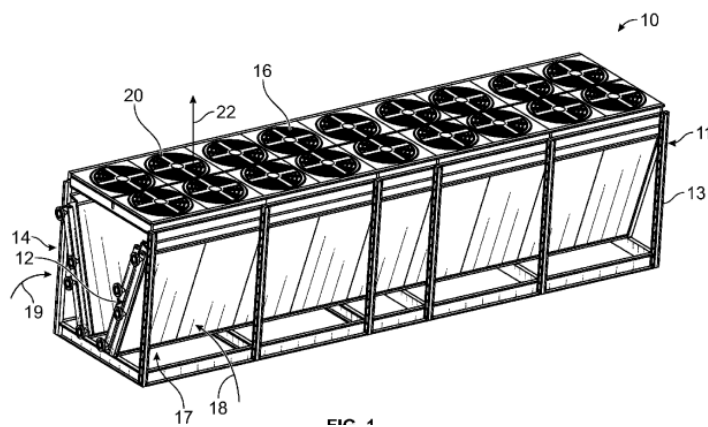
Мікроканальні апарати особливо корисні у випадках, коли компактність і висока ефективність теплопередачі без значного збільшення об'єму є критичними, наприклад, у малогабаритних колонних секціях або у системах рекуперації тепла. За рахунок великої кількості каналів і високого коефіцієнта тепловіддачі такі апарати можуть суттєво зменшити загальний об'єм дефлегматора чи іншого теплообмінного блока при збереженні або збільшенні теплової потужності.

Серед ключових позитивних аспектів мікроканальної конструкції варто зазначити компактність, високу турбулентність у каналах, збільшену контактну площу та можливість роботи у широкому діапазоні робочих умов. Основні обмеження пов'язані з складністю технології виготовлення, високими вимогами до обробки мікроканалів і ризиком їх засмічення при роботі з рідинами, що містять тверді частки, що може зменшити надійність у важких промислових умовах.

Патент WO2025128631A1 [23] описує вдосконалений трубний теплообмінник у складі сухого охолоджувача (10) (рисунок 3.8), призначений для підвищення ефективності тепловіддачі в апаратах, де теплообмін відбувається між внутрішнім робочим середовищем у теплообмінних котушках (12, 14) та зовнішнім середовищем — повітрям, що подається через повітрозабірники (17) і рухається у напрямках (18, 19). Такий тип теплообмінника широко застосовується в системах відведення тепла,

охолодження повітря та промислових процесах. У даній конструкції теплообмінні котушки (12, 14) розміщені в межах зовнішньої конструкції (11) та рами (13), а повітря за допомогою вентиляторів (16) спрямовується через ребристу поверхню котушок (12, 14) і відводиться через вихідні отвори (20) у напрямку (22).

Відмінною ознакою є оптимізована геометрія розташування елементів теплообмінних котушок (12, 14), що забезпечує покращення аеродинамічних характеристик потоку повітря та інтенсифікацію теплопередачі без збільшення габаритів сухого охолоджувача (10).



10 – сухий охолоджувач, 11 – зовнішня конструкція, 12 – теплообмінна котушка, 13 – рама, 14 – теплообмінна котушка, 16 – вентилятор, 17 – повітрязабірник, 18 – напрямок руху повітря, 19 – напрямок руху повітря, 20 – вихідний отвір повітря, 22 – напрямок виходу повітря.

Рисунок 3.8 – Будова теплообмінника [23]

Принцип роботи базується на організації потоків повітря, які перетинають ребра в напрямку, перпендикулярному довжині ребер, що сприяє передачі тепла від гарячої рідини в трубах до повітря, що проходить через ребра. Ребра сформовані так, що різниця відстаней між рядами труб дозволяє повітрю «відновлювати» швидкість між рядами, зменшуючи перепади тиску та підвищуючи ефективність передачі тепла.

Модернізація у цій конструкції полягає саме у застосуванні оптимізованих співвідношень між відстанями труб у різних напрямках, а також у можливості отримувати подібну теплову потужність з меншою кількістю труб, ніж у традиційних аналогах. Це досягається завдяки геометричному налаштуванню, яке дозволяє зберегти ефективну площу теплообміну, не збільшуючи матеріальні витрати.

Основні переваги такого рішення полягають у покращеній тепловіддачі при меншій кількості робочих елементів, що знижує матеріальні витрати на виготовлення апарата, та у зменшеному падінні тиску повітряного потоку, що сприяє зниженню енергетичних витрат на приведення повітря в рух.

До можливих недоліків відносяться технічні складнощі у виробництві ребер і труб із заданим співвідношенням відстаней, а також необхідність точного дотримання геометрії для досягнення запланованого ефекту.

Патент US20260009601A1 [24] присвячений конструкції теплообмінників, у яких використовуються розширення з перемінною теплопровідністю поверхні. Це технічне рішення дозволяє локально змінювати теплові властивості поверхні теплообміну для оптимізації тепловіддачі відповідно до потреб технологічного процесу.

Принцип роботи такого теплообмінника базується на використанні локально різних значень теплопровідності, що дозволяє керувати розподілом температурних полів усередині апарата. За рахунок цього можна досягати більш рівномірного розподілу теплового потоку, підвищувати локальні коефіцієнти тепловіддачі в критичних зонах та зменшувати ризик перегріву або «мертвих зон».

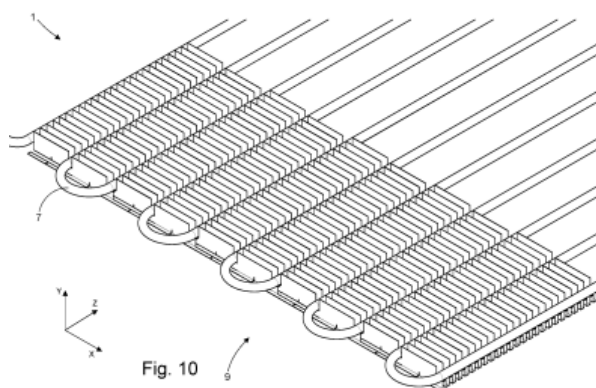
Модернізація полягає у введенні структур із змінним термопровідним профілем, які замінюють однорідні, стандартні елементи. Це може бути реалізовано як комбінація різних металів, покриттів, або зміненої товщини виступів, пластин чи ребер. Такий підхід дозволяє значно розширити

функціональні можливості теплообмінників у порівнянні з традиційними конструкціями.

Переваги цього рішення полягають у вищому ступені контролю над розподілом теплового потоку, здатності адаптувати апарат до змінних умов експлуатації та можливості підвищити ефективність теплообміну без значного збільшення габаритів апарата. Це особливо корисно у складних технологічних схемах, де змінні теплові навантаження можуть викликати нерівномірний розподіл температур.

Серед потенційних недоліків слід зазначити ускладнення конструкції та виготовлення через застосування різнорідних або регульованих теплопровідних матеріалів. Це може вимагати спеціалізованих технологічних процесів і збільшити вартість виготовлення у порівнянні зі стандартними апаратами.

У патенті WO2025026773A2 [25] показано теплообмінник для ефективного теплообміну між газовим середовищем (наприклад повітрям) та іншим робочим середовищем у трубах через оптимізовану ламельну структуру, що спрощує виробництво і забезпечує покращений тепловий контакт без складних операцій.



1 – пластинчаста структура, 9 – ребристий теплообмінник

Рисунок 3.9 – Схема теплообмінника [25]

Новий ламельний теплообмінник (рисунок 3.9) складається з трубопроводу для робочого середовища і ламельної структури, що утворена з

безперервного листа металу, який чергується вверх-вниз і має отвори для розміщення труб. Така конфігурація дозволяє забезпечити простір для проходження газопотоку в двох напрямках (в поздовжньому та поперечному) між ламелями та поліпшити контакт між потоками.

Основна ідея полягає в тому, що листова ламельна структура містить шпари (slots), які розділяють секції ламелей від горизонтальних перемичок. Ці перемички формують приймальні отвори, в які вставляється трубка другого середовища (яке може бути рідким, газоподібним або піддаватися фазовій зміні) у щільному термічному контакті з ламелями.

Головна модернізація полягає у використанні одного безперервного листа з прорізами та вигинами, що формує ламелі та перемички одночасно, замість традиційних окремих ребер, що прилаштовуються або навиваються на труби окремо. Такий підхід зменшує складність виготовлення, полегшує забезпечення рівномірного контакту між ламелями та трубами і може знизити матеріальні витрати виробництва зберігаючи або підвищуючи теплову ефективність.

Цей винахід ілюструє загальну тенденцію в сучасних теплообмінниках — заміну традиційних окремих ребер на інтегровані ламельні конструкції, що дозволяють досягати кращого розподілу повітряного потоку, збільшеної площі теплообміну та одночасно спрощеної виробничої технології.

Аналіз патентів показує, що сучасна модернізація теплообмінників і дефлегматорів спрямована на підвищення ефективності теплопередачі, рівномірності потоків і зменшення енергоспоживання. Усі патенти демонструють два підходи: оптимізацію класичних конструкцій і впровадження інноваційних архітектур (мікроканали, змінна теплопровідність, ламелі), що дозволяє підвищити продуктивність, енергетичну ефективність та стабільність колонних процесів. Основними обмеженнями залишаються складність виготовлення, підвищена чутливість до забруднень та потреба у точному контролі конструкцій.

4 Охорона праці

Сучасне виробництво фенолу та ацетону, що реалізується кумольним методом, належить до категорії складних і потенційно небезпечних хімічних процесів, у яких поєднуються підвищені температури, тиски та використання токсичних і легкозаймистих речовин. У цих умовах питання охорони праці набувають не лише нормативного, а й системного значення, оскільки безпосередньо впливають на надійність функціонування обладнання, безпеку персоналу та екологічну стабільність виробництва.

Експлуатація дефлегматора як теплообмінного апарата, що працює у складі ректифікаційної установки, супроводжується дією комплексу небезпечних і шкідливих факторів. Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори при експлуатації дефлегматора наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні небезпечні та шкідливі виробничі фактори при експлуатації дефлегматора

Виробничий фактор	Джерело виникнення	Можливі наслідки	Заходи захисту
Підвищений тиск (до 4 МПа)	Робота ректифікаційної системи	Руйнування обладнання, травмування персоналу	Запобіжні клапани, манометри, аварійне відключення
Висока температура (до 200 °С)	Теплообмінні поверхні	Термічні опіки	Теплоізоляція, огороження
Пари фенолу	Витоки через ущільнення та фланці	Отруєння, хімічні опіки	Герметизація, вентиляція, ЗІЗ
Пари ацетону	Випаровування продукту	Отруєння, пожежа, вибух	Вибухозахищене обладнання
Шум	Насоси, компресори	Погіршення слуху, втома	Шумоізоляція, навушники
Вібрація	Обертове обладнання	Професійні захворювання	Віброгасники, балансування
Електричний струм	Електрообладнання	Ураження струмом	Заземлення, захисне відключення

Передусім це підвищений тиск (до 2–4 МПа) та температура робочих середовищ (до 150–200 °С), які створюють ризик руйнування обладнання у разі порушення герметичності. Відповідно до вимог НПАОП 0.00-1.81-18 «Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском», усі апарати такого типу повинні бути оснащені засобами контролю та захисту, зокрема запобіжними клапанами, манометрами та системами аварійного відключення [27].

Особливу небезпеку становлять хімічні фактори, пов'язані з наявністю парів ацетону та фенолу. Ацетон є легкозаймистою рідиною з низькою температурою спалаху (близько –18 °С), що обумовлює високий ризик утворення вибухонебезпечних сумішей з повітрям. Фенол, у свою чергу, належить до токсичних речовин із гранично допустимою концентрацією (ГДК) у повітрі робочої зони 0,3 мг/м³, тоді як для ацетону цей показник становить 200 мг/м³. Перевищення цих концентрацій може призвести до гострих отруєнь, ураження дихальної системи та шкіри [28].

Не менш важливими є фізичні фактори виробничого середовища, зокрема шум і вібрація, що виникають під час роботи насосного та компресорного обладнання. Згідно з санітарними нормами, допустимий рівень шуму не повинен перевищувати 80–85 дБ, а параметри мікроклімату (температура 18–25 °С, відносна вологість 40–60 %) повинні відповідати вимогам ДСН 3.3.6.042-99. Забезпечення цих умов досягається шляхом впровадження ефективних систем вентиляції відповідно до ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування». Для зменшення шумового навантаження рекомендується застосовувати шумоізоляційні кожухи на насосах і компресорах, а також використовувати віброгасні опори під обладнанням [29].

Аналіз технологічного процесу дозволяє виділити основні ризики на різних етапах життєвого циклу обладнання. Під час монтажу найбільш імовірними є механічні травми, пов'язані зі стропуванням і переміщенням важких конструкцій, а також ураження електричним струмом. У період

експлуатації основну небезпеку становлять розгерметизація апарата, витік токсичних речовин, опіки від нагрітих поверхонь та можливість вибуху. Під час проведення ремонтних робіт додаються ризики, пов'язані з роботою у замкнутих просторах, контактом із залишковими агресивними речовинами та наявністю залишкового тиску в системі.

Система заходів з охорони праці передбачає комплекс технічних, організаційних та індивідуальних рішень. До технічних заходів належать герметизація апаратів, встановлення запобіжної арматури (відповідно до ISO 4126), теплоізоляція поверхонь (з метою зниження температури зовнішніх стінок до безпечного рівня не вище 45 °C), а також заземлення обладнання (опір заземлювального контуру не більше 4 Ом). Організаційні заходи включають проведення інструктажів, допуск до роботи лише кваліфікованого персоналу, оформлення нарядів-допусків на виконання небезпечних робіт та регулярний контроль технічного стану обладнання.

Особлива роль відводиться засобам індивідуального захисту, які повинні відповідати вимогам ДСТУ EN ISO 13688 [30]. Персонал забезпечується спеціальним одягом, захисними окулярами, рукавицями, а також засобами захисту органів дихання (фільтрувальні протигazi типу А для органічних парів). Це дозволяє значно знизити ризик впливу шкідливих факторів на організм людини. ахист органів дихання здійснюється за допомогою фільтрувальних протигазів з фільтрами марки А, призначеними для захисту від органічних парів і газів. У разі проведення аварійно-рятувальних робіт або ліквідації значних витоків токсичних речовин застосовуються ізолювальні дихальні апарати. Для запобігання потраплянню шкідливих речовин на слизові оболонки очей працівники забезпечуються герметичними захисними окулярами або захисними лицьовими щитками. Під час виконання ремонтних робіт, пов'язаних із можливим контактом із фенолом, використовуються кислотолугостійкі рукавиці з нітрилового або неопренового матеріалу, які характеризуються високою стійкістю до дії органічних речовин.

Спецодяг працівників повинен відповідати вимогам чинних стандартів та забезпечувати захист від механічних пошкоджень, забруднення хімічними речовинами та накопичення статичної електрики. Для цього використовуються антистатичні костюми з бавовняної тканини зі спеціальним просоченням, захисне взуття з нековзною та антистатичною підошвою, а також захисні каски під час проведення монтажних або ремонтних робіт.

При роботі з фенолом та ацетоном використовуються:

- фільтрувальний протигаз марки А1;
- протигаз марки А2 або АВЕК для аварійних ситуацій;
- ізолювальний дихальний апарат при ліквідації великих витоків.

Фільтри марки А призначені для захисту від органічних парів і газів з температурою кипіння понад 65 °С.

Важливим аспектом є забезпечення пожежної безпеки, оскільки виробництво фенолу та ацетону належить до категорії пожежонебезпечних. Відповідно до ДБН В.1.1-7:2016, приміщення повинні бути оснащені системами пожежогасіння, вибухозахищеним електрообладнанням та первинними засобами гасіння пожеж (вогнегасники типу ОП-5, ОУ-5). Забороняється використання відкритого вогню та іскроутворюючих інструментів у небезпечних зонах [31].

Найбільш доцільним є використання порошкових вогнегасників типу ВП-5 (ОП-5), які ефективно застосовуються для гасіння пожеж класів А, В і С, а також електрообладнання, що перебуває під напругою до 1000 В. Такі вогнегасники рекомендується встановлювати безпосередньо біля дефлегматора, насосного обладнання та вузлів подачі продуктів.

У приміщеннях операторних, електрощитових та пунктів керування технологічним процесом доцільно використовувати вуглекислотні вогнегасники типу ВВК-5 (ОУ-5). Їх перевагою є відсутність залишків після спрацювання, що дозволяє уникнути пошкодження електронного та контрольно-вимірювального обладнання. Крім первинних засобів

пожежогасіння, на виробництві повинні бути передбачені автоматична пожежна сигналізація, система аварійного оповіщення персоналу, а також датчики контролю концентрації парів ацетону та фенолу.

Заходи щодо покращення умов праці

Забезпечення безпечних та комфортних умов праці на установці виробництва фенолу й ацетону є одним із найважливіших напрямів підвищення надійності технологічного процесу та збереження здоров'я персоналу. Враховуючи наявність підвищених температур, тисків, токсичних та пожежонебезпечних речовин, покращення умов праці повинно здійснюватися шляхом впровадження комплексу технічних, організаційних та санітарно-гігієнічних заходів.

Одним із найбільш ефективних заходів є максимальна автоматизація технологічного процесу. Використання сучасних систем автоматичного контролю та керування дозволяє значно скоротити кількість ручних операцій, пов'язаних із безпосереднім контактом працівників із небезпечними речовинами. Автоматичні датчики температури, тиску, рівня та витрати забезпечують безперервний контроль параметрів процесу і дозволяють своєчасно виявляти відхилення від нормального режиму роботи. У разі виникнення аварійної ситуації система автоматично подає сигнал тривоги та виконує аварійне відключення обладнання, що суттєво знижує ризик виникнення нещасних випадків.

Важливим напрямом покращення умов праці є вдосконалення систем вентиляції та очищення повітря. Для виробничих приміщень необхідно передбачити припливно-витяжну вентиляцію з механічним спонуканням, яка забезпечує необхідну кратність повітрообміну та підтримання концентрацій шкідливих речовин нижче встановлених гранично допустимих значень. У місцях можливого виділення парів фенолу та ацетону доцільно встановлювати локальні відсмоктувачі та аспіраційні системи. Використання газоаналізаторів

безперервної дії дозволяє контролювати концентрацію токсичних речовин у повітрі робочої зони та оперативно реагувати на виникнення витоків.

З метою покращення мікрокліматичних умов необхідно забезпечити підтримання температури повітря в межах 18–25 °С та відносної вологості 40–60 %. Для цього використовуються системи кондиціонування повітря та теплоізоляція технологічного обладнання. Особливу увагу слід приділяти теплоізоляції дефлегматора, трубопроводів та іншого обладнання з високою температурою поверхні. Наявність якісної теплоізоляції дозволяє не лише знизити втрати теплової енергії, але й запобігти виникненню термічних опіків у працівників. Температура зовнішньої поверхні обладнання в місцях можливого контакту персоналу не повинна перевищувати 45 °С.

Значний вплив на працездатність персоналу мають шум та вібрація, які виникають під час роботи насосів, компресорів та іншого обертового обладнання. Для зниження рівня шуму рекомендується використовувати шумоізолюючі кожухи, акустичні екрани та сучасні малошумні агрегати. Зниження вібрації досягається шляхом встановлення віброгасних опор, демпферів та проведення регулярного балансування обертових елементів. Реалізація цих заходів дозволяє підтримувати рівень шуму на робочих місцях у межах допустимих значень і зменшує ризик розвитку професійних захворювань.

Для створення комфортних умов праці необхідно забезпечити нормативний рівень освітлення виробничих приміщень. Робочі місця операторів та зони обслуговування обладнання повинні мати освітленість не менше 300 лк. Для цього застосовується комбіноване освітлення, що поєднує природне та штучне світло. У вибухонебезпечних зонах використовуються світильники у вибухозахищеному виконанні, що відповідають вимогам електробезпеки.

Важливим фактором підвищення безпеки є вдосконалення організації робочих місць. Обладнання повинно розташовуватися таким чином, щоб

забезпечувати вільний доступ для його огляду, обслуговування та ремонту. Проходи між апаратами повинні бути достатньої ширини, а шляхи евакуації – чітко позначені та постійно вільні від сторонніх предметів. На виробничих дільницях необхідно розміщувати попереджувальні знаки безпеки, схеми евакуації та інструкції щодо дій персоналу у разі аварійних ситуацій.

