

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра хімічної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

**Кваліфікаційна робота бакалавра**  
**зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"**  
**освітня програма "Комп'ютерний інжиніринг**  
**обладнання хімічних виробництв"**

Тема роботи: Ректифікаційна установка. Розробити  
горизонтальний теплообмінник для випаровування бензолу

Виконав:  
студент групи ХМ-91/Зкі-1

Павлієнко Владислав Олександрович

\_\_\_\_\_  
підпис

Залікова книжка

№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота бакалавра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Острога Руслан Олексійович

\_\_\_\_\_