Суттєве значення має підвищення рівня підготовки працівників. Регулярне проведення інструктажів, навчання безпечним методам роботи, тренувань з ліквідації аварійних ситуацій та пожеж сприяє формуванню у персоналу навичок безпечної поведінки. Працівники повинні проходити періодичні медичні огляди та перевірку знань з питань охорони праці й пожежної безпеки.

Додатковим заходом покращення умов праці є впровадження цифрових систем моніторингу виробництва, які дозволяють контролювати технічний стан обладнання в режимі реального часу. Такі системи забезпечують раннє виявлення несправностей, попереджають виникнення аварійних ситуацій та сприяють підвищенню загального рівня промислової безпеки підприємства.

Реалізація зазначених заходів дозволяє суттєво знизити вплив шкідливих та небезпечних виробничих факторів на працівників, підвищити рівень виробничої безпеки, покращити санітарно-гігієнічні умови праці та забезпечити стабільну й безаварійну роботу установки виробництва фенолу та ацетону.

5 Розрахунки, що підтверджують працездатність та надійність конструкцій

5.1 Визначення основних геометричних розмірів апарата

Метою розрахунку є визначення необхідної площі теплообміну та вибір конструкції апарата, яка оптимально задовольняє заданим технологічним умовам та конструктивні розміри кожухотрубного теплообмінника.

Оскільки відбувається конденсація пари, то теплообмінник доцільно приймати вертикальним і для кращих умов теплообміну пару слід подавати в міжтрубний простір.

Позначимо всі параметри цільового продукту – парів ацетону – індексом «1», а всі параметри води – індексом «2».

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [32].

Розрахункова схема зображена на рисунку 5.1

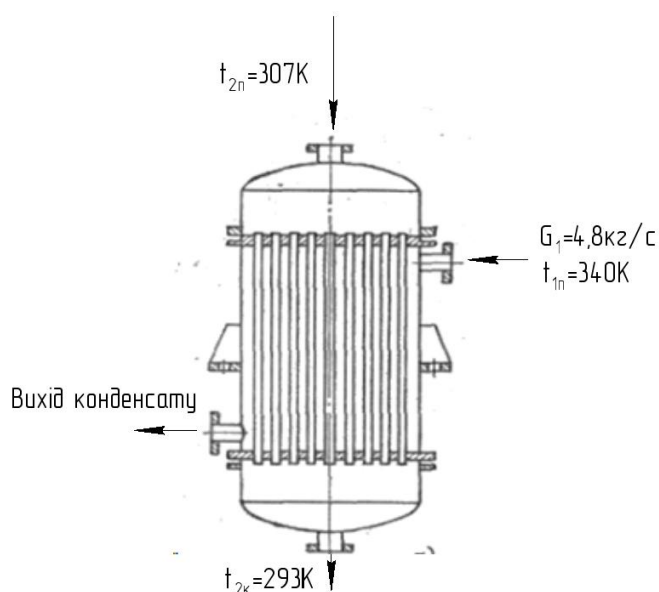


Рисунок 5.1 – Розрахункова схема

Вихідні дані:

Початкова температура парів ацетону, t_{1n} , K

340;

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 49
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

Початкова температура води t_{2n} , К	307;
Кінцева температура води, $t_{2к}$, К	293;
Продуктивність за парами ацетону, G_1 кг/с	4,8.

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [32].

Більшу різницю температур на кінцях теплообмінника (між холодним та гарячим теплоносієм) визначають по формулі

$$\Delta t_6 = t_{1к} - t_{2к} = 340 - 293 = 47 \text{ К.}$$

Визначаємо меншу різницю температур на кінцях теплообмінника (між холодним та гарячим теплоносієм):

$$\Delta t_m = t_{1п} - t_{2п} = 340 - 307 = 33 \text{ К.}$$

Оскільки $\frac{\Delta t_6}{\Delta t_m} = \frac{47}{33} = 1,4 \leq 2$, тоді середня різниця температур визначається як середньо арифметична.

Середньоа арифметична різниця температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{\Delta t_6 + \Delta t_m}{2} = \frac{47 + 33}{2} = 40 \text{ К.}$$

$\Delta t_6 = 47 \text{ К}$ - максимальна різниця між температурами теплоносіїв;

$\Delta t_m = 33 \text{ К}$ – мінімальна різниця між температурами теплоносіїв.

Середня температура парів ацетону:

$$t_{1сер} = t_{1п} = 340 \text{ К.}$$

Середня температура води:

$$t_{2сер} = t_{1сер} - \Delta t_{cp} = 340 - 40 = 300 \text{ К.}$$

Теплофізичні властивості води при середній температурі 300 К [32]:

μ_2 – коефіцієнт динамічної в'язкості,

$$\mu_2 = 8,81 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с.}$$

ρ_2 – густина,

$$\rho_2 = 996 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

λ_2 – коефіцієнт теплопровідності,

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 50
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$\lambda_2 = 0,612 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

C_2 – теплоємність,

$$C_2 = 4180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Теплове навантаження:

$$Q = 1,05 \cdot r \cdot G_2 = 1,05 \cdot 5,2 \cdot 10^5 \cdot 4,8 = 2,62 \cdot 10^6 \text{ Вт},$$

де $G_1 = 4,8 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ - масова витрата парів ацетону;

$r = 5,2 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ - теплота пароутворення.

Коефіцієнт 1,05 враховує 5% витрат тепла в навколишнє середовище.

Масова витрата води:

$$G_2 = \frac{Q}{C_2 \cdot (t_{2\text{к}} - t_{2\text{п}})} = \frac{2,62 \cdot 10^6}{4180 \cdot (307 - 293)} = 44,78 \text{ кг/с},$$

де $C_2 = 4180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ - теплоємність води.

Орієнтовно визначаємо потрібну площу теплообміну з основного рівняння теплопередачі, попередньо задавшись, значенням коефіцієнта теплопередачі, оскільки посилаючись на авторів [32] коефіцієнт теплопередачі від води до парів ацетону лежить в межах $K = 300 - 800 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$

Визначаємо орієнтовну площу теплообміну:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{2,62 \cdot 10^6}{450 \cdot 40} = 145,6 \text{ м}^2,$$

де Q - теплове навантаження;

$\Delta t_{\text{ср}}$ - середня різниця температур.

Приймаємо попередньо значення критерію Рейнольдса для води в трубному просторі $Re=10000$ [32].

Тоді попередньо швидкість в трубах повинна бути:

$$w_2^{\text{ор}} = \frac{Re \cdot \mu_2}{d_v \cdot \rho_2} = \frac{10000 \cdot 8,81 \cdot 10^{-4}}{0,016 \cdot 996} = 0,553 \text{ м/с},$$

де $d_v = 0,016 \text{ м}$ – внутрішній діаметр теплообмінної труби.

Орієнтовне число труб при $Re=10000$:

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 51
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$n' = \frac{4 \cdot G_2}{\rho_2 \cdot \pi \cdot d_v^2 \cdot w_2^{\text{оп}}} = \frac{4 \cdot 44,78}{996 \cdot 3,14 \cdot 0,016^2 \cdot 0,553} = 404 \text{ шт.}$$

По визначеній площі теплообміну за таблиця 3.8 [32] найближчий теплообмінник: площа поверхні $F=147 \text{ м}^2$, діаметр кожуха $D = 600 \text{ мм}$, діаметр труб $d = 20 \times 2 \text{ мм}$, довжина труб $L = 6 \text{ м}$, кількість труб 389шт, кількість ходів $z = 1$, площа найвужчого перерізу в міжтрубному просторі, $S_2=4,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$.

Визначаємо швидкість речовини в трубах:

$$w_2 = \frac{4 \cdot G_2}{\rho_2 \cdot \pi \cdot d_v^2 \cdot \frac{n}{2}} = \frac{4 \cdot 44,78}{996 \cdot 3,14 \cdot 0,016^2 \cdot \frac{389}{1}} = 0,575 \text{ м/с}$$

Критерій Рейнольдса для води:

$$\text{Re}_2 = w_2 \cdot d_v \cdot \frac{\rho_2}{\mu_2} = 0,575 \cdot 0,016 \cdot \frac{996}{8,81 \cdot 10^{-4}} = 10396$$

де $\rho_2 = 996 \text{ кг/м}^3$ - густина води;

$\mu_2 = 8,81 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$,- коефіцієнт динамічної в'язкості води;

Води тече по трубах у турбулентному режимі.

Критерій Прандтля для води:

$$\text{Pr}_2 = C_2 \cdot \frac{\mu_2}{\lambda_2} = 4179,8 \cdot \frac{8,81 \cdot 10^{-4}}{0,625} = 6,02$$

де $\lambda_2 = 0,625 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ - коефіцієнт теплопровідності води

Визначаємо температуру стінки з боку обох теплоносіїв. Задамося значеннями допоміжних величин $A_2 = 0,19$ та $A_1 = 0,61$

Температура стінки з боку води:

$$t_{\text{ст}2} = t_{2\text{сер}} + A_2 \cdot \Delta t_{\text{ср}} = 300 + 0,19 \cdot 40 = 307,6 \text{ К.}$$

Температура стінки з боку парів ацетону:

$$t_{\text{ст}1} = t_{1\text{сер}} - A_1 \cdot \Delta t_{\text{ср}} = 340 - 0,61 \cdot 40 = 315,6 \text{ К.}$$

Теплофізичні властивості води при температурі стінки 307,6 К [32]

$\mu_{2\text{ст}}$ —коефіцієнт динамічної в'язкості,

$$\mu_{2\text{ст}} = 7,48 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с};$$

$\lambda_{2\text{ст}}$ – коефіцієнт теплопровідності,

$$\lambda_{2\text{ст}} = 0,625 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}};$$

$C_{2\text{ст}}$ – теплоємність,

$$C_{2\text{ст}} = 4176 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Визначаємо критерій Прандтля для води при температурі стінки 315,6 К.

$$\text{Pr}_{2\text{ст}} = C_{2\text{ст}} \cdot \frac{\mu_{2\text{ст}}}{\lambda_{2\text{ст}}} = 4176,4 \cdot \frac{7,5 \cdot 10^{-4}}{0,65} = 4,99.$$

Рівняння процесу тепловіддачі при турбулентному режимі руху в трубах ($\text{Re} > 10000$) має вигляд, причому Nu_2 – критерій Нусельта, який характеризує теплообмін на границі «стінка-речовина»:

$$\text{Nu}_2 = 0,021 \cdot \text{Re}_2^{0,8} \cdot \text{Pr}_2^{0,43} \cdot \left(\frac{\text{Pr}_2}{\text{Pr}_{2\text{ст}}}\right)^{0,25} = 0,021 \cdot 10396^{0,8} \cdot 6,02^{0,43} \cdot \left(\frac{6,02}{4,99}\right)^{0,25} = 77,86.$$

Визначаємо коефіцієнт тепловіддачі від стінки труби до води:

$$\alpha_2 = \text{Nu}_2 \cdot \frac{\lambda_2}{d_v} = 77,86 \cdot \frac{0,61}{0,016} = 2976 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

де $d_v = 0,016\text{м}$ – внутрішній діаметр труб;

$\lambda_2 = 0,61 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ – коефіцієнт теплопровідності води.

Розрахункова температура плівки конденсату:

$$t_{1\text{пл}} = \frac{t_{1\text{п}} + t_{1\text{ст}}}{2} = \frac{340 + 315,6}{2} = 327,8 \text{ К}.$$

Теплофізичні властивості плівки конденсату [32]:

$\mu_{1\text{пл}}$ – коефіцієнт динамічної в'язкості плівки, $\mu_{1\text{пл}} = 2,42 \cdot 10^{-4} \text{ Па} \cdot \text{с}$

$\rho_{1\text{пл}}$ – густина плівки, $\rho_{1\text{пл}} = 750,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$

$\lambda_{1\text{пл}}$ – коефіцієнт теплопровідності плівки, $\lambda_{1\text{пл}} = 0,139 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$

Коефіцієнт тепловіддачі в міжтрубному просторі:

$$\alpha_1 = 1,2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt[4]{\frac{(\lambda_{1\text{пл}}^3 \cdot \rho_{1\text{пл}}^2 \cdot 9,81 \cdot r)}{\mu_{1\text{пл}} \cdot (t_{1\text{п}} - t_{1\text{ст}}) \cdot \text{Н}}} = 1,2 \cdot 1,15 \cdot \sqrt[4]{\frac{(0,139^3 \cdot 750,2^2 \cdot 9,81 \cdot 5,2 \cdot 10^5)}{2,42 \cdot 10^{-4} \cdot (340 - 315,6) \cdot 6}} = 940,5 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}.$$

Коефіцієнт 1,2 – коефіцієнт модернізації.

Термічний опір стінки та забруднень, Вт/(м²·К):

$$\sum r_{\text{ст}} = \frac{\delta_{\text{ст}}}{\lambda_{\text{ст}}} + r_{\alpha 1} + r_{\alpha 2} = \frac{0,002}{71} + \frac{1}{11600} + \frac{1}{5800} = 2,86 \cdot 10^{-4};$$

де за таблицею XXXI [32]:

$\lambda_{\text{ст}} = 71$ Вт/(м·К) – теплопровідність матеріалу стінки;

$\delta_{\text{ст}} = 0,002$ – товщина стінки труби, м;

$r_{\alpha 1}$ – термічний опір для парів ацетону;

$r_{\alpha 2}$ – термічний опір для води.

Визначаємо коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К):

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum r_{\text{ст}} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{940,5} + 2,86 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{2976,3}} = 593$$

Перевіряємо прийняті раніше значення співвідношень коефіцієнтів теплопередачі до коефіцієнтів тепловіддачі:

$$A'_1 = \frac{K}{a_1} = \frac{593}{940,5} = 0,631;$$

$$A'_2 = \frac{K}{a_2} = \frac{593}{2976,3} = 0,199.$$

Відповідні розбіжності становлять, %:

$$\delta_1 = \frac{|A'_1 - A_1| \cdot 100}{A'_1} = \frac{|0,631 - 0,61| \cdot 100}{0,631} = 3,27\% ;$$

$$\delta_2 = \frac{|A'_2 - A_2| \cdot 100}{A'_2} = \frac{|0,199 - 0,19| \cdot 100}{0,199} = 4,65\%.$$

Оскільки немає розбіжності більші за 10% проводити уточнюючий перерахунок не потрібно.

Визначаємо площу поверхні теплообмінного апарату:

$$F_p = \frac{Q}{K \cdot \Delta T_{\text{cp}}} = \frac{2,62 \cdot 10^6}{593 \cdot 40} = 110,5 \text{ м}^2.$$

Дійсна площа теплообмінника:

$$F = \pi \cdot n \cdot d_v \cdot L = 3,14 \cdot 389 \cdot 0,016 \cdot 6 = 117,3 \text{ м}^2.$$

Запас площі поверхні:

$$\Delta = \frac{(F - F_p) \cdot 100}{F} = \frac{(117,3 - 110,5) \cdot 100}{117,3} = 5,84 \%$$

Результати розрахунку:

кількість труб, n	389;
кількість ходів, z	1;
число Рейнольдса в трубному просторі, Re_2	10396;
коефіцієнт тепловіддачі парів ацетону $\alpha_1, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	940;
коефіцієнт тепловіддачі води $\alpha_2, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	2976;
коефіцієнт теплопередачі $K, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	593;
витрати води $G_2, \text{кг/с}$	44,78;
Розрахункова площа теплообміну $F_p, \text{м}^2$	110,5.

Висновок: В результаті розрахунку визначена площа поверхні теплообміну, та вибраний вертикальний 1-ох ходовий теплообмінник, діаметром 600 мм. Поверхня теплообміну теплообмінника $F = 147 \text{ м}^2$, висота $L = 6 \text{ м}$, що забезпечує запас поверхні теплообміну.

5.2 Розрахунок штуцерів

Метою розрахунку є визначення основних параметрів і вибір стандартних штуцерів. Розрахункова схема зображена на рисунку 5.2.

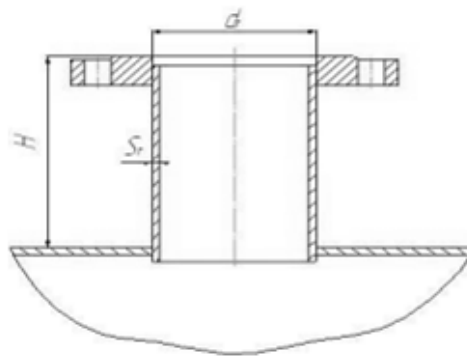


Рисунок 5.2 – Розрахункова схема штуцера

Вихідні дані:

Масова витрата парів ацетону, G_1 , кг/с 4,8;

Масова витрата води G_2 , кг/с 44,78.

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [32].

Розрахунок передбачає вибір стандартних штуцерів за тиском і умовним діаметром, що далі визначається.

Розраховуємо діаметр штуцера для входу парів ацетону:

$$d_{шт1} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_1}{\pi \cdot \rho_1 \cdot w_p}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,8}{3,14 \cdot 2,08 \cdot 25}} = 0,343 \text{ м};$$

де $w_p = 25 \text{ м/с}$ – рекомендована швидкість для пару [32];

$\rho_1 = 2,08 \text{ кг/м}^3$ – густина парів ацетону,

Розраховуємо діаметр штуцера для входу і виходу води:

$$d_{шт2} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_2}{\pi \cdot \rho_2 \cdot w_r}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 44,78}{3,14 \cdot 996 \cdot 1,5}} = 0,195 \text{ м};$$

де $w_r = 1,5 \text{ м/с}$ – рекомендована швидкість для рідини

$\rho_2 = 996 \text{ кг/м}^3$ – густина води,

Розраховуємо діаметр штуцера для виходу конденсату:

$$d_{шт3} = \sqrt{\frac{4 \cdot G_1}{\pi \cdot \rho_{пл} \cdot w_r}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 4,8}{3,14 \cdot 750,2 \cdot 1,5}} = 0,074 \text{ м};$$

$\rho_{пл} = 750,2 \text{ кг/м}^3$ – густина конденсату,

Розміри нормалізованих штуцерів за [32]:

1) 1 штуцери 373 – 8 – 160 – 12X18Н10Т – 10 для входу парів ацетону,

що мають наступні параметри:

Номінальний діаметр D_y , м 0,373;

Діаметр отвору d_t , м 0,357;

Товщина стінки S_t , м 0,008;

Висота штуцера H_t , м 0,160.

2) 2 штуцери 219 – 6 – 160 – 12X18Н10Т – 10 для входу та виходу води,

що мають наступні параметри:

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 56
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

Номінальний діаметр D_y , м	0,219;
Діаметр отвору d_T , м	0,207;
Товщина стінки S_T , м	0,006;
Висота штуцера H_T , м	0,160.

З) 1 штуцер 89 – 4 – 155 – 12X18Н10Т – 10 для виходу конденсату, що має наступні параметри:

Номінальний діаметр D_y , м	0,089;
Діаметр отвору d_T , м	0,081;
Товщина стінки S_T , м	0,004;
Висота штуцера H_T , м	0,155.

Перераховуємо дійсну швидкість теплоносіїв в штуцерах:

Для парів ацетону:

$$w_{11} = \frac{4 \cdot G_1}{\pi \cdot \rho_1 \cdot d_{шт1}^2} = \frac{4 \cdot 4,8}{3,14 \cdot 2,08 \cdot 0,207^2} = 68,5 \text{ м/с.}$$

Для води:

$$w_{22} = \frac{4 \cdot G_2}{\pi \cdot \rho_2 \cdot d_{шт2}^2} = 4 \cdot \frac{4 \cdot 44,78}{3,14 \cdot 996 \cdot 0,357^2} = 0,45 \text{ м/с.}$$

Для конденсату:

$$w_{33} = \frac{4 \cdot G_1}{\pi \cdot \rho_{пл} \cdot d_{шт3}^2} = \frac{4 \cdot 4,8}{3,14 \cdot 750,2 \cdot 0,081^2} = 1,24 \text{ м/с.}$$

Висновок: в результаті проведених розрахунків встановлено геометричні розміри штуцерів для подачі теплоносіїв: для входу парів ацетону – 0,373 м, для входу та виходу води – 0,219 м, для виходу конденсату 0,089 м.

5.3 Гідравлічний розрахунок

Метою розрахунку є визначення гідравлічного опору трубного простору теплообмінника.

Розрахункова схема зображена на рисунку 5.3.

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 57
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

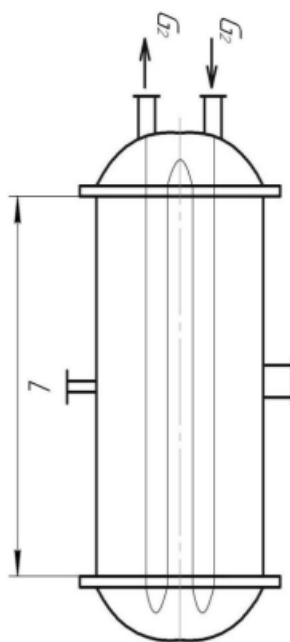


Рисунок 5.3 – Розрахункова схема гідравлічного опору

Вихідні дані:

Швидкість руху води в штуцерах, м/с, w_{22} ,	0,575,
Критерій Рейнольдса для води, Re_2 ,	10396,
Густина води, кг/м ³ , ρ_2 ,	996.

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [32].

Оскільки в трубах рухається вода, вважаємо, що труби теплообмінника сталеві з незначною корозією.

Відносна шорсткість становитиме:

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{d_v} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,016} = 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

де Δ - висота виступів шорсткостей, $\Delta = 0,2 \text{ мм}$ [32].

Для розрахунку коефіцієнта тертя використовуємо формулу:

$$\lambda = 0,11 \cdot \left(\varepsilon + \frac{68}{Re_1} \right)^{0,25} = 0,11 \cdot \left(1,25 \cdot 10^{-3} + \frac{68}{10396} \right)^{0,25} = 0,041.$$

Обираємо значення коефіцієнтів місцевого опору в трубному просторі:

Вхід і вихід в труби, ζ_{11}	1,5;
Поворот між ходами, ζ_{12}	1;

При цьому опір у вхідній і вихідній камері рахується за швидкістю в штуцерах. Враховуючи кількість ходів ($z=1$), гідравлічний опір в трубному просторі буде розраховуватися за формулою:

$$\Delta P_2 = 2 \cdot \zeta_{11} \cdot \left(\rho_2 \cdot \frac{w_{22}^2}{2} \right) + \left[(z-1) \cdot \zeta_{13} + 2 \cdot z \cdot \zeta_{12} + \lambda \cdot \frac{L \cdot z}{d_v} \right] \cdot \rho_2 \cdot \frac{w_2^2}{2} =$$

$$2 \cdot 1,5 \cdot \left(996 \cdot \frac{1,13^2}{2} \right) + \left[(1-1) \cdot 2,5 + 2 \cdot 1 \cdot 1 + 0,035 \cdot \frac{6 \cdot 1}{0,02} \right] \cdot 996 \cdot \frac{0,57^2}{2} =$$

$$5518 \text{ Па},$$

Витрати потужності на переміщення води в теплообміннику:

$$N_2 = \Delta P_2 \cdot \frac{G_2}{\rho_2} = 5518 \cdot \frac{44,78}{996} = 248 \text{ Вт},$$

де $G_2 = 44,78 \frac{\text{кг}}{\text{с}}$ - масова витрата води

$\rho_2 = 996 \text{ кг/м}^3$ - густина води.

Висновок: на подолання сил тертя трубного простору теплообмінника витрачається близько 248 Вт.

5.4 Розрахунок еліптичного днища

Метою розрахунку є визначення товщини днища та перевірка виконання умови міцності за умов навантаження зовнішнім тиском.

Схема до розрахунку наведена на рисунку 5.4:

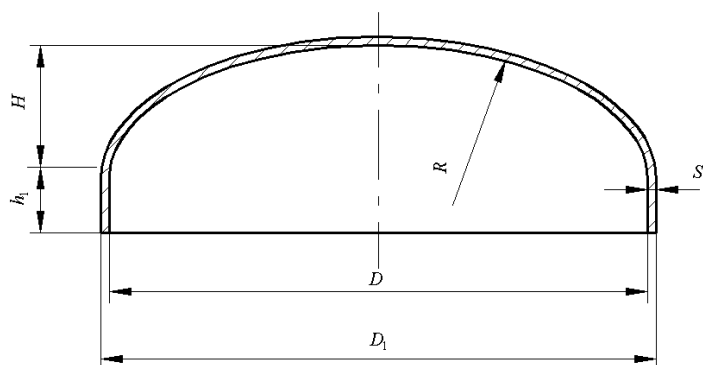


Рисунок 5.4 – Розрахункова схема еліптичного днища

Вихідні дані:

Внутрішній діаметр апарату D , м 0,6

Тиск P , МПа 0,5

Допустиме напруження для матеріалу, $[\sigma]$ МПа 185

Матеріал 09Г2С

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [32].

Розрахункова товщина днища:

$$S_r = \frac{P \cdot R}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot 0,5 - P} \quad (5.1)$$

де $R = D$ – радіус кривизни при вершині днища.

Додаток до розрахункової товщини для компенсації ерозії C_e , м:

$$C_e = 0.$$

Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії і ерозії C_1 , м:

$$C_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

Виконавча товщина стінки кришки у першому наближенні S^1 , м:

$$S_{\partial}^1 = S_{\partial R} + C_1 + C_0 \quad (5.2)$$

де $C_0 = 0,1 \cdot 10^{-4}$ м – додаток, який вибирається конструктивно для кожного окремого випадку.

Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску C_2 :

$$C_2 = 5 \cdot 10^{-4} \text{ м}.$$

Технологічний додаток до розрахункової товщини C_3 , м:

$$C_3 = 0,$$

Відношення суми додатків C_2 і C_3 до товщини S^1 :

$$\frac{C_2 + C_3}{S_{\partial}^1} \quad (5.3)$$

$$\frac{C_2 + C_3}{S_{\partial}^1} \quad (5.4)$$

$$C = C_1 + C_2 + C_3 \quad (5.5)$$

Виконавча товщина стінки кришки або днища S , м:

$$S_{\partial} = S_R + C + C_0 \quad (5.6)$$

Приймаємо стандартну товщину днища $S = 4$ мм.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск $[\rho]$, МПа:

$$[\rho] = \frac{2[\sigma]\varphi_{\rho}(S_{\partial} - C)}{R_e + 0,5(S_{\partial} - C)} \quad (5.7)$$

Перевірка умови міцності:

$$\rho \leq [\rho] \quad (5.8)$$

$$0,5 \text{ МПа} < 0,689 \text{ МПа}, \quad (5.9)$$

Умова міцності виконується

Алгоритмічну схему комп'ютерного розрахунку товщини еліптичного днища наведено на рисунку Б.1. Перелік усіх використаних ідентифікаторів для цього розрахунку подано в таблиці Б.1. Крім того, розроблено алгоритм розрахунку з використанням програми Mathcad для визначення розмірів днища, який наведено в Додатку Б.

Висновок: Через те, що умови застосування формул виконуються, а допустимий внутрішній надлишковий тиск більший за розрахунковий, то приймаємо товщину днища $s = 4$ мм

5.5 Розрахунок опорних лап

Метою розрахунку опорних лап для дефлегматора є визначення необхідного типу опор та перевірка несучої спроможності обичайки для обраних опор

Розрахункова схема наведена на рисунку 5.5.

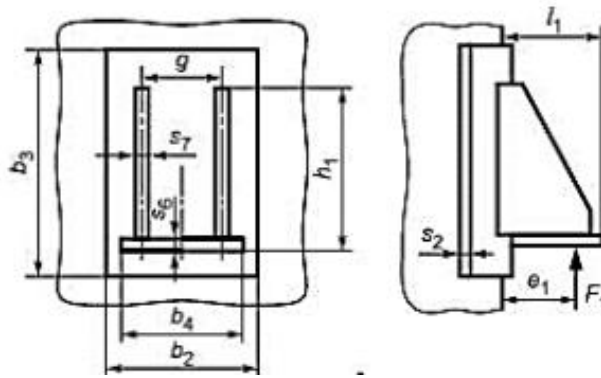


Рисунок 5.5 – Опорна лапа

Вихідні дані:

Внутрішній тиск p , МПа	0,5;
Внутрішній діаметр обичайки D , м	0,6;
Товщина стінки обичайки S , м	0,04;
Кількість опор n , кількість	4;
Допустиме напруження для матеріалу, $[\sigma]$ МПа	185;
Вага апарата G , МН	0,010.

Розрахунок виконується за методикою [33]:

Умови застосування розрахункових формул

$$\frac{S - C}{D_p} \leq 0,05$$

$$\frac{0,004 - 0,002}{0,6} = 0,033 \leq 0,05$$

$$g \geq 0,2h_1$$

$$0,18 \geq 0,2 \cdot 0,3$$

$$0,04 \leq \frac{h_1}{D_p} \leq 0,5$$

$$0,04 \leq \frac{0,3}{0,6} = 0,05 \leq 0,5$$

Умови застосування розрахункових формул виконуються

Відстань між точкою докладання зусиль і обичайкою e_1 , м

$$e_1 = \frac{5l_1}{6} = \frac{5 \cdot 0,15}{6} = 0,125.$$

Розрахункова осьова розтягуюча або стискаюча сила (стискаюча сила зі знаком мінус) F, МН

$$F = G = 10 \cdot 10^{-3}.$$

Вертикальна сила, яка діє на опорну лапу F_1 , МН

Через те що $M = 0$

$$F_1 = \frac{G}{4} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{4} = 2,5 \cdot 10^{-4}.$$

Еквівалентне плече навантаження e_{1e} , м

$$e_{1e} = e_1 = 0,125.$$

Параметр x

$$x = \ln\left(\frac{D_p}{2(S-C)}\right) = \ln\left(\frac{0,6}{2 \cdot (0,004 - 0,002)}\right) = 5,01.$$

Параметр y (визначається для опор типів А, В і С)

$$y = \ln\left(\frac{h_1}{D_p}\right) = \ln\left(\frac{0,03}{0,6}\right) = -0,693.$$

Коефіцієнт K_7

$$K_7 = \exp[(-5,964 - 11,395x - 18,984y - 2,413x^2 - 7,286xy - 2,042y^2 + 0,1322x^3 + 0,4833x^2y + 0,8469xy^2 + 1,428y^3)10^{-2}]$$

$$K_7 = \exp[(-5,964 - 11,395 \cdot 5,01 - 18,984 \cdot (-0,693) - 2,413 \cdot 5,01^2 - 7,286 \cdot 3,53 \cdot (-0,693) - 2,042 \cdot (-0,693)^2 + 0,1322 \cdot 5,01^3 + 0,4833 \cdot 5,01^2 \cdot (-0,693) + 0,8469 \cdot 5,01 \cdot (-0,693)^2 + 1,428 \cdot (-0,693)^3)10^{-2}] = 0,466.$$

Загальне мембранне напруження $\bar{\sigma}_m$, МПа

$$\bar{\sigma}_m = \frac{p \cdot D_p}{2 \cdot (S-C)} = \frac{0,5 \cdot 0,6}{2 \cdot (0,004 - 0,002)} = 75.$$

Коефіцієнт $\vartheta_1 = 0,3$.

Коефіцієнт ϑ_2 :

$$\vartheta_2 = \frac{\bar{\sigma}_m}{K_2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi} = \frac{75}{1,25 \cdot 1885 \cdot 0,8} = 0,405.$$

Коефіцієнт K_1 :

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 63
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$K_1 = \frac{1 - \vartheta_2^2}{\left(\frac{1}{3} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + \vartheta_1 \cdot \vartheta_2\right)^2 + (1 - \vartheta_2^2) \cdot \vartheta_1^2}}$$

$$= \frac{1 - 0,405^2}{\left(\frac{1}{3} + 0,3 \cdot 0,405\right) + \sqrt{\left(\frac{1}{2} + 0,3 \cdot 0,05\right)^2 + (1 - 0,405^2) \cdot 0,3^2}}$$

$$= 0,736.$$

Граничне напруження вигину в місці кріплення опор $[\sigma_i]$, МПа

$$[\sigma_i] = K_1 \cdot K_2 \cdot [\sigma] = 0,736 \cdot 1,25 \cdot 153 = 170,3.$$

Допустиме зусилля на опорну лапу $[F]_1$, МПа

$$[F]_1 = \frac{[\sigma_i] h_1 (S-C)^2}{K_7 e_{1e}} = \frac{170,3 \cdot 0,3 \cdot (0,004 - 0,002)^2}{0,466 \cdot 0,125} = 3,51 \cdot 10^{-3}.$$

Несуча здатність обичайки в місці приварювання опорної лапи без підкладного листа.

$$F_1 \leq [F]_1$$

$$2,5 \cdot 10^{-3} \leq 3,51 \cdot 10^{-3}.$$

Висновок: Умова виконується.

5.6 Розрахунок фланцевого з'єднання

Мета розрахунку: вибір та розрахунок фланців на перевірку герметичності та забезпечення з'єднання корпусу апарата з розподільною камерою.

На рисунку 5.6 зображена фланцевого з'єднання.

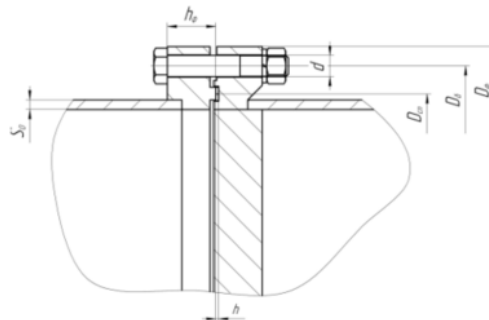


Рисунок 5.6 – Схема фланцевого з'єднання

Вихідні дані:

Внутрішній діаметр D , м	0,6;
Зовнішній діаметр D_{ϕ} , м	0,780;
Діаметр кола розташування болтів D_6 , м	0,725;
Товщина фланця h , м	0,025;
Товщина втулки фланця S_0 , м	0,012;
Ширина прокладки b_n , м	0,0135;
Товщина прокладки h_n , м	0,003;
Кількість болтів n , шт	20;
Діаметр болта d , м	0,03;
Розрахункова температура t , К	340;
Внутрішній тиск p , МПа	0,5;
Середній діаметр прокладки $D_{\text{сп}}$, м	0,6;

Розрахунок та вибір стандартних фланців проводимо за методикою [34].

Знайдемо розрахункові температури фланця, вони визначаються за [34].

Для плоского неізолюваного фланця:

$$t_{\phi} = 0,96 \cdot t = 0,96 \cdot 111 = 106,6 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

$$t_6 = 0,95 \cdot t = 0,95 \cdot 111 = 105,5 \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

При ширині прокладки $b_n \leq 15$ мм ефективна ширина прокладки $b_o = b_n$

Питомий тиск обтискання прокладки визначається за [34].

Для терморозширеного графітового матеріалу (типу 'Графлекс') без обтюратора.

$$q_{\text{обт}} = 2.$$

Зусилля яке необхідне для деформування прокладки при затягуванні фланця:

$$P_{\text{обт}} = 0,5 \cdot \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_o \cdot q_{\text{обт}} = 0,5 \cdot 3,14 \cdot 0,69 \cdot 0,0135 \cdot 2 = 0,029 \text{ м}.$$

Коефіцієнт прокладки визначається за [34].

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 65
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$m = 0,5.$$

Зусилля на прокладку в робочих умовах, яке необхідне для забезпечення герметичності:

$$R_n = \pi \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0 \cdot m \cdot |p| = 3,14 \cdot 0,69 \cdot 0,0135 \cdot 0,5 \cdot 0,5 = 1,5 \cdot 10^{-2} \text{ МН.}$$

Площа поперечного перерізу для болтів без проточки з діаметром $d = 30$ мм:

$$f_6 = 2,545 \cdot 10^{-4}.$$

Сумарна площа перерізу болтів по внутрішньому діаметру різьблення або напруженому перерізу найменшого діаметра:

$$A_6 = n \cdot f_6 = 20 \cdot 2,545 \cdot 10^{-4} = 5,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Рівнодіюче навантаження від тиску:

$$Q_d = \frac{\pi \cdot D_{\text{сп}}^2}{4} \cdot p = \frac{3,14 \cdot 0,69^2}{4} \cdot 0,5 = 0,374 \text{ МН.}$$

Коефіцієнт обиснення прокладки для терморозширеного графітового матеріалу (типу ‘Графлекс’) без обтюлятора $K_{\text{обж}} = 0,04$.

Умовний модуль стиснення для терморозширеного графітового матеріалу (типу ‘Графлекс’) без обтюлятора $E_n = 3 \cdot (1 + \frac{b_n}{h_n}) = 3 \cdot (1 + \frac{0,0135}{2 \cdot 0,005}) = 7,05 \text{ МПа.}$

Податливість прокладки:

$$y_n = \frac{h_n \cdot K_{\text{обж}}}{\pi \cdot E_n \cdot D_{\text{сп}} \cdot b_0} = \frac{0,005 \cdot 0,04}{3,14 \cdot 7,05 \cdot 0,69 \cdot 0,0135} = 9,69 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}}{\text{МН}}.$$

Відстань між опорними поверхнями гайки і головки болта або опорними поверхнями гайок для плоских фланців:

$$L_{60} = 2 \cdot h + h_n = 2 \cdot 0,003 + 0,005 = 0,011 \text{ м.}$$

Ефективна довжина болта:

$$L_6 = L_{60} + 0,28 \cdot d = 0,011 + 0,28 \cdot 0,033 = 0,02 \text{ м.}$$

Визначаємо за [34] модуль повздовжньої пружності в умовах розтягу матеріалу болта при 20 °С:

$$E_{620} = 2,13 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 66
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

Визначаємо за [34] модуль повздовжньої пружності в умовах розтягу матеріалу болта за розрахункової температури:

$$E_{\bar{o}} = 2,09 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Податливість болтів:

$$y_{\bar{o}} = \frac{L_{\bar{o}}}{E_{\bar{o}20} \cdot f_{\bar{o}} \cdot n} = \frac{0,02}{2,13 \cdot 10^5 \cdot 2,545 \cdot 10^{-4} \cdot 20} = 1,86 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}}{\text{МН}}.$$

Розрахунковий коефіцієнт для фланцевих з'єднань з привареними в стик плоскими фланцями:

$$\beta_V = 0,35.$$

Визначаємо за [34] модуль повздовжньої пружності в умовах розтягу матеріалу фланця при температурі 20 С:

$$E_{20} = 1,99 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Модуль повздовжньої пружності в умовах розтягу матеріалу фланця за розрахункової температури визначаємо за [34]:

$$E = 1,86 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Параметр довжини втулки:

$$l_0 = \sqrt{D \cdot S_0} = \sqrt{0,6 \cdot 0,012} = 0,085 \text{ м.}$$

Співвідношення розмірів тарілки фланця:

$$K = \frac{D_{\phi}}{D} = \frac{0,78}{0,6} = 1,3.$$

Коефіцієнт β_T :

$$\beta_T = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg K) - 1}{(1,05 + 1,945 \cdot K^2) \cdot (K - 1)} = \frac{1,3^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg 1,3) - 1}{(1,05 + 1,945 \cdot 1,3^2) \cdot (1,3 - 1)} = 1,79.$$

Коефіцієнт β_U :

$$\beta_U = \frac{K^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg K) - 1}{1,36 \cdot (K^2 - 1) \cdot (K - 1)} = \frac{1,3^2 \cdot (1 + 8,55 \cdot \lg 1,3) - 1}{1,36 \cdot (1,3^2 - 1) \cdot (1,3 - 1)} = 8,3.$$

Коефіцієнт для фланцевих з'єднань визначаємо за [16]:

$$\beta_F = 0,86.$$

Коефіцієнт λ :

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 67
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$\lambda = \frac{\beta_F \cdot h + l_0}{\beta_T \cdot l_0} + \frac{\beta_V \cdot h^3}{\beta_U \cdot l_0 \cdot S_0^2} = \frac{0,85 \cdot 0,03 + 0,085}{1,79 \cdot 0,084} + \frac{0,35 \cdot 0,003^3}{8,3 \cdot 0,085 \cdot 0,012^2} = 0,574.$$

Кутова податливість фланця при затяжці:

$$y_\phi = \frac{0,91 \cdot \beta_V}{E_{20} \cdot \lambda \cdot S_0^2 \cdot l_0} = \frac{0,91 \cdot 0,35}{1,99 \cdot 10^5 \cdot 0,573 \cdot 0,012^2 \cdot 0,085} = 0,228 \frac{1}{\text{МН} \cdot \text{м}}.$$

Плечі дії сил у болтах:

$$b = 0,5 \cdot (D_\phi - D_{cn}) = 0,5 \cdot (0,725 - 0,69) = 0,018 \text{ м.}$$

Еквівалентна товщина конічної втулки фланця:

$$S_\phi = S_0 = 0,012 \text{ м.}$$

Плече зусилля від дії тиску на фланець:

$$e = 0,5 \cdot (D_{cn} - D) = 0,5 \cdot (0,69 - 0,6) = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м.}$$

Жорсткість фланцевого з'єднання:

$$\gamma = \frac{1}{y_n + y_\phi \cdot \frac{E_{\phi 20}}{E_\phi} + \left(y_\phi \cdot \frac{E_{20}}{E} + y_\phi \cdot \frac{E_{20}}{E} \right) \cdot b^2} =$$

$$= \frac{1}{9,7 \cdot 10^{-4} + 1,86 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{2,13 \cdot 10^5}{2,09 \cdot 10^5} + \left(0,228 \cdot \frac{1,99 \cdot 10^5}{1,86 \cdot 10^5} + 0,228 \cdot \frac{1,99 \cdot 10^5}{1,86 \cdot 10^5} \right) \cdot 0,017^2} =$$

$$= 879,06 \text{ МН/м.}$$

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

$$\alpha = 1 - \frac{y_n - (y_\phi \cdot e + y_\phi \cdot e) \cdot b}{y_n + y_\phi + (y_\phi + y_\phi) \cdot b^2} =$$

$$= 1 - \frac{9,69 \cdot 10^{-4} - (0,228 \cdot 0,045 + 0,228 \cdot 4,5 \cdot 10^{-2}) \cdot 0,017}{9,69 \cdot 10^{-4} + 1,86 \cdot 10^{-5} + (0,228 + 0,228) \cdot 0,017^2} =$$

$$= 0,459.$$

Визначаємо за [34] температурні коефіцієнти лінійного розширення матеріалів болта, фланця та шайби:

$$\alpha_\phi = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C},$$

$$\alpha_{\phi} = 12,2 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C},$$

$$\alpha_{uu} = 11,9 \cdot 10^{-6} \text{ 1/C}.$$

Також за [34] визначаємо товщину шайби:

$$h_{uu} = 0,0033 \text{ м.}$$

Навантаження, яке викликане обмеженістю температурних деформацій, МН:

$$\begin{aligned} Q_t &= \gamma \cdot [(\alpha_{\phi} \cdot h + \alpha_{uu} \cdot h_{uu}) \cdot (t_{\phi} - 20) + (\alpha_{\phi} \cdot h + \alpha_{uu} \cdot h_{uu}) \cdot (t_{\phi} - 20) - \alpha_{\phi} \cdot (h \\ &\quad + h) \cdot (t_{\phi} - 20)] = \\ &= 879,06 \cdot [(12,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,003 + 11,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,005) \cdot (340 - 20) + (12,2 \\ &\quad \cdot 10^{-6} \cdot 0,035 + 11,9 \cdot 10^{-6} \cdot 0,003) \cdot \\ &\quad \cdot (340 - 20) - 11,9 \cdot 10^{-6} \cdot (0,003 + 0,033) \cdot (340 - 20)] = 3,4 \cdot 10^{-2} \text{ МН.} \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} P_{\phi 1} &= \max \left\{ \alpha \cdot (Q_{\phi} + F) + R_n + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{cn}}; \alpha \cdot (Q_{\phi} + F) + R_n + \frac{4 \cdot \alpha_M \cdot |M|}{D_{cn}} \right. \\ &\quad \left. - Q_t \right\} = \\ &= \max \left\{ 0,45 \cdot (0,374 + 0) + 1,46 \cdot 10^{-3} + \frac{4 \cdot 0 \cdot |0|}{0,43}; 0,45 \cdot (0,374 + 0) + \right. \\ &\quad \left. 1,46 \cdot 10^{-3} + \frac{4 \cdot 0 \cdot |0|}{0,43} - 3,4 \cdot 10^{-2} \right\} = \max\{0,186; 0,212\} = 0,212 \text{ МН.} \end{aligned}$$

де $\alpha_M = 0$ – зовнішній згинаючий момент.

Номінальне допустиме напруження для болтів в робочих умовах визначаємо за додатком:

$$[\sigma]_{\phi} = 170 \text{ МПа.}$$

Розрахункове навантаження на болти при затягуванні, яке необхідне для забезпечення обтиснення прокладки і мінімального початкового натягнення болтів:

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 69
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$P_{\delta 2} = \max \{ P_{\delta 2m}; 0,4 \cdot A_{\delta} \cdot [\sigma]_{\delta}^{\delta} \} = \max \{ 0,029; 0,4 \cdot 5,1 \cdot 10^{-3} \cdot 170 \} = \\ = \max \{ 0,029; 0,346 \} = 0,346 \text{ МН.}$$

Розрахункове навантаження на болти при затягуванні фланцевого з'єднання:

$$P_{\delta}^M = \max \{ P_{\delta 1}; P_{\delta 2} \} = \max \{ 0,212; 0,346 \} = 0,346 \text{ МН.}$$

Розрахункове навантаження на болти фланцевих з'єднань у робочих умовах:

$$P_{\delta}^p = P_{\delta}^M + (1 - \alpha) \cdot (Q_d + F) + Q_t + \frac{4 \cdot (1 - \alpha_M) \cdot |M|}{D_{cn}} = 0,346 + (1 - \\ 0,459) \cdot (0,037 + 0) + 3,39 \cdot 10^{-3} + \frac{4 \cdot (1 - 0) \cdot |0|}{0,6} = 0,582 \text{ МН.}$$

Перевірка міцності болтів і прокладки.

Розрахункове напруження в болтах фланцевих з'єднань при затягуванні:

$$\sigma_{\delta 1} = \frac{P_{\delta}^M}{A_{\delta}} = \frac{0,346}{5,1 \cdot 10^{-3}} = 68 \text{ МПа.}$$

Розрахункове напруження в болтах фланцевих з'єднань в робочих умовах:

$$\sigma_{\delta 2} = \frac{P_{\delta}^p}{A_{\delta}} = \frac{0,582}{5,1 \cdot 10^{-3}} = 114,4 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження для болтів при затягуванні:

$$[\sigma]_M^{\delta} = \xi \cdot K_{y.p} \cdot K_{y.z} \cdot K_{y.t} \cdot [\sigma]_n^{\delta} = 1,2 \cdot 1,3 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 170 = 265 \text{ МПа.}$$

де $K_{y.p} = 1,3$ – коефіцієнт умов роботи,

$K_{y.z} = 1,0$ – коефіцієнт умов затягування,

$K_{y.t} = 1,0$ – коефіцієнт, який враховує навантаження від температурних деформацій,

$\xi = 1,2$ – коефіцієнт збільшення допустимих напружень при затягуванні.

Умова міцності болтів фланцевих з'єднань при затягуванні:

$$\sigma_{\delta 1} \leq [\sigma]_M^{\delta},$$

$$68 \text{ МПа} < 265 \text{ МПа.}$$

Умова міцності виконується.

Допустиме напруження для болтів в робочих умовах і при випробуваннях:

$$[\sigma]_p^{\bar{\sigma}} = K_{y.p} \cdot K_{y.z} \cdot K_{y.m} \cdot [\sigma]_n^{\bar{\sigma}} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 104 = 140,4 \text{ МПа.}$$

Умова міцності болтів фланцевих з'єднань в робочих умовах:

$$\sigma_{\bar{\sigma}2} \leq [\sigma]_p^{\bar{\sigma}},$$

$$45,197 \text{ МПа} < 140,4 \text{ МПа.}$$

Умова міцності виконується.

Розрахунковий питомий тиск:

$$q = \frac{\max\{P_{\bar{\sigma}}^M; P_{\bar{\sigma}}^P\}}{\pi \cdot D_{cn} \cdot b_n} = \frac{\max\{0,346; 0,582\}}{3,14 \cdot 0,69 \cdot 0,0135} = \frac{0,582}{3,14 \cdot 0,69 \cdot 0,0135} = 20 \text{ МПа.}$$

Визначаємо за [26] допустимий питомий тиск:

$$[q] = 36 \text{ МПа.}$$

Умова міцності для м'яких прокладок:

$$q \leq [q],$$

$$20 \text{ МПа} < 36 \text{ МПа.}$$

Умова міцності виконується.

Розрахунок флінців на статичну міцність.

Коефіцієнт, який враховує вигин тарілки фланця між болтами:

$$C_F = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{\pi \cdot D_{\bar{\sigma}}}{n_{\bar{\sigma}}}}{2 \cdot d + \frac{6 \cdot h}{m + 0,5}}} \right\} = \max \left\{ 1; \sqrt{\frac{\frac{3,14 \cdot 0,725}{20}}{2 \cdot 0,033 + \frac{6 \cdot 0,03}{0,5 + 0,5}}} \right\} \\ = \max\{1; 1,16\} = 1,16.$$

Розрахунковий згинаючий момент, який діє на фланець при затягуванні плоского фланця:

$$M_M = C_F \cdot P_{\bar{\sigma}}^M \cdot b = 1,16 \cdot 0,346 \cdot 0,0175 = 7,05 \cdot 10^{-3} \text{ МН}\cdot\text{м.}$$

Розрахунковий згинаючий момент, який діє на фланець в робочих умовах при застосуванні плоского фланця:

$$M^P = C_F \cdot \max\{[P_{\bar{\sigma}}^P \cdot b + (Q_D + Q_{FM}) \cdot e]; [Q_D + Q_{FM}] \cdot e\} =$$

$$= 1 \cdot \max\{[1,16 \cdot 0,34 + (0,0175 + 0) \cdot 0,045]; [0,373 + 0] \cdot 0,045\} = \\ = 1 + \max\{0,027; 0,01\} = 0,027 \text{ МН} \cdot \text{м}.$$

Зведений діаметр плоского фланця:

$$D^* = D = 0,6 \text{ м}.$$

Меридіальне згинаюче напруження в обичайці плоского фланця при зтягуванні:

$$\sigma_0^M = \sigma_1^M = \frac{M^M}{\lambda \cdot (S_1 - C)^2 \cdot D^*} = \frac{7,05 \cdot 10^{-3}}{0,572 \cdot (0,012 - 0,002)^2 \cdot 0,6} = 102,4 \text{ МПа}.$$

Радіальне напруження плоского фланця в умовах зтягування:

$$\sigma_R^M = \frac{(1,33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0) \cdot M^M}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} = \frac{(1,33 \cdot 0,85 \cdot 0,003 + 0,085) \cdot 0,007}{0,572 \cdot 0,003^2 \cdot 0,085 \cdot 0,6} \\ = 47,3 \text{ МПа}.$$

Розрахунковий коефіцієнт β_Y :

$$\beta_Y = \frac{1}{K - 1} \cdot \left(0,69 + 5,72 \cdot \frac{K^2 \cdot \lg K}{K^2 - 1} \right) = \frac{1}{1,3 - 1} \cdot \left(0,69 + 5,72 \cdot \frac{1,3^2 \cdot \lg 1,3}{1,13^2 - 1} \right) \\ = 7,621.$$

Розрахунковий коефіцієнт β_Z :

$$\beta_Z = \frac{K^2 + 1}{K^2 - 1} = \frac{1,3^2 + 1}{1,3^2 - 1} = 3,899.$$

Окружне напруження плоского фланця в умовах зтягування:

$$\sigma_T^M = \frac{\beta_Y \cdot M^M}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^M = \frac{7,621 \cdot 7,05 \cdot 10^{-3}}{0,03^2 \cdot 0,6} - 3,899 \cdot 47,3 = 147,2 \text{ МПа}.$$

Меридіальне згинаюче напруження в обичайці плоского фланця в робочих умовах:

$$\sigma_0^P = \sigma_1^P = \frac{M^P}{\lambda \cdot (S_0 - C)^2 \cdot D^*} = \frac{3,14 \cdot 10^{-3}}{0,572 \cdot (0,012 - 0,002)^2 \cdot 0,6} = 3,05 \text{ МПа}.$$

Меридіальне мембранне напруження в обичайці плоского фланця в робочих умовах:

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 72
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$\sigma_{0mm}^P = \frac{0,785 \cdot D \cdot p + F \pm \frac{4 \cdot |M|}{D + S_0}}{\pi \cdot (D + S_0) \cdot (S_0 - C)} = \frac{0,785 \cdot 0,6 \cdot 0,5 + 0 \pm \frac{4 \cdot |0|}{1 + 0,012}}{3,14 \cdot (0,6 + 0,012) \cdot (0,012 - 0,002)} = 14,7 \text{ МПа.}$$

Окружне мембранне напруження від дії тиску в обичайці плоского фланця в робочих умовах:

$$\sigma_{0mo}^P = \frac{p \cdot D}{2 \cdot (S_0 - C)} = \frac{0,5 \cdot 0,6}{2 \cdot (0,012 - 0,002)} = 30 \text{ МПа.}$$

Радіальне напруження плоского фланця в робочих умовах:

$$\sigma_R^P = \frac{(1,33 \cdot \beta_F \cdot h + l_0) \cdot M^P}{\lambda \cdot h^2 \cdot l_0 \cdot D} = \frac{(1,33 \cdot 0,85 \cdot 0,03 + 0,085) \cdot 0,03}{0,573 \cdot 0,03^2 \cdot \frac{0,0}{8} \cdot 0,9} = 1,2 \text{ МПа.}$$

Окружне напруження плоского фланця в робочих умовах:

$$\sigma_T^P = \frac{\beta_Y \cdot M^P}{h^2 \cdot D} - \beta_Z \cdot \sigma_R^P = \frac{7,621 \cdot 0,03}{0,03^2 \cdot 0,6} - 3,899 \cdot 1,2 = 4,2 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнт при розрахунку без урахування обмеженості температурних деформацій:

$$K_T = 1,3.$$

Коефіцієнт K_S :

$$K_S = 1.$$

Допустиме значення загальних мембранних і згинаючих напружень:

$$[\sigma]_M = 1,5 \cdot [\sigma] = 1,5 \cdot 185 = 277,2 \text{ МПа.}$$

Допустиме значення сумарних умовних пружних напружень:

$$[\sigma]_R = 3 \cdot [\sigma] = 3 \cdot 185 = 554 \text{ МПа.}$$

Умова статисної міцності плоских фланців при затягуванні:

$$\begin{aligned} \max\{|\sigma_0^M + \sigma_R^M|; |\sigma_0^M + \sigma_T^M|\} &\leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_M, \\ \max\{|102,4 + 47,3|; |102,4 + 147,2|\} &\leq 1,0 \cdot 1,3 \cdot 277 \\ \max\{149,8; 249\} &\leq 277, \\ 249 \text{ МПа} &< 277 \text{ МПа.} \end{aligned}$$

Умова статичної міцності виконується.

Умова статичної міцності плоских фланців в робочих умовах:

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 73
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$\max \left\{ \begin{array}{l} |\sigma_0^P - \sigma_{0MM}^P + \sigma_R^P|; \\ |\sigma_0^P - \sigma_{0MM}^P + \sigma_T^P|; \\ |\sigma_0^P + \sigma_{0MM}^P| \end{array} \right\} \leq K_S \cdot K_T \cdot [\sigma]_0,$$

$$\max \left\{ \begin{array}{l} 14,7; \\ 147,2; \\ 4,2 \end{array} \right\} \leq 240,$$

$$147,2 \text{ МПа} < 240 \text{ МПа.}$$

Умова статичної міцності виконується.

Визначаємо за [34] коефіцієнт K_Θ :

$$K_\Theta = 1$$

Допустимий кут повороту приварного в стик фланця:

$$[\Theta] = 0,095 \text{ рад.}$$

Визначаємо за [34] модуль повздовжньої пружності в умовах розтягу матеріалу фланця при розрахунковій температурі:

$$E = 1,91 \cdot 10^5 \text{ МПа.}$$

Перевірка умови герметичності плоского фланця в робочих умовах:

$$\theta = M^P \cdot y_\phi \cdot \frac{E^{20}}{E} \leq K_\Theta \cdot [\sigma],$$

$$\theta = 0,03 \cdot 0,228 \cdot \frac{1,99 \cdot 10^5}{1,86 \cdot 10^5} \leq 1 \cdot 0,0095,$$

$$7,66 \cdot 10^{-3} < 9,5 \cdot 10^{-3}.$$

Умова виконується.

Допустимий кут повороту кільця вільного фланця:

$$[\Theta]_K = 0,02 \text{ рад.}$$

Висновок: Всі умови виконуються, фланці підібрані вірно.

5.7 Розрахунок геометричних розмірів деталей для укріплення поодинокого отвору

Метою розрахунку є визначення необхідності укріплення найбільшого допустимого діаметра поодинокого отвору. Розрахункова

схема поодинокого отвору, який потребує укріплення наведена на рисунку 5.7.

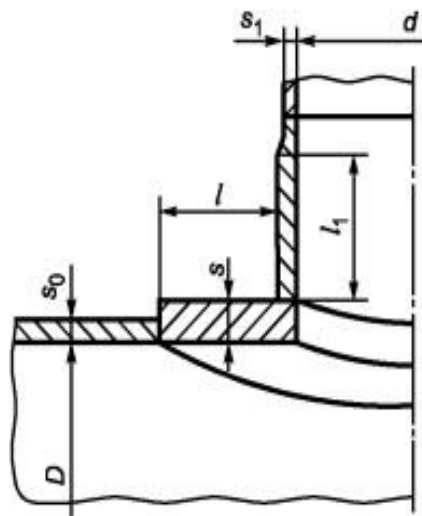


Рисунок 5.7 – Розрахункова схема укріплення отвору

Вихідні дані:

Розрахунковий діаметр, D , м	0,207;
товщина стінки, S , м	$6,3 \cdot 10^{-3}$;
сума додатків на розрахункову товщину, C , м	$2,6 \cdot 10^{-3}$.

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [34].

$$[\sigma] = [\sigma]_1 = [\sigma]_3 = 185 \text{ МПа},$$

Відношення допустимих напружень X_1, X_3 :

$$X_1 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]} \right\} = \min \left\{ 1; \frac{185}{185} \right\} = 1,$$

$$X_3 = \min \left\{ 1; \frac{[\sigma]_3}{[\sigma]} \right\} \min \left\{ 1; \frac{185}{185} \right\} = 1$$

Розрахунковий внутрішній діаметр елемента, який укріплюється D_p , м:

$$D_p = D = 0,207$$

Розрахунковий діаметр отвору в стінці циліндричної обичайки, конічного переходу або опуклого днища при наявності штуцера з круглим поперечним перерізом, вісь якого збігається з нормаллю до поверхні в центрі отвору d_p :

$$d_p = d + 2 \cdot C = 0,207 + 2 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3} = 0,212 \text{ м}$$

де $d = 0,207$ м – внутрішній діаметр штуцера, отвору або люка (штуцер для вихідної суміші).

Розрахунковий діаметр отвору, що не потребує зміцнення, при відсутності надлишкової товщини стінки посудини d_{op} :

$$d_{op} = 0,4 \cdot \sqrt{D_p \cdot (S - C)} = 0,4 \cdot \sqrt{0,6 \cdot (6,3 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3})} = 0,019 \text{ м.}$$

Розрахункова довжина зовнішньої частини штуцера (зовнішнього штуцера) з круглим поперечним перерізом, яка бере участь в укріпленні отвору і враховується при розрахунку, l_{1p} :

$$l_{1p} = \min\{l_1; 1,25 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot C) \cdot (S - C)}\} = \{0,1; 1,25 \cdot \sqrt{(0,207 + 2 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3}) \cdot (6,3 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3})}\} = 0,035 \text{ м.}$$

де $l_1 = 0,100$ мм – виконавча довжина зовнішньої частини патрубку штуцера (зовнішнього штуцера), який виступає за корпус колони.

Розрахункова довжина внутрішньої частини штуцера (внутрішнього штуцера) з круглим поперечним перерізом, яка бере участь в укріпленні отвору і враховується при розрахунку, l_{3p} :

$$l_{3p} = \min\{l_3; 0,5 \cdot \sqrt{(d + 2 \cdot C) \cdot (S - C - C_1)}\} = \{0,207; 0,5 \cdot \sqrt{(0,207 + 2 \cdot 2,6 \cdot 10^{-3}) \cdot (6,3 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-3})}\} = 0,048 \text{ м.}$$

де $l_3 = 0,207$ м – виконавча довжина елемента, що примикає до циліндричної частини колони; $C_1 = 0,002$ м – додаток для компенсації корозії стінки внутрішньої частини штуцера.

Умова укріплення отвору:

$$l_{1p} \cdot (S - Sp - C_1) \cdot X_1 + l_{3p} \cdot (S - Sp - C_1) \cdot X_3 \geq 0,5 \cdot (d_p - d_{op}) \cdot Sp = \\ 0,035 \cdot (6,3 \cdot 10^{-3} - 4,2 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3}) \cdot 1 + 0,0478 \cdot 10^{-3} \cdot (6,3 \cdot 10^{-3} - \\ 4,2 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3}) \cdot 1 \geq 0,5 \cdot (0,2112 - 0,0188) \cdot 4,2 \cdot 10^{-3} = \\ = 3,12 \cdot 10^{-4} \geq 4,06 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Умова укріплення отвору виконується

Висновок: Умова укріплення поодинокого отвору виконується, тому

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 76
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

немає необхідності у додатковому потовщенні штуцерів шляхом вварювання кілець жорсткості.

5.8 Розрахунок товщини теплоізоляційного шару

Мета: розрахувати товщину теплової ізоляції.

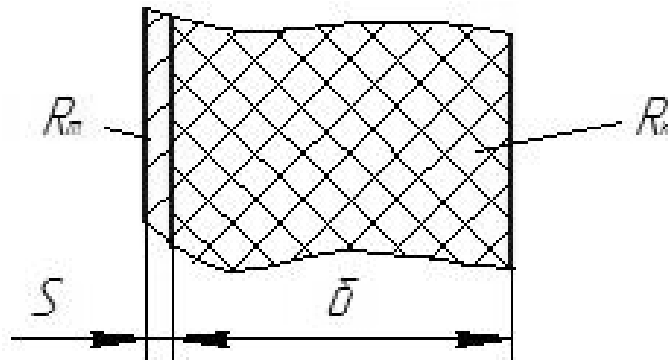


Рисунок 5.8 – Розрахункова схема

Вихідні дані:

Матеріал	Сталь 09Г2С;
Діаметр корпусу D, м	0,6;
Температура розчину t_w , К	340.

Розрахунок буде проводитися за алгоритмом, запропонованим авторами [35].

Середня температура теплоізоляційного шару для об'єктів, розташованих на відкритому повітрі, становить:

влітку

$$t_m = \frac{t_w + 40}{2} = \frac{340 + 313}{2} = 326,5\text{К.}$$

взимку

$$t_m = \frac{t_w - 273}{2} + 273 = \frac{340 - 273}{2} + 273 = 306,5\text{К.}$$

Теплопровідність теплоізоляційного шару в конструкції
влітку

$$\lambda_k = 0,049 + 0,0002 \cdot t_m = 0,049 + 0,0002 \cdot (326,5 - 273) = 0,156.$$

взимку

$$\lambda'_k = 0,049 + 0,0002 \cdot t_m = 0,049 + 0,0002 \cdot (306,5 - 273) = 0,116.$$

Оскільки $\lambda_k > \lambda'_k$, то розраховується тільки для літніх умов:

$$\lambda_k = 0,156 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}.$$

Опір теплопередачі теплоізоляційної конструкції:

$$R_{tot} = \frac{t_w - t_e}{q \cdot K_1} = \frac{(340 - 273) - 20}{80 \cdot 1} = 0,588 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}.$$

де q – нормована поверхня щільності теплового потоку, Вт/м²К.

Для території України $K_1 = 1,0$.

Термічний опір теплоізоляційної конструкції:

$$R_k = R_{tot} - \frac{1}{\alpha_e} - R_m = 0,588 - \frac{1}{7} - 0 = 0,445 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}.$$

де $\alpha_e = 7$ Вт/м²К, коефіцієнт тепловіддачі від зовнішньої поверхні ізоляції до оточуючого середовища, за умови що апарат встановлений в приміщенні.

Оскільки обичайка корпусу апарата виготовлена зі сталевого прокату, то термічний опір $R_m = 0$.

Товщина теплоізоляційного шару δ_k :

$$\delta_k = \lambda_k \cdot R_k = 0,156 \cdot 0,445 = 0,069 \text{ м}.$$

Товщина теплоізоляційного виробу δ_1 з матеріалів, що ущільнюються, до встановлення на ізольовану поверхню визначаємо з урахуванням коефіцієнта ущільнення K_e , який для мінераловатних прошивних мат становить 1,2.

Товщина ізоляції для циліндричної поверхні:

$$\delta_1 = \delta_k K_e \frac{d + \delta_k}{d + 2\delta_k} = 0,069 \cdot 1,2 \cdot \frac{0,608 + 0,159}{0,608 + 2 \cdot 0,159} = 0,076 \text{ м},$$

де $K_e = 1,2$ – коефіцієнт ущільнення теплоізоляційних матеріалів для матів мінераловатних прошивних.

Висновок: відповідно до ГОСТ 21880-94 теплоізоляційного шару виконується з мінераловатного прошивного матеріалу марки 125, товщина становить 80 мм.

5.9 Розрахунок товщини стінки циліндричної обичайки

Метою розрахунку є визначення товщини стінки циліндричної обичайки та перевірка її на міцність під дією внутрішнього тиску [34]. Схема до розрахунку циліндричної обичайки показана на рисунку 5.9.

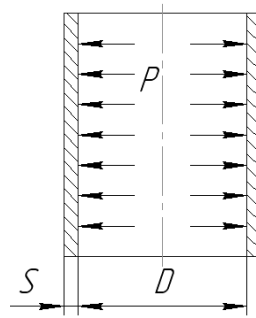


Рисунок 5.9 – Розрахункова схема циліндричної обичайки навантаженої внутрішнім надлишковим тиском

Вихідні дані:

Внутрішній діаметр апарату D , м	0,600;
Розрахунковий тиск p_r , МПа	0,5;
Розрахункова температура t_r , К	340;
Допустиме напруження для матеріалу, $[\sigma]$ МПа	185;
Матеріал	09Г2С;

Розрахунок передбачає визначення товщини стінки обичайки, що знаходиться під дією внутрішнього тиску, із урахуванням додатків на корозію [34].

Розрахункова товщина стінки:

$$s_r = \frac{p_r \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi - p_r} = \frac{0,5 \cdot 0,6}{2 \cdot 185 \cdot 0,8 - 0,5} = 1,015 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Де $\varphi = 0,7$ - коефіцієнт міцності зварного шва

Сума додатків до розрахункової товщини:

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 79
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

$$c = c_1 + c_2 = 2 \cdot 10^{-3} + 0,6 \cdot 10^{-3} = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Де $c_1 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $c_2 = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

Проведемо розрахунок виконавчої товщини:

$$s_2 = s_r + c = 1,015 \cdot 10^{-4} + 2,6 \cdot 10^{-3} = 3,16 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Приймаємо товщину стінки 4 мм.

Так як величина розрахункової виконавчої товщини менша за прийняту, переходимо до перевірки виконання умови міцності.

Допустимий тиск:

$$[\rho] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi \cdot (s - c)}{D + (s - c)} = \frac{2 \cdot 185 \cdot 0,8 \cdot (4 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3})}{0,6 + (4 \cdot 10^{-3} - 2,6 \cdot 10^{-3})} = 0,688 \text{ МПа.}$$

Перевіряємо умову міцності:

$$\rho_r \leq [\rho],$$

$$0,5 \text{ МПа} \leq 0,688 \text{ МПа.}$$

Висновок: Через те, що умови застосування формул виконуються, а допустимий внутрішній надлишковий тиск більший за розрахунковий, то приймаємо товщину стінки $s = 4 \text{ мм}$.

6 Рекомендації з монтажу та експлуатації апарата

Ефективність і довговічність роботи вертикального кожухотрубного дефлегматора з нерухомими трубними решітками визначається не лише його конструктивною досконалістю, а й рівнем інженерної культури монтажу та дисципліною експлуатації. У виробництві фенолу та ацетону, де поєднуються підвищені температури, тиски та токсичні середовища, будь-яке відхилення від регламенту здатне трансформуватися у технологічний ризик. Саме тому рекомендації щодо монтажу, пуску, експлуатації та ремонту апарата повинні базуватися на вимогах чинних нормативних документів України та кращих практиках галузі.

Монтаж дефлегматора виконується відповідно до НПАОП 0.00-1.81-18 «Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском» [36] та ДСТУ EN 13445 «Нероз'ємні посудини, що працюють під тиском» [37]. Перед початком робіт проводиться вхідний контроль: перевіряється комплектність, відповідність кресленням, стан зварних швів і фланцевих з'єднань, відсутність механічних пошкоджень трубного пучка. Особливу увагу приділяють герметичності вузлів, оскільки саме вона визначає безпечність подальшої експлуатації [38].

Установка апарата здійснюється на підготовлений фундамент або металеві опори, які повинні забезпечувати рівномірний розподіл навантажень. Відхилення вертикальності не повинно перевищувати 0,2 % від висоти апарата, що запобігає перекосам і порушенню гідродинаміки потоків. Приєднання трубопроводів виконується з урахуванням компенсації температурних деформацій: застосовуються гнучкі вставки або компенсатори, що знижують механічні напруження на штуцерах.

Особливого значення набуває правильна організація стропування та підйому апарата. Під час монтажу використовуються стропи, розраховані на навантаження з коефіцієнтом запасу не менше 5, відповідно до правил безпечної

експлуатації вантажопідіймальних механізмів. Кут між вітками стропів не повинен перевищувати 90° , що забезпечує рівномірний розподіл навантаження. Підйом здійснюється плавно, без ривків, із контролем центру ваги апарата. Забороняється перебування персоналу в зоні можливого падіння вантажу: $1,25 \div 1,5 \cdot R_{роб}$ тобто при робочому тиску 2 МПа – 2,5–3,0 МПа. Випробування дозволяють перевірити герметичність і міцність апарата перед введенням в експлуатацію.

Пуск дефлегматора здійснюється у режимі поступового навантаження. Різкі температурні зміни є неприпустимими, оскільки викликають термічні напруження. Допустима швидкість нагрівання не повинна перевищувати $50^\circ\text{C}/\text{год}$, що забезпечує рівномірний прогрів металу і збереження його міцнісних характеристик. Перед пуском перевіряється робота контрольно-вимірювальних приладів, справність запобіжної арматури та наявність заземлення (опір не більше 4 Ом).

У процесі експлуатації дефлегматор працює в умовах складної тепло- та масообмінної взаємодії. Стабільність технологічного режиму досягається шляхом контролю температури, тиску та витрати теплоносіїв. Робочі параметри не повинні перевищувати проєктних значень: температура - до $150\text{--}200^\circ\text{C}$, тиск - до 2–4 МПа. Відповідно до санітарних норм ДСН 3.3.6.042-99 концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони (фенол - $0,3\text{ мг/м}^3$, ацетон - 200 мг/м^3) не повинна перевищувати гранично допустимих значень, що забезпечується ефективною вентиляцією [39].

Експлуатаційна надійність апарата значною мірою залежить від регулярного технічного обслуговування. Регламентні роботи включають:

- візуальний огляд обладнання – не рідше одного разу на місяць;
- перевірку запобіжних клапанів – не рідше одного разу на 6 місяців;
- очищення теплообмінних поверхонь від відкладень;
- періодичні гідравлічні випробування – не рідше одного разу на 3 роки.

Проведення ремонтних робіт вимагає суворого дотримання регламенту. Перед початком ремонту апарат повністю виводиться з експлуатації: знижується тиск до атмосферного, проводиться охолодження та дегазація. Роботи виконуються за нарядом-допуском із обов'язковим контролем повітряного середовища. У замкнутих об'ємах застосовуються засоби індивідуального захисту, а також забезпечується постійний зв'язок з оператором.

Важливою складовою експлуатації є забезпечення пожежної безпеки. Виробництво фенолу та ацетону належить до категорії пожежонебезпечних, що регламентується ДБН В.1.1-7:2016 [40].

Приміщення повинні бути оснащені системами вентиляції, автоматичного пожежогасіння та вибухозахищеним обладнанням. Використання теплоізоляції, контроль герметичності та автоматизація процесу дозволяють мінімізувати ризик аварій.

Отже, монтаж і експлуатація дефлегматора є комплексним інженерним процесом, що вимагає поєднання нормативної дисципліни, технічної точності та системного контролю. Дотримання викладених рекомендацій забезпечує надійну роботу апарата, підвищує ефективність теплообміну та створює безпечні умови праці в умовах сучасного хімічного виробництва.

7 Рівень стандартизації та уніфікації

За результатами аналізу конструкції дефлегматора встановлено, що загальна кількість елементів становить, 32 одиниць. Із них стандартними є 23 елементи (болти, гайки, шайби, фланці, прокладки, арматура), уніфікованими - 7 (трубний пучок, перегородки, патрубки, опорні елементи), а оригінальними - 23 (корпус, трубні решітки, окремі конструктивні вузли).

Тоді коефіцієнт стандартизації [41]:

$$K_c = \frac{n_c}{n_{\text{заг}}} = \frac{20}{23} = 0,87$$

де n_c – кількість стандартних деталей, $n_c = 20$;

$n_{\text{заг}}$ – загальна кількість деталей, $n_{\text{заг}} = 23$.

Коефіцієнт уніфікації визначаємо із залежності [41]:

$$K_y = \frac{n_c + n_{\text{ум}}}{n_{\text{заг}}} = \frac{20 + 1}{23} = 0,91$$

де $n_{\text{ум}}$ – кількість уніфікованих деталей, $n_{\text{ум}} = 1$.

Отримані значення свідчать про високий ступінь використання типових і стандартних елементів у конструкції дефлегматора. Це відповідає сучасним вимогам до проєктування промислового обладнання, згідно з якими частка стандартизованих і уніфікованих деталей повинна перевищувати 70–80 %.

Аналіз показує, що найбільший внесок у рівень стандартизації забезпечують кріпильні елементи, фланцеві з'єднання та трубопровідна арматура, які виготовляються відповідно до державних стандартів [42]. Уніфікація досягається за рахунок використання типових конструктивних рішень, зокрема трубного пучка, перегородок і патрубків, що широко застосовуються у кожухотрубних теплообмінниках.

Водночас наявність оригінальних елементів конструкції є обґрунтованою, оскільки вони визначають специфіку роботи апарата в умовах конкретного технологічного процесу. До таких елементів належать корпус дефлегматора,

трубні решітки та окремі вузли, що забезпечують його інтеграцію у технологічну схему виробництва фенолу та ацетону [43, 44].

Підвищення рівня стандартизації та уніфікації має низку важливих переваг: зниження вартості виготовлення, скорочення термінів виробництва, спрощення складання та ремонту, а також підвищення надійності експлуатації. Крім того, це сприяє зменшенню номенклатури запасних частин і полегшує технічне обслуговування обладнання.

Таким чином, проведений аналіз показує, що розроблений дефлегматор характеризується високим рівнем стандартизації та уніфікації, що відповідає сучасним вимогам машинобудування та забезпечує його ефективну експлуатацію у складі технологічної установки.

Висновок: розраховано коефіцієнти стандартизації та уніфікації, які становлять: $K_c=0,87$; $K_y=0,91$.

8 Техніко-економічне обґрунтування модернізації

Метою проведення техніко-економічного аналізу є оцінка доцільності впровадження запропонованого конструктивного удосконалення та визначення його впливу на основні показники роботи обладнання.

Як напрям модернізації запропоновано використання системи сегментованих перегородок спеціальної конфігурації, розташованих під кутом 15–25° до осі апарата з чергуванням напрямку сегментації. Запропонована модернізація спрямована на інтенсифікацію процесів тепломасообміну в міжтрубному просторі дефлегматора та покращення гідродинамічних умов руху парового потоку. Очікується більш рівномірний розподіл потоку по перерізу апарата, зменшення зон неефективного теплообміну та підвищення загальної інтенсивності конденсації.

Економічна доцільність модернізації визначається зниженням експлуатаційних витрат, скороченням енергоспоживання та підвищенням надійності роботи установки. Реалізація запропонованого рішення не потребує повної заміни обладнання, що забезпечує відносно низький рівень інвестицій та скорочує термін окупності проєкту.

Розрахунки ефективності на проведення модернізації устаткування полягають у визначенні коефіцієнта ефективності витрат, який розраховується за формулою:

$$n_{pi} = 1 - \frac{M_i + S_{ei}}{K_{Hi} \cdot \alpha \beta + S_{ai}}, \quad (8.1)$$

де M_i – сукупні витрати на проведення модернізованого устаткування, грн;

S_{ei} – перевищення експлуатаційних витрат модернізованого устаткування порівняно з новим аналогічним устаткуванням, грн;

K_{Hi} – оптова ціна придбання нового аналогічного устаткування, грн.

α – коефіцієнт співвідношення продуктивності модернізованого устаткування та аналогічного нового устаткування;

β – коефіцієнт співвідношення тривалості ремонтного циклу модернізованого устаткування та аналогічного нового устаткування;

S_{ai} – втрати від недоамортизації устаткування, яке підлягає модернізації.

Таблиця 8. 1. Техніко – економічні показники устаткування

Найменування показників	Одиниця виміру	Устаткування, яке підлягає модернізації	Нове аналогічне устаткування
2	3	4	5
Продуктивність	кг/с	0,25	0,35
Час роботи до ремонту	год	1080	1008
Тривалість ремонтного циклу	год	24	15

Величини сукупних витрат на модернізацію устаткування може бути розраховано по формулі [45]:

$$M_i = \Phi_{\text{перв}}^{\text{мод}} \cdot K_i = 120000 \cdot 0,06 = 7200 \text{ грн}$$

де $\Phi_{\text{перв}}^{\text{мод}}$ – первісна (відновлена) вартість устаткування, яка підлягає модернізації, згідно даних підприємств, де експлуатується аналогічне обладнання, первісна вартість теплообмінного апарату.

K_i – коефіцієнт витрат, величина якого залежить від виду і типу устаткування, яка підлягає модернізації, в даному випадку $K_i = 0,06$ для теплообмінних апаратів [45].

Модернізоване устаткування у процесі подальшої експлуатації, як правило, вимагає більш високих експлуатаційних (поточних) витрат у порівнянні з аналогічним новим устаткуванням.

Експлуатаційні (поточні) витрати при роботі устаткування складаються з таких витрат:

- витрати паливно-мастильних матеріалів;
- витрати на придбання та виготовлення необхідних запасних частин;
- витрати на оплату праці ремонтного персоналу;
- інші поточні експлуатаційні витрати.

З достатнім для розрахунків ступенем точності, який базується на практичних даних підприємства хімічного машинобудування, величина перевищення експлуатаційних (поточних) витрат по модернізованому устаткуванню порівняно з новим аналогічним S_{ei} може бути розрахована по формулі:

$$S_{ei} = q_{bi} \cdot \Phi_{i_{перв}}^{MOD} - q_{bH} \cdot \Phi_{i_{перв}}^{HOB} = 0,12 \cdot 120000 - 0,1 \cdot 140000 = 400 \text{ грн},$$

де q_{bi} – коефіцієнт експлуатаційних (поточних) витрат устаткування, яке підлягає модернізації, в даному випадку $q_{bi} = 0,12$ – для теплообмінних апаратів [45, табл. 4];

$\Phi_{i_{перв}}^{HOB}$ – первісна вартість нового (аналогічного) устаткування.

q_{bH} – коефіцієнт експлуатаційних (поточних) витрат аналогічного нового устаткування, в даному випадку $q_{bH} = 0,1$ для теплообмінних апаратів [45, табл. 4].

Коефіцієнт співвідношення тривалості ремонтного циклу модернізованого устаткування та аналогічного нового:

$$\beta = \frac{T_{MOD}}{T_{HOB}} = \frac{1080}{1008} = 1,071,$$

де T_{MOD} – тривалість ремонтного циклу устаткування, яке підлягає модернізації;

T_{HOB} – тривалість ремонтного циклу аналогічного нового устаткування.

Коефіцієнт співвідношення продуктивності вдосконаленого устаткування та аналогічного нового устаткування α розраховується по формулі [45]:

$$\alpha = \frac{\Pi_i}{\Pi_{HOB}} = \frac{4}{4,8} = 0,833,$$

де Π_i – продуктивність або інший один з найбільш важливих показників, який характеризує роботу устаткування, яке підлягає модернізації;

Π_{HOB} – продуктивність або інший один з найбільш важливих показників, який характеризує роботу аналогічного нового устаткування.

Таблиця 8.2 – Значення коефіцієнту ефективності витрат n_{pi} на модернізацію устаткування.

Величина коефіцієнта n_{pi}	Висновок щодо доцільності модернізації устаткування
$n_{pi} > 0$	Модернізація устаткування з економічної точки зору доцільна
$n_{pi} < 0$	Модернізація устаткування з економічної точки зору недоцільна. Доцільним є придбання нового устаткування.
$n_{pi} = 0$	Рішення про модернізацію устаткування приймається, виходячи з конкретних виробничих обставин.

Коефіцієнт ефективності витрат за формулою (8.1):

$$n_{pi} = 1 - \frac{M_i + S_{ei}}{K_{Hi} \cdot \alpha\beta + S_{ai}} = 1 - \frac{7200 + 400}{100000 \cdot 0,833 \cdot 1,07 + 0} = 0,915$$

де $S_{ai} = 0$ – витрати від не до амортизації устаткування, яка підлягає модернізації;

K_{Hi} – оптова ціна придбання нового аналогічного устаткування, грн.

Висновок: оскільки $n_{pi} = 0,915 > 0$, то модернізація устаткування з економічної точки зору доцільна.

Висновки

У дипломному проєкті освітнього ступеня «бакалавр» на тему «Модернізація дефлегматора виробництва фенолу та ацетону» виконано комплекс робіт, спрямованих на вдосконалення конструкції дефлегматора, що є важливим елементом технологічної схеми ректифікації продуктів виробництва фенолу та ацетону. Запропонована модернізація забезпечує підвищення ефективності процесів конденсації парів, покращення теплотехнічних характеристик апарата та зниження питомих енергетичних витрат.

У процесі виконання проєкту проведено аналіз технології виробництва фенолу та ацетону, визначено місце та функціональне призначення дефлегматора в технологічній схемі. Виконано огляд сучасних конструкцій теплообмінного обладнання, проведено аналіз патентних рішень та обґрунтовано вибір конструкції модернізованого апарата. На підставі отриманих результатів виконано тепловий, конструктивний і гідравлічний розрахунки дефлегматора, визначено його основні геометричні параметри та експлуатаційні характеристики, розраховані розміри штуцерів для входу і виходу речовин: для входу парів ацетону – 0,373 м, для входу та виходу води – 0,219 м, для виходу конденсату 0,089 м. Проведено розрахунок опорних лап, геометричних розмірів деталей для укріплення поодинокого отвору.

Також виконано розрахунки на міцність основних елементів конструкції, зокрема обичайки, кришки, фланцевого з'єднання та товщини теплоізоляції. Обґрунтовано вибір конструкційних матеріалів з урахуванням умов експлуатації та властивостей робочих середовищ.

У проєкті розроблено рекомендації щодо монтажу, технічного обслуговування та експлуатації обладнання, проведено оцінку рівня стандартизації та уніфікації конструкції, а також виконано техніко-економічне обґрунтування доцільності впровадження запропонованих технічних рішень.

Розглянуто питання охорони праці та промислової безпеки під час експлуатації дефлегматора.

Графічна частина проєкту включає технологічну схему виробництва фенолу та ацетону через гідроперекис ізопропілбензолу – А1, складальний кресленик апарата – А1, складальний кресленик корпусу – А1, складальний кресленик кришки – А2, складальний кресленик опорної лапи – А3, кресленик трубної решітки – А3, плакат модернізації – А3, модель апарата – А3. До всіх складальних креслень специфікація А4.

Отримані результати свідчать про технічну доцільність модернізації дефлегматора та можливість її практичного впровадження для підвищення ефективності роботи установки виробництва фенолу та ацетону.

Під час виконання дипломного проєкту підготовлено та опубліковано дві тези доповідей у збірниках всеукраїнських науково-практичних конференцій студентів, аспірантів і молодих учених.

Conclusions

In the diploma project of the educational degree "Bachelor" on the topic "Modernization of the dephlegmator for the production of phenol and acetone" a set of works was carried out aimed at improving the design of the dephlegmator, which is an important element of the technological scheme for the rectification of products for the production of phenol and acetone. The proposed modernization ensures an increase in the efficiency of vapor condensation processes, improvement of the heat-technical characteristics of the apparatus and reduction of specific energy costs.

In the process of implementing the project, an analysis of the technology for the production of phenol and acetone was carried out, the place and functional purpose of the dephlegmator in the technological scheme was determined. A review of modern designs of heat exchange equipment was carried out, an analysis of patent solutions was carried out and the choice of the design of the modernized apparatus was justified. Based on the results obtained, thermal, structural and hydraulic calculations of the reflux condenser were performed, its main geometric parameters and operational characteristics were determined, the dimensions of the inlet and outlet fittings for substances were calculated: for the inlet of acetone vapors - 0.373 m, for the inlet and outlet of water - 0.219 m, for the outlet of condensate - 0.089 m. The calculation of the support legs, the geometric dimensions of the parts for strengthening a single hole were performed.

Calculations were also made for the strength of the main structural elements, in particular the shell, cover, flange connection and the thickness of the thermal insulation. The choice of structural materials was justified taking into account the operating conditions and properties of the working environments.

The project developed recommendations for the installation, maintenance and operation of the equipment, an assessment of the level of standardization and unification of the design was carried out, and a feasibility study of the feasibility of implementing the proposed technical solutions was also performed. The issues of

labor protection and industrial safety during the operation of the reflux condenser are considered.

The graphic part of the project includes a technological scheme for the production of phenol and acetone through isopropylbenzene hydroperoxide - A1, assembly drawing of the apparatus - A1, assembly drawing of the body - A1, assembly drawing of the cover – A2, assembly drawing of the support leg - A3, drawing of the pipe grid - A3, modernization poster - A3, model of the apparatus - A3. All assembly drawings are accompanied by a specification A4.

The results obtained indicate the technical feasibility of the modernization of the reflux condenser and the possibility of its practical implementation to increase the efficiency of the phenol and acetone production unit.

During the implementation of the diploma project, two abstracts of reports were prepared and published in the collections of all-Ukrainian scientific and practical conferences of students, postgraduates, and young scientists.

Перелік посилань

1. Phenol production [Електронний ресурс] // KROHNE. – Режим доступу: <https://www.krohne.com/en-ua/industries/chemical-industry/organic-chemicals-in-the-chemical-industry/phenol-production> (дата звернення: 19.04.2026).
2. Turton R. Acetone process design [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://richardturton.faculty.wvu.edu/files/d/65a2eac5-3db6-4a6e-af77-76a764739762/acetone-b.pdf> (дата звернення: 19.04.2026).
3. Process analysis of chemical systems [Електронний ресурс] // ScienceDirect. – Режим доступу: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0926860X04007562> (дата звернення: 19.04.2026).
4. Юкельсон И. И. Технология основного органического синтеза. – Москва: Химия, 1968. – 848 с.
5. Heat Exchanger Design Handbook [Електронний ресурс] / за ред. E. U. Schlunder. – Режим доступу: <https://ru.scribd.com/document/571686859/Heat-Exchanger-Design-Handbook-PDFDrive> (дата звернення: 19.04.2026).
6. Fundamentals of Heat Exchanger Design [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://windyhm.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/11/fundamentals-of-heat-exchanger-design-0471321710.pdf> (дата звернення: 19.04.2026).
7. Heat Exchanger Design Handbook [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://profbook.com.ua/Heat-Exchang-Design-Handbook.html> (дата звернення: 19.04.2026).
8. Heat Exchanger Design [Електронний ресурс] // ResearchGate. – Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/378233364_Heat_Exchange_Design (дата звернення: 19.04.2026).

9. Heat Exchanger Design Handbook [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781003826866_A47315518/preview-9781003826866_A47315518.pdf (дата звернення: 19.04.2026).

10. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з курсу “Процеси та апарати хімічних виробництв” «Розрахунок кожухотрубного теплообмінника підігрівача» для студентів III-IV курсів усіх форм навчання та спеціальностей / Укл.: О.С. Смірнова, С.О. Опарін, А.А. Біла. – Дніпропетровськ: ДВНЗ УДХТУ, 2008. – 38 с.

11. Процеси і апарати харчових виробництв. Теплообмінні процеси: Підручник / В.С. Бойко, К.О. Самойчук, В.Г. Тарасенко, О.П. Ломейко. Мелітополь, 2020. 300 с.

12. Основи матеріалознавства [Електронний ресурс] : навчальний посібник для студентів напряму підготовки 6.051301 «Хімічна технологія», спеціальності «Хімічна технологія неорганічних речовин» / НТУУ «КПІ» ; уклад. І. М. Іваненко. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,08 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2011.

13. Сталь 16ГС // Metinvest Holding. URL: <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/16gs> (дата звернення: 06.06.2026)

14. Сталь 09Г2С // Metinvest Holding. URL: <https://metinvestholding.com/ua/products/steel-grades/09g2s> (дата звернення: 06.06.2026).

15. Василенко С. М. Теплообмінні апарати. Основи розрахунку та вибору: [навч. посіб. для студ. техн. спец.] / С. М. Василенко, В. В. Шутюк. – 2000. – 36 с.

16. Сталь 12Х18Н10Т: аналоги, властивості, характеристики // Метінвест-СМЦ. URL: <https://metinvest-smc.com/ua/steel/stal-12h18n10t/> (дата звернення: 06.06.2026).

17. Shah R. K., Sekulić D. P. *Fundamentals of Heat Exchanger Design*. Hoboken : John Wiley & Sons, 2003. 941 p. URL: <https://windyhm.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/11/fundamentals-of-heat-exchanger-design-0471321710.pdf> (дата звернення: 06.06.2026).

18. Левченко Б. О. Тепло- і масообмінні апарати і установки промислових підприємств : [навч. посіб. студ. техн. спец] / Б. О. Левченко [та ін.]. – Харків : ХГПУ, 1999. – Ч.1. – 420 с.

19. Технологія хімічних процесів і апаратів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://textbook.tou.edu.kz/books/083/1_1.html (дата звернення: 19.04.2026).

20. Теплообмінне обладнання в промисловості: застосування та переваги [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ankort.com/ua/teploobminne-obladnannya-v-promislovosti-zastosuvannya-ta-perhevagi/> (дата звернення: 19.04.2026).

21. U.S. Patent Application 20250137737 A1. Heat exchanger : пат. США, 01.05.2025. – URL: <https://patents.google.com/patent/US20250137737A1/en> (дата звернення: 19.04.2026).

22. WO/2025/056394. Heat exchanger plate and plate heat exchanger : пат. WIPO, 20.03.2025. – URL: <https://patents.google.com/patent/WO2025056394A1/en> (дата звернення: 19.04.2026).

23. U.S. Patent Application 20250277637 A1. Heat exchangers including partial height fins having at least partially free terminal edges : пат. США, 04.09.2025. – URL: <https://patents.justia.com/patent/20250277637> (дата звернення: 19.04.2026).

24. U.S. Patent Application 20260009578 A1. System and method for heating a heat exchanger : пат. США, 08.01.2026. – URL: <https://patents.justia.com/patent/20260009578> (дата звернення: 19.04.2026).

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 96
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

25. WO 2025031212 A1. Heat exchanger and HVAC system : пат. WIPO, 13.02.2025. – URL: <https://patents.google.com/patent/WO2025031212A1/zh> (дата звернення: 19.04.2026).

26. Збірник тез доповідей XXXVIII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених ”Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів”, 04-05 червня 2026 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2026. – 262 с.

27. ДСТУ EN 60300-3-11:2022. Керування надійністю. Частина 3-11. Посібник із застосування. Технічне обслуговування, орієнтоване на надійність (EN 60300-3-11:2009, IDT; IEC 60300-3-11:2009, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77162 (дата звернення: 06.06.2026).

28. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=14283 (дата звернення: 06.06.2026).

29. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=50154 (дата звернення: 06.06.2026).

30. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=67538 (дата звернення: 06.06.2026).

31. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68456 (дата звернення: 06.06.2026).

32. Процеси та обладнання хімічних технологій. Частина 1. Практикум [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спеціальності 133 Галузеве машинобудування / Корнієнко Я. М., Степанюк А. Р., Гулієнко С. В., Гайдай С. С., Семінський О.

О. ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 9,9 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 468 с.

33. Андреев, І. А. Конструювання і розрахунок опорних вузлів посудин і апаратів хімічних виробництв [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / І. А. Андреев ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 3,26 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 94 с. – Назва з екрана.

34. Конструювання і розрахунок основних елементів посудин та апаратів [Електронний ресурс]: підруч. для здобувачів ступеня бакалавра за спец. 133 Галузеве машинобудування; КПІ ім. Ігоря Сікорського – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. – 428 с.

35. Мікульонок, І. О. Проектування теплової ізоляції обладнання і трубопроводів [Електронний ресурс] : підручник [для студентів вищих навчальних закладів] / І. О. Мікульонок. – 2-ге вид., випр. і доп. – Електронні текстові дані (1 файл: 12,67 Мбайт). – Київ : НТУУ «КПІ», 2013. – 191 с.

36. НПАОП 0.00-1.81-18. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском : наказ Міністерства соціальної політики України від 05.03.2018 № 333. Київ, 2018. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=77162 (дата звернення: 06.06.2026).

37. ДСТУ EN 13445 «Нероз’ємні посудини, що працюють під тиском»

38. ДСТУ EN IEC 31010:2022. Керування ризиками. Методи оцінки ризиків (EN IEC 31010:2019, IDT; IEC 31010:2019, IDT). URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=111131 (дата звернення: 06.06.2026).

39. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=14283 (дата звернення: 06.06.2026).

40. ДБН В.1.1-7:2016. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=68456 (дата звернення: 06.06.2026).
41. РД 50-33-80 Методичні вказівки. Визначення рівня уніфікації та стандартизації виробів
42. ДСТУ 1.1:2001. Державна система стандартизації України. Стандартизація та суміжні види діяльності. Терміни та визначення основних понять. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65662 (дата звернення: 06.06.2026).
43. Рудь Ю. С. Основи конструювання : навчальний посібник. Київ, 2015. URL: https://lib.iitta.gov.ua/id/eprint/706451/1/Рудь_Ю.С._Основи%20конструювання_2015.pdf (дата звернення: 06.06.2026).
44. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ Л. Л. та ін. Процеси і апарати хімічних виробництв: підручник. Харків : НТУ «ХП», 2007.
45. Задольський А.М., Шаповаленко О.О. Методичні вказівки до виконання економічної частини дипломних проектів бакалаврів. Київ, 2010 – 15 с.

ЛБ-21.07.101.001 ПЗ	Інд. змін.	Дата видання	Мова UA	Аркуш 99
---------------------	------------	--------------	------------	-------------

Додаток А Документація до патентного дослідження

РЕГЛАМЕНТ ПОШУКУ № ЛБ21.07.101.000 РП

Найменування теми: Дефлегматор кожухотрубний.

Шифр теми: ЛБ21.07.101.000

Етап: Проектування кожухотрубного холодильника та його складових частин

Номер, дата завдання на проведення патентних досліджень

ЛБ21.07.101.000, 20.04.2026

Обґрунтування регламенту пошуку:

Предмет пошуку – 1) Дефлегматор кожухотрубний (об'єктом пошуку є винаходи й корисні моделі).

Мета пошуку інформації – визначення патентної ситуації щодо теплообмінних апаратів (визначення патентоздатності проєктованого апарата й визначення тенденцій розвитку даного напрямку в техніці).

Визначення держав пошуку. Встановлюємо такі держави пошуку: усі держави, окрім країн-агресорів.

Ретроспективність. Термін дії патенту на винахід в Україні 20 років, а регламент пошуку встановлюємо такий: 20.04.25-31.05.26 року.

Класифікаційні індекси. Міжнародна патентна класифікація: B01D 3/00, B01D 3/14, B01D 3/32, B01D 3/18, B01D 3/16, B01D 5/00, B01D 7/00.

Уніфікована десяткова класифікація УДК 66.081.

Джерела інформації. 1) патентна інформація: описи до винаходів, офіційні патентні бюлетені Китаю; 2) науково-технічна інформація: підручники й навчальні посібники з курсу процесів та апаратів хімічного та нафтопереробного виробництва; 3) інтернет ресурси: <https://worldwide.espacenet.com/>.

Початок пошуку 18.04.2026

Закінчення пошуку 07.06.2026

ДОВІДКА ПРО ПОШУК № ЛБ21.07.001.000 ДП

Завдання на проведення патентних досліджень ЛБ21.10.101.000
20.04.2026

Етап: Проектування апарата та його складових частин

Номер, дата регламентного пошуку: № ЛБ21.07.101.000 РП, 20.04.2026

Початок пошуку: 20.04.2026 Закінчення пошуку 07.06.2026

Таблиця А.1 - Регламент пошуку (форма Б.1 згідно ДСТУ 3575-97).

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Мета пошуку інформації	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Ретроспективність пошуку	Джерела інформації
Дефлегматор кожухотрубний	Визначення патентоздатності проєктованого апарата й тенденції розвитку цього напрямку в техніці	Україна, США, Велика Британія, Німеччина, Франція, Японія, Канада, Китай, Фінляндія, Італія	B01D 3/00, B01D 3/14, B01D 3/32, B01D 3/18, B01D 3/16, B01D 5/00, B01D 7/00, B01D 47/00, B01D 47/05, B01D 47/10, B01D 50/00, B01D 1/10, B01D 3/06	20.04.2026-07.06.2026	Національні і зарубіжні офіційні бюлетні. Описи винаходів і корисних моделей, Всесвітня організація інтелектуальної власності

Таблиця А.2 – Джерела інформації, які використанні під час патентного пошуку

Предмет пошуку (ОГД, його складові частини)	Мета пошуку інформації	Класифікаційні індекси	Інформаційна база,	Джерела інформації	
				Патентна інформація	Інша науково-технічна інформація
Дефлегматор	Україна, США, Велика Британія,	B01D 3/00, B01D 3/14, B01D 3/32,	https://worldwide.es	Описи винаходів та	Я.М Корнієнко Процеси

кожухотр убний	Німеччина, Франція, Японія, Канада, Китай, Фінляндія, Італія	B01D 3/18, B01D 3/16, B01D 5/00, B01D 7/00, B01D 47/00, B01D 47/05, B01D 47/10, B01D 50/00, B01D 1/10, B01D 3/06	pacenet.com/ Фонд КПІ ім. Ігоря Сікорськ ого	корисн их modele й патенті в Україн и, США, Китаю	та обладнан ня хімічної технології . / К.: НТУУ «КПІ», 2011.- 300с. Міку цонюк І. О. Інтелекту альна власність та патентоз- навство [Елект ронний ресурс]: підручник для студентів, які навчають ся за програма ми підготовк и магі- стрів / І. О. Мікульон ок; КПІ ім. Ігоря Сікорсько го. - 3-те вид., переробл. та доп. - Елек- тронні текстові дані (1
-------------------	---	---	---	--	---

					файл: 6,71 Мбайт). Київ: Політехні ка, 2019, 246 с.
--	--	--	--	--	---

Таблиця А.3 – Патента документація, відібрана для подальшого аналізу

ОГД, його складові частини	Документи на об'єкти промислової власності	
	Бібліографічні дані	Відомість щодо їхньої дії
Heat exchanger	U.S. Patent Application 20250137737 A1. Heat exchanger : пат. США, 01.05.2025. – URL: https://patents.google.com/patent/US20250137737A1/en	Діє
Heat exchanger plate and plate heat exchanger	WO/2025/056394. Heat exchanger plate and plate heat exchanger : пат. WIPO, 20.03.2025. – URL: https://patents.google.com/patent/WO2025056394A1/en	Діє
Heat exchangers including partial height fins having at least partially free terminal edges	U.S. Patent Application 20250277637 A1. Heat exchangers including partial height fins having at least partially free terminal edges : пат. США, 04.09.2025. – URL: https://patents.justia.com/patent/20250277637	Діє
System and method for heating a heat exchanger	U.S. Patent Application 20260009578 A1. System and method for heating a heat exchanger : пат. США, 08.01.2026.	Діє
Heat exchanger and HVAC system	WO 2025031212 A1. Heat exchanger and HVAC system : пат. WIPO, 13.02.2025. – URL: https://patents.google.com/patent/WO2025031212A1/zh	Діє

Висновок: У результаті патентного пошуку встановлено, що запропонований апарат та його компоненти відповідають критеріям патентної чистоти для винаходу корисної моделі. Це підтверджується тим, що жодна з ключових ознак наближчої існуючих аналогів не була застосована в розроблених проектних рішеннях.

Додаток Б Програмний розрахунок елементу апарата

На рисунку Б.1 зображено блок-схему для розрахунку

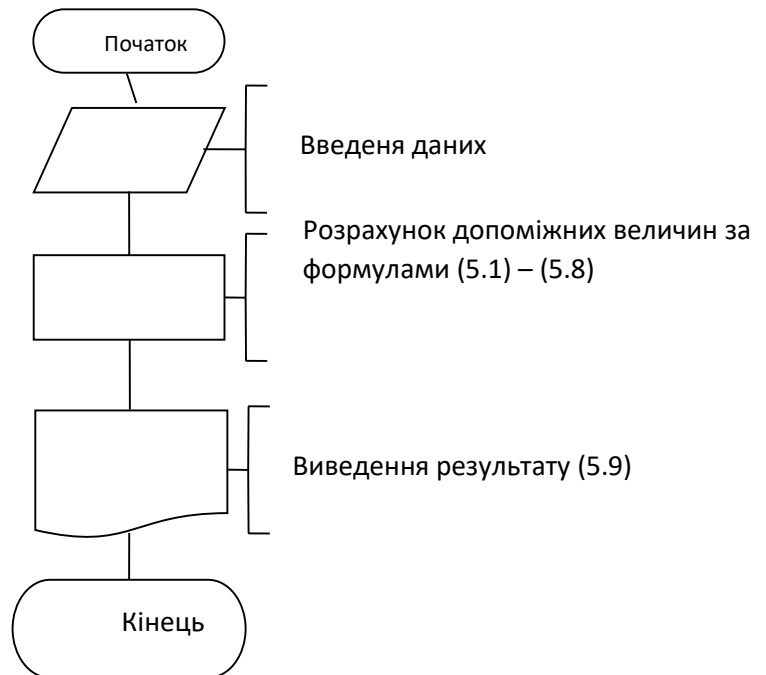


Рисунок Б.1 – Алгоритмічна схема комп’ютерного розрахунку товщини стінки кришки

Програма розрахунку:

```

Сталь 09Г2С
tr := 340
D := 0.6
tt := (293 373 423)T
σdt := (196 177 171)T
σdt(t) := linterp(tt, σdt, t)
σd := σdt(tr) = 184.838
φ := 0.8
Pm := 0.5

R :=  $\frac{D^2}{4 \cdot 0.25 \cdot D}$  explicit, ALL →  $\frac{0.6^2}{4 \cdot 0.25 \cdot 0.6} = 0.6$ 
C1 := 2 · 10-3
C2 := 0.6 · 10-3
Sr :=  $\frac{P_m \cdot R}{2 \cdot \sigma_d \cdot \varphi - 0.5 \cdot P_m}$  explicit, ALL →  $\frac{0.5 \cdot 0.6}{2 \cdot 184.8375 \cdot 0.8 - 0.5 \cdot 0.5} = 1.015 \times 10^{-3}$ 
C := C1 + C2 explicit, ALL → 2 · 10-3 + 0.6 · 10-3 = 2.6 × 10-3
S := Sr + C explicit, ALL → 0.0010152627838505533 + 2 · 10-3 = 3.015 × 10-3
S := 4 · 10-3
Pd :=  $\frac{2 \cdot \sigma_d \cdot \varphi \cdot (S - C)}{R + 0.5 \cdot (S - C)}$  explicit, ALL →  $\frac{2 \cdot 184.8375 \cdot 0.8 \cdot (4 \cdot 10^{-3} - 0.0026)}{0.6 + 0.5 \cdot (4 \cdot 10^{-3} - 0.0026)} = 0.689$ 
Pm ≤ Pd = 1
  
```

Таблиця Б.1 – Перелік ідентифікаторів

Найменування величини	Позначення	Ідентифікатор	Розмірність
Допустиме напруження матеріалу	$[\sigma]$	$[\sigma]$	МПа
Внутрішній діаметр кришки	D	D	м
Внутрішній діаметр кришки	R	R	м
Розрахунковий тиск	P_m	P_m	МПа
Коефіцієнт міцності зварного шва	φ	φ	
Розрахункова товщина стінки	S_r	S_r	м
Додаток до розрахункової товщини для компенсації корозії	C_1	C_1	м
Додаток до розрахункової товщини на компенсацію мінусового допуску	C_2	C_2	м
Сума додатків до розрахункової товщини	C	C	м
Виконавча товщина стінки	S	S	м
Допустимий внутрішній надлишковий тиск	P_d	$[P]$	МПа

Результати розрахунку за програмою розрахунку товщини стінки кришки наведено в таблиці Б.2.

Таблиця Б.2 Результати розрахунку

Найменування величини	Позначення	Числове значення	Розмірність
Товщина стінки	S	$4 \cdot 10^{-3}$	м
Додаток до товщини	C	$2,6 \cdot 10^{-3}$	м
Допустимий тиск	P_m	0,689	МПа

Додаток В Патенти, які використані в патентному дослідженні



US 20250137737A1

(19) **United States**

(12) **Patent Application Publication**

SHIN

(10) **Pub. No.: US 2025/0137737 A1**

(43) **Pub. Date: May 1, 2025**

(54) **HEAT EXCHANGER**

(71) Applicant: **Hanon Systems, Daejeon (KR)**

(72) Inventor: **Sung Hong SHIN, Daejeon (KR)**

(21) Appl. No.: **18/930,320**

(22) Filed: **Oct. 29, 2024**

(30) **Foreign Application Priority Data**
Oct. 30, 2023 (KR) 1020230146392
Oct. 29, 2024 (KR) 1020240149581

Publication Classification

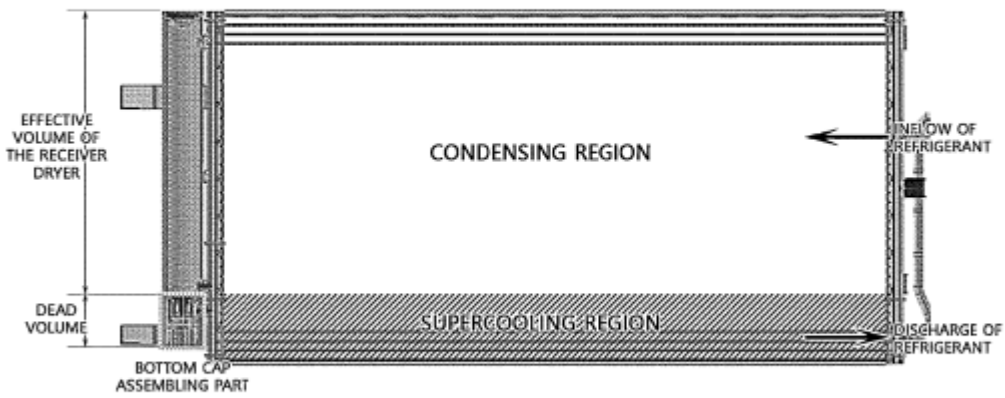
(51) **Int. Cl.**
F28F 9/02 (2006.01)
F25B 30/00 (2006.01)

F25B 39/04 (2006.01)
F28D 21/00 (2006.01)

(52) **U.S. CL.**
CPC **F28F 9/0246** (2013.01); **F25B 30/00**
(2013.01); **F25B 39/04** (2013.01); **F25B**
2339/0441 (2013.01); **F28D 201/0084**
(2013.01)

(57) **ABSTRACT**

The present invention relates to a heat exchanger, and more particularly, to a condenser integrated with a receiver dryer and used for an air conditioning system of an electric vehicle. An object of the present invention is to provide a heat exchanger in which the condenser and the receiver dryer are assembled, and an effective volume of the receiver dryer is configured at an upper end of a supercooling region, such that a dead volume of the receiver dryer is minimized.



(51) International Patent Classification:
F28D 5/00 (2006.01)(21) International Application Number:
PCT/EP2024/074706(22) International Filing Date:
04 September 2024 (04.09.2024)

(25) Filing Language: English

(26) Publication Language: English

(30) Priority Data:
23196708.4 12 September 2023 (12.09.2023) EP(71) Applicant: **ALFA LAVAL CORPORATE AB** [SE/SE];
P.O. Box 73, SE-221 00 LUND (SE).(72) Inventors: **GYLLENBERG, Johan**, Sjövägen 40, SE-218
31 BUNKEFLOSTRAND (SE); **MILLRUD, Christer**;
Idrottsgatan 27, SE-216 14 LIMHAMN (SE); **NAVASA**
GUASCH, Maria, Skrivarevägen 34, SE-226 57 LUND
(SE).(74) Agent: **ALFA LAVAL ATTORNEYS, ALFA LAVAL**
CORPORATE AB, P.O. Box 73, SE-221 00 LUND (SE).(81) Designated States (unless otherwise indicated, for every
kind of national protection available): AE, AG, AL, AM,AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ,
CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM,
DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT,
HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,
KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, MG, MK, MN, MU, MW, MX, MY, MZ, NA,
NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO,
RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH,
TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS,
ZA, ZM, ZW.(84) Designated States (unless otherwise indicated, for every
kind of regional protection available): ARIPO (BW, CV,
GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, SD, SL, ST,
SZ, TZ, UG, ZM, ZW), Eurasian (AM, AZ, BY, KG, KZ,
RU, TJ, TM), European (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,
DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT,
LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE,
SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN,
GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

Declarations under Rule 4.17:

— of inventorship (Rule 4.17(iv))

(54) Title: A HEAT EXCHANGER PLATE AND A PLATE HEAT EXCHANGER

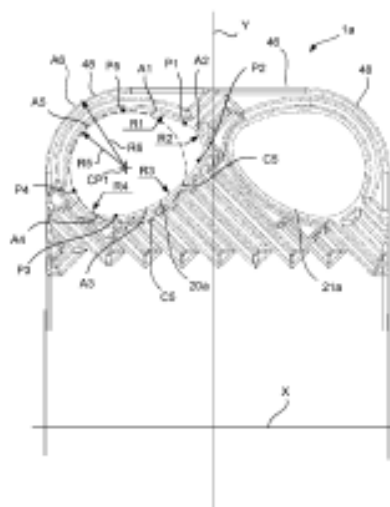


Fig. 7

(57) Abstract: The disclosure relates to a heat exchanger plate (1a, 1b) for a plate heat exchanger (2), the heat exchanger plate (1a, 1b) is divided into a left half (4) and a right half (6) by a longitudinal center axis (Y), which left half (4) and right half (6) are delimited by a first long side (8) and second long side (10), respectively, and wherein the heat exchanger plate (1a, 1b) further is divided into an upper half (12) and a lower half (14) by a transverse center axis (X), which upper half (12) and a lower half (14) are delimited by a first short side (16) and second short side (18), respectively, and wherein the heat exchanger plate (1a, 1b) comprises a porthole (20a) arranged within the left half (4) and the upper half (12). The shape of the porthole (20a) is defined by a number of circular arcs (A1, A2, A3, A4, A5), wherein individual radiuses (R1, R2, R3, R4, R5) of the circular arcs (A1, A2, A3, A4, A5) have a sequence of decreasing and increasing relationships in a clockwise direction of the porthole (20a) starting from the largest radius (R1, R2, R3, R4, R5). The disclosure further relates to a plate heat exchanger (2).

[Continued on next page]



US 20250277637A1

(19) **United States**
(12) **Patent Application Publication** (10) **Pub. No.: US 2025/0277637 A1**
Rambo (43) **Pub. Date: Sep. 4, 2025**

(54) **HEAT EXCHANGERS INCLUDING PARTIAL HEIGHT FINS HAVING AT LEAST PARTIALLY FREE TERMINAL EDGES**

(71) Applicant: **General Electric Company**, Evendale, OH (US)

(72) Inventor: **Jeffrey Douglas Rambo**, Evendale, OH (US)

(73) Assignee: **General Electric Company**, Evendale, OH (US)

(21) Appl. No.: **19/213,007**

(22) Filed: **May 20, 2025**

Related U.S. Application Data

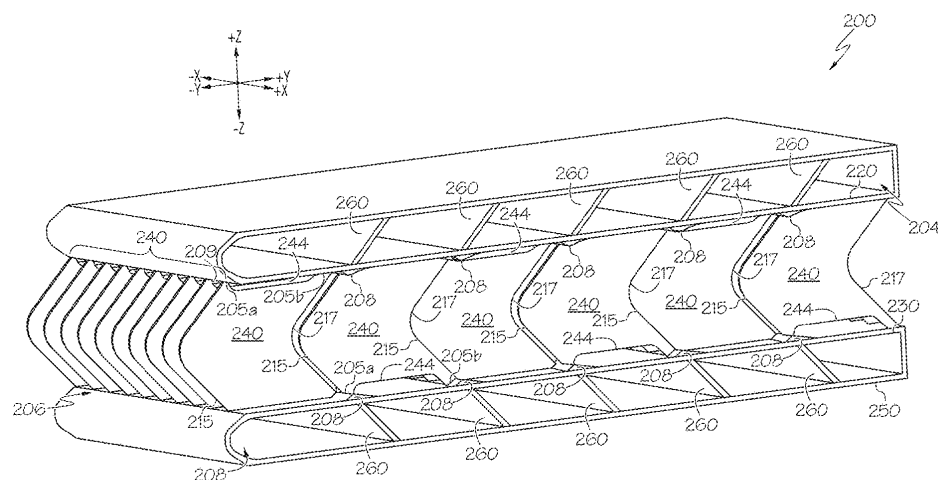
(60) Continuation of application No. 18/582,960, filed on Feb. 21, 2024, which is a division of application No. 17/223,290, filed on Apr. 6, 2021, now Pat. No. 11,940,232.

Publication Classification

(51) **Int. Cl.**
F28F 1/26 (2006.01)
F28D 1/053 (2006.01)
F28F 1/32 (2006.01)
(52) **U.S. Cl.**
CPC **F28F 1/26** (2013.01); **F28F 1/32** (2013.01); **F28D 1/05383** (2013.01); **F28F 2225/06** (2013.01)

ABSTRACT

In an embodiment, a heat exchanger includes a monolithic body that includes a first substrate, a second substrate, a third substrate, and a plurality of partial height fins. The second substrate is arranged parallel to and spaced from the first substrate, thereby defining a first fluid flow path. The third substrate is arranged parallel to and spaced from the second substrate opposite the first substrate, thereby defining a second fluid flow path. The plurality of partial height fins extend from one of the second substrate and the third substrate toward the other of the second substrate or the third substrate, wherein a terminal edge of each partial height fin is at least partially spaced from the other of the second substrate or the third substrate.



SYSTEM AND METHOD FOR HEATING A HEAT EXCHANGER FOR FROST REMOVAL AND FROST PREVENTION

Jul 3, 2025

There are provided systems and methods for heating a heat exchanger. A system includes a heat exchanger configured to be placed inside a magnetic field created by a pair of electromagnetic coils. The system further includes the electromagnetic coils configured to control a surface temperature of the heat exchanger by varying an aspect of a magnetic coupling between the heat exchanger and the electromagnetic coils. A method includes placing the heat exchanger inside a magnetic field created by a pair of electromagnetic coils. The method further includes controlling a surface temperature of the heat exchanger by varying an aspect of a magnetic coupling between the heat exchanger and the electromagnetic coils.

[Skip to: Description](#) · [Claims](#) · [Patent History](#) · [Patent History](#)

Description

TECHNICAL FIELD

The embodiments disclosed herein relate to heat exchangers, and, in particular to heating a heat exchanger for frost removal and prevention.

Patent History

Publication number: 20260009578

Type: Application

Filed: Jul 3, 2025

Publication Date: Jan 8, 2026

Inventors: [Sameh M. I. Saad](#) (Stoney Creek), [Ahmed Sheir](#) (Brampton)

Application Number: 19/259,692

Classifications

International Classification: F25D 21/08 (20060101);

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2025 年 2 月 13 日 (13.02.2025)



(10) 国际公布号
WO 2025/031212 A1

(51) 国际专利分类号:
F25B 39/00 (2006.01) **F25B 41/37** (2021.01)
F25B 41/40 (2021.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2024/108486

(22) 国际申请日: 2024 年 7 月 30 日 (30.07.2024)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202310985399.2 2023 年 8 月 4 日 (04.08.2023) CN

(71) 申请人: 广东美的暖通设备有限公司 (GD MIDEA HEATING & VENTILATING EQUIPMENT CO., LTD.) [CN/CN]; 中国广东省佛山市顺德区北滘镇北滘居委会蓬菜路工业大道, Guangdong 528311 (CN)。合肥美的暖通设备有限公司 (HEFEI MIDEA HEATING & VENTILATING

EQUIPMENT CO., LTD) [CN/CN]; 中国安徽省合肥市高新区柏堰科技园创新大道 88 号, Anhui 230088 (CN)。

(72) 发明人: 黄俊潮 (HUANG, Junchao); 中国广东省佛山市顺德区北滘镇北滘居委会蓬菜路工业大道, Guangdong 528311 (CN)。陈柯壁 (CHEN, Kebi); 中国广东省佛山市顺德区北滘镇北滘居委会蓬菜路工业大道, Guangdong 528311 (CN)。赵浩伟 (ZHAO, Haowei); 中国广东省佛山市顺德区北滘镇北滘居委会蓬菜路工业大道, Guangdong 528311 (CN)。

(74) 代理人: 北京恒博知识产权代理有限公司 (BEIJING HENGBO INTELLECTUAL PROPERTY AGENT LTD.); 中国北京市海淀区中关村东路 66 号世纪科贸大厦 B 座 1208 室, Beijing 100190 (CN)。

(54) Title: HEAT EXCHANGER AND HVAC SYSTEM

(54) 发明名称: 换热器及暖通系统

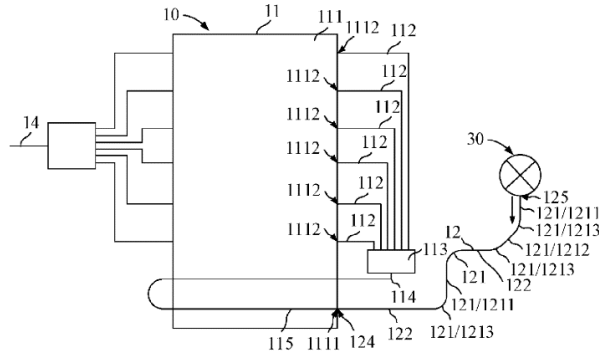


图 3

(57) Abstract: Provided are a heat exchanger (10) and an HVAC system (1), the heat exchanger (10) comprising a heat exchanger main body (11) and a first refrigerant pipe (12). A first refrigerant interface (1111) is formed on the heat exchanger main body (11), and the first refrigerant pipe (12) has a first end (124) and a second end (125). The first end (124) is communicated with the first refrigerant interface (1111); and the second end (125) is used for communicating with a throttling assembly (30) for refrigerant transfer between the heat exchanger body (11) and the throttling assembly (30), the first end (124) of the first refrigerant pipe (12) being lower than the second end (125) thereof. The first end (124) of the first refrigerant pipe (12) connected to the heat exchanger body (10) is designed to be lower than the second end (125) thereof connected to the throttling assembly (30), such that when a refrigerant and lubricating oil in the first refrigerant pipe (12) is transferred from the second end (125) to the first end (124), the refrigerant and the lubricating oil will be generally transferred from top to bottom, and the refrigerant and the lubricating oil will be transferred under the dual acting force of the pressure difference provided by a compressor (20) and the self gravities of the refrigerant and the lubricating oil, thereby avoiding oil blockage.

[见续页]

Додаток Г Публікації автора

СПИСОК НАУКОВИХ ПРАЦЬ

студента ЛБ-21

кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв

Швединського Дмитрія Олександровича

1. Збірник тез доповідей XXXVII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів", 01-10 грудня 2025 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2025. – 374 с.
2. Збірник тез доповідей XXXVIII всеукраїнської науково-практичної конференції студентів, аспірантів і молодих вчених "Обладнання хімічних виробництві підприємств будівельних матеріалів", 04-05 червня 2026 р. м. Київ) / Укладач Я.М. Корнієнко. – К.: «КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2026. – 262 с.

УДК 663.5

МОДЕРНІЗАЦІЯ ДЕФЛЕГМАТОРА ВИРОБНИЦТВА ФЕНОЛУ ТА АЦЕТОНУ

Студент Швединський Д. О., асистент Подиман Г. С.

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

АНОТАЦІЯ: В даній роботі наведено інформацію про фенол та ацетон є ключовими продуктами органічної хімії, що широко використовуються у виробництві полімерів, фармацевтичних препаратів та розчинників. Їхнє отримання передбачає комплекс багатостадійних процесів, серед яких критично важливу роль відіграє ректифікація з використанням дефлегматора. Вертикальний кожухотрубний дефлегматор забезпечує ефективне розділення парів суміші шляхом часткової конденсації, що дозволяє отримувати продукти високої чистоти та підвищити загальну ефективність технологічного процесу.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ФЕНОЛ, АЦЕТОН, ВИРОБНИЦТВО, ДЕФЛЕГМАТОР, КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК.

MODERNIZATION OF THE REFLUX CONDENSER FOR THE PRODUCTION OF PHENOL AND ACETONE

Student Shvedynsky D. O., Assistant Podyman H. S.

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ABSTRACT: This paper provides information about phenol and acetone, which are key products of organic chemistry, widely used in the production of polymers, pharmaceuticals, and solvents. Their production involves a complex of multi-stage processes, among which rectification using a reflux condenser plays a critically important role. A vertical shell-and-tube reflux condenser provides effective

separation of mixture vapors by partial condensation, which allows obtaining high-purity products and increasing the overall efficiency of the technological process.

KEYWORDS: PHENOL, ACETONE, PRODUCTION, REFRACTION CONVERTER, SHELL-TUBE HEAT EXCHANGER.

Фенол є одним з ключових продуктів органічного синтезу. За звичайних умов це безбарвні кристали з характерним запахом. Його молекула поєднує ароматичне ядро та гідроксильну групу, що зумовлює специфічні хімічні властивості. Фенол проявляє слабкі кислотні властивості, утворює феноляти з лугами, вступає в реакції електрофільного заміщення. Фенол знаходить застосування в різних галузях промисловості. Він є ключовою сировиною для виробництва фенолформальдегідних смол, які використовуються при виготовленні пластмас, фанери та будівельних матеріалів. Значні обсяги фенолу спрямовуються на синтез бісфенолу А - основного компоненту для виробництва полікарбонатів та епоксидних смол. У фармацевтиці фенол служить сировиною для отримання лікарських засобів, зокрема аспірину. Також він використовується при виробництві антиоксидантів, поверхнево-активних речовин і як консервант для деревини [1,2].

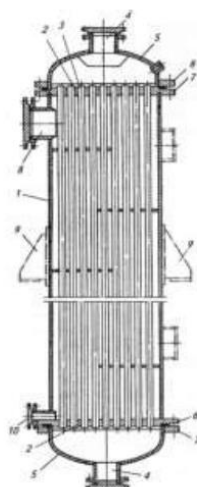
Ацетон - представник кетонів, безбарвна летка рідина з характерним запахом. Володіє високою здатністю до розчинення органічних сполук. Хімічно активний, вступає в реакції приєднання, конденсації, відновлення.

Ацетон має широке промислове застосування як універсальний розчинник. Він активно використовується у лакофарбовій промисловості для розчинення смол, мастик та лакових покриттів. Значну частину ацетону споживає хімічна промисловість для синтезу метилметакрилату - мономеру для виробництва органічного скла. Також ацетон застосовується у фармацевтичній та косметичній промисловості, при виробництві міцних клеїв, а в лабораторній практиці - як ефективний розчинник для миття хімічного посуду [3, 4].

Обидва продукти є стратегічно важливими для хімічної промисловості, а їх спільне отримання кумольним методом забезпечує економічну ефективність виробництва.

Вертикальний кожухотрубний дефлегматор є ключовим апаратом у системі ректифікації при виробництві фенолу та ацетону кумольним методом. Його основне завдання полягає у забезпеченні ефективного поділу вихідної суміші шляхом часткової конденсації парів та повернення флегми в колону [5].

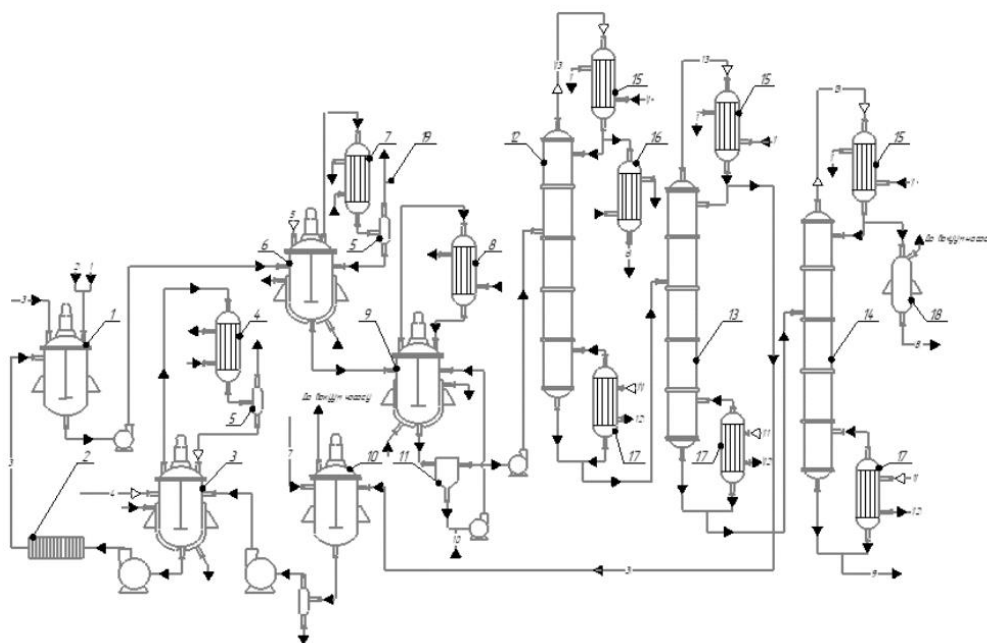
Апарат представляє собі вертикальний теплообмінник, у якому парова суміш надходить у міжтрубний простір, а охолоджуюча вода циркулює по трубах. Конструкція предсталає металевий циліндричний корпус в якому розташовані дві трубні решітки (дошки) 2 з паралельними нагрівальними трубками 3, кінці яких завальцьовані в решітках. Рідина, яка нагрівається підводиться і відводиться через штуцери 4, а гріюча пара подається через штуцер 8. З обох торців корпус закритий кришками 5 з фланцями 7. Ущільнення між трубними решітками і фланцями кришок досягається прокладками 6. Корпус для кріплення має опорні лапи 9. Конденсат зливають зі штуцера 10. Для покращення процесу теплообміну в міжтрубному просторі встановлені перегородки, які сповільнюють рух теплоносія [6].



1 – корпус, 2 – трубні решітки, 3 – нагрівальні трубки, 4, 8, 10 – штуцери,
5 – кришки, 6 – прокладки, 7 – фланці, 9 – опорні лапи

Рисунок 1 – Вертикальний кожухотрубний дефлегматор

На рисунку 2 показана технологічна схема виробництва фенолу та ацетону через гідроперекис ізопропілбензолу. В апараті 1 при інтенсивному перемішуванні готують емульсію ізопропілбензолу у воді. Для цього в апарат подають свіжий ізопропілбензол з цеху алкілування бензолу, зворотний ізопропілбензол, очищений гідруванням від α -метилстиролу, емульгатор (лаурилсульфат або натрію стеарат) і воду, в якій попередньо розчиняють карбонат натрію. Співвідношення свіжого та зворотного ізопропілбензолу приблизно 1:4. Емульсію ізопропілбензолу перекачують в апарат 6 для окиснення. Тут при 130°C через рідину під тиском пропускають повітря. Після того як у гідроперекис перетвориться близько 25% ізопропілбензолу, реакційну рідину направляють на розкладання сірчаною кислотою в апарат 9.



1 – емульсор; 2 – фільтр; 3 – апарат для гідрування; 4,7,8,16 – теплообмінник; 5 – сепаратор; 6 – апарат для окиснення ізопропілбензолу; 9 – апарат для розкладу гідроперекису; 10 – апарат для омилення фенолу; 11 – розділювач; 11 – розділювач; 12,13,14 – ректифікаційна колона; 15 – дифлегматор; 17 – кип'ятильник; 18 – бак для фенолу; 19 - дросель

Рисунок 1 – Схема виробництва фенолу та ацетону через гідроперекис ізопропілбензолу

Розкладання гідроперекису ізопропілбензолу на фенол та ацетон протікає з виділенням великої кількості тепла (400 ккал на 1 кг гідроперекису). Швидкість реакції залежить від концентрації застосовуваної кислоти і гідроперекису. При пропущенні газоподібного сірчистого ангідриду через концентрований гідроперекис розкладання супроводжується вибухом. У присутності 1%-ної сірчаної кислоти розкладання триває 5 год, при використанні 10%-ної кислоти воно триває 1 год. Тому процес розкладання гідроперекису на фенол і ацетон у виробничих умовах проводять при

дотриманні відповідних запобіжних заходів (інтенсивне відведення реакційного тепла, застосування досить розведеної сірчаної кислоти і т. д.). Надлишкове тепло відводять у зворотному холодильнику 8.

З апарату 9 рідина перетікає розділювач 11; сірчана кислота, що відокремлюється, знову може бути використана для розкладання гідроперекису. Продукти реакції, що містять після виділення сірчаної кислоти: 8% ацетону, 14% фенолу, 76% непрореагованого ізопропілбензолу і до 2% домішок (а-метилстирол, ацетофенон та ін), направляють на ректифікацію. У ректифікаційній колоні 12 відганяють ацетон; в колоні 13 при розрідженні відганяють ізопропілбензол з домішками а-метилстиролу та фенолу. Ці домішки заважають нормальному перебігу реакції окиснення, тому ізопропілбензол піддають очищенню.

В апараті 10 його обробляють водним розчином лугу, в результаті чого фенол перетворюється на фенолят і перетворюється на розчин, який у розділювальному посудині відокремлюється від вуглеводневого шару. В апараті 3 через ізопропілбензол у присутності суспендованого металевго нікелю (каталізатор) пропускають водень. При цьому а-метилстирол гідрується в ізопропілбензол. Далі ізопропілбензол через фільтр 2 направляють на змішування зі свіжим ізопропілбензолом апарат 1.

Кубова рідина з колоні 13 перетікає в колону ректифікації 14, де при розрідженні фенол відокремлюється від ацетофенону. Пари фенолу відводять з верхньої частини колоні і кристалізують у приймачі 18. Кубова рідина з колоні містить 14 головним чином ацетофенон.

На 1 т фенолу, що отримується за кумольним методом, витрачається 1,288 т ізопропілбензолу; при цьому додатково виходить близько 600 кг ацетону [7].

Ефективна робота дефлегматора безпосередньо впливає на якість продукції та економічні показники виробництва, що робить його модернізацію важливим напрямом удосконалення технологічного процесу.

Використані джерела:

1. Фенол [Електронний ресурс] // Covalent : веб-сайт. – 2023. – Режим доступу: <https://www.covalent.com.ua/ru/shop/phenol/> (дата звернення 12.10.2025).
2. Що таке фенол: властивості та застосування [Електронний ресурс] // Systopt : веб-сайт. – 2023. – Режим доступу: <https://www.systopt.com.ua/article-chto-takoe-fenol-svoystva-y-prymenenye> (дата звернення 12.10.2025).
3. Ацетон: властивості та характеристики [Електронний ресурс] // Systopt : веб-сайт. – 2023. – Режим доступу: <https://www.systopt.com.ua/item-atseton> (дата звернення 12.10.2025).
4. Для чого потрібен ацетон: застосування та особливості [Електронний ресурс] // Systopt : веб-сайт. – 2023. – Режим доступу: <https://www.systopt.com.ua/article-dlya-chego-nuzhen-aceton> (дата звернення 12.10.2025).
5. Кожухотрубні теплообмінники: конструкція та застосування [Електронний ресурс] // Opeks.ua : веб-сайт. – 2023. – Режим доступу: <https://opeks.ua/ua/kozhuxotrubni-teploobminniki/> (дата звернення 12.10.2025).
6. Розрахунок параметрів кожухотрубного теплообмінного апарата. Методичні вказівки для студентів спеціальності 8.05050313 Обладнання переробних і харчових виробництв ОКР Бакалавр - Таврійський державний агротехнологічний університет, 2016 - 18 с.
7. Юкельсон І. І. Технология основного органического синтеза / И. И. Юкельсон. — М. : Химия, 1968. — 848 с.

МОДЕРНІЗАЦІЯ ДЕФЛЕГМАТОРА ВИРОБНИЦТВА ФЕНОЛУ ТА АЦЕТОНУ

Студент Швединський Д. О., ст.викл., PhD Подиман Г. С.

Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

АНОТАЦІЯ: У роботі розглянуто напрями модернізації дефлегматора виробництва фенолу та ацетону як ключового апарата ректифікаційного вузла. Проаналізовано конструктивні особливості кожухотрубного теплообмінника, його переваги та недоліки, а також запропоновано удосконалення за рахунок сегментованих перегородок із формуванням квазіспірального руху потоку, що інтенсифікує тепло- та масообмінні процеси.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: ДЕФЛЕГМАТОР, КОЖУХОТРУБНИЙ ТЕПЛООБМІННИК, ФЕНОЛ, АЦЕТОН, КОНДЕНСАЦІЯ, СЕГМЕНТОВАНІ ПЕРЕГОРОДКИ, КВАЗІСПІРАЛЬНИЙ РУХ, ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ТЕПЛООБМІНУ.

MODERNIZATION OF THE DEPHLEGMATOR FOR PHENOL AND ACETONE PRODUCTION

Student Shvedynskiy D. O., Senior Lecturer, PhD, Podyman H. S.

National Technical University of Ukraine

“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

ABSTRACT: The paper examines directions for modernization of the dephlegmator used in phenol and acetone production as a key apparatus of the rectification unit. The constructive features of the shell-and-tube heat exchanger are analyzed, along with its advantages and disadvantages. Improvements are proposed through the use of segmented baffles that create a quasi-spiral flow, thereby intensifying heat and mass transfer processes.

KEYWORDS: DEPHLEGMATOR, SHELL-AND-TUBE HEAT EXCHANGER, PHENOL, ACETONE, CONDENSATION, SEGMENTED BAFFLES, QUASI-SPIRAL FLOW, HEAT TRANSFER INTENSIFICATION.

Виробництво фенолу та ацетону кумольним методом є одним із стратегічно важливих напрямів органічного синтезу. На стадії ректифікації продуктів окиснення ізопропілбензену (кумолу) ключову роль відіграє дефлегматор — апарат часткової конденсації парової фази з поверненням флегми у верхню частину колони. Ефективність його роботи безпосередньо впливає на чистоту товарних фракцій, енергоспоживання установки та стабільність технологічного режиму.

Дефлегматор у виробництві фенолу та ацетону, як правило, виконують у вигляді вертикального або горизонтального кожухотрубного теплообмінника. Парова суміш надходить у міжтрубний простір, де частково конденсується на зовнішній поверхні труб, охолоджуваних водою або іншим теплоносієм. Утворена флегма повертається до ректифікаційної колони, тоді як неконденсовані пари відводяться на подальшу переробку або конденсацію [1].

Перевагами кожухотрубних дефлегматорів є:

- конструктивна надійність і механічна міцність;
- можливість роботи при підвищених тисках і температурах;
- ремонтпридатність та стандартизованість елементів;
- гнучкість у виборі матеріалів (сталі, корозійностійкі сплави).

Разом з тим, їм притаманні суттєві недоліки:

- нерівномірність розподілу потоків у міжтрубному просторі;
- утворення застійних зон;
- зниження коефіцієнта тепловіддачі при ламінаризації потоку;
- підвищений гідравлічний опір при інтенсифікації турбулентності

традиційними методами.

Сучасні підходи до модернізації кожухотрубних дефлегматорів базуються на:

- оптимізації геометрії трубного пучка (зміна кроку розташування труб);
- використанні оребрених або профільованих труб;
- впровадженні турбулізаторів у трубному просторі;
- модифікації конфігурації перегородок у міжтрубному просторі [2].

Найбільш перспективним напрямом є зміна гідродинаміки міжтрубного простору без істотного збільшення гідравлічного опору (рисунок 1).

Пропонується застосування системи сегментованих перегородок спеціальної конфігурації, розташованих під кутом $15-25^\circ$ до осі апарата з чергуванням напрямку сегментації. Така компоновка формує квазіспіральний (наближений до гвинтового) рух парового потоку в міжтрубному просторі.

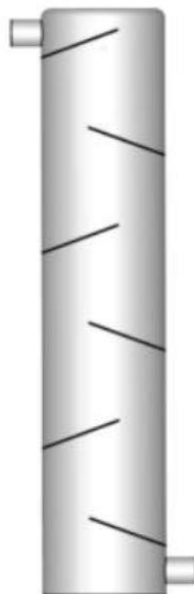


Рисунок 1 – Схематичне зображення перегородок під кутом $15-25^\circ$ [3]

Суть удосконалення полягає у наступному:

1. Інтенсифікація турбулентності. Квazіспіральний рух запобігає утворенню застійних зон і забезпечує рівномірне омивання трубного пучка.
2. Підвищення коефіцієнта тепловіддачі. Завдяки зростанню локальної швидкості потоку зменшується товщина прикордонного шару, що підвищує інтенсивність конденсації.
3. Рівномірність температурного поля. Поліпшується розподіл температур у міжтрубному просторі, зменшується ризик локального перегріву чи переохолодження.
4. Оптимізація гідравлічного опору. Порівняно з традиційними поперечними перегородками, сегментована система дозволяє досягти більшого коефіцієнта теплопередачі при помірному прирості втрат тиску.

Для процесу часткової конденсації фенолу та ацетону це означає підвищення ступеня селективної конденсації важкої фракції, стабілізацію флегмового числа та зменшення енергетичних витрат на охолодження.

Впровадження сегментованих перегородок із формуванням квazіспірального потоку забезпечує:

- підвищення коефіцієнта теплопередачі на 10–20 %;
- зменшення металомісткості апарата за рахунок скорочення довжини теплообмінної поверхні при тій самій продуктивності;
- зниження експлуатаційних витрат;
- підвищення стабільності роботи ректифікаційної колони.

Таким чином, модернізація дефлегматора є не лише конструктивним удосконаленням, а й інструментом підвищення енергоефективності всього виробництва фенолу та ацетону [4].

Отже, дефлегматор є ключовим елементом системи ректифікації у виробництві фенолу та ацетону, що визначає якість розділення та енергетичну ефективність процесу.

Традиційні кожухотрубні конструкції характеризуються високою надійністю, проте мають обмеження, пов'язані з нерівномірністю гідродинамічного режиму.

Запропонована модернізація шляхом застосування сегментованих перегородок із формуванням квазіспірального руху потоку дозволяє інтенсифікувати конденсацію та підвищити коефіцієнт теплопередачі без суттєвого зростання гідравлічного опору.

Реалізація даного рішення сприятиме зниженню енерговитрат і підвищенню технологічної стабільності виробництва.

Список літератури

1. Mohammadzadeh A. M., Jafari B., Hosseinzadeh K. et al. Numerical investigation of segmental baffle design in shell and tube heat exchangers with varying inclination angles and spacing // Scientific Reports. 2025. Vol. 15. Article 4683. URL: <https://www.nature.com/articles/s41598-025-87652-x> (дата звернення: 22.02.2026).
2. Bayram H., Sevilgen G. Numerical investigation of the effects of different baffle types on the thermal performance of a shell and tube heat exchanger // Academic Platform Journal of Engineering and Science. 2018. Vol. 6, № 3. P. 58–66. URL: <https://dergipark.org.tr/en/pub/apjes/issue/38780/397414> (дата звернення: 22.02.2026).
3. Bayram H., Sevilgen G. Numerical investigation of the effect of variable baffle spacing on the thermal performance of a shell and tube heat exchanger // Energies. 2017. Vol. 10, № 8. Article 1156. URL: <https://www.mdpi.com/1996-1073/10/8/1156> (дата звернення: 22.02.2026).
4. Hasan S. M., Iqbal S., Khan I., Javaid A., Sajid M. Performance enhancement of a shell-and-tube heat exchanger using a novel baffle design // Case Studies in Thermal Engineering. 2025. Vol. 74. Article 106800. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X25010603> (дата звернення: 22.02.2026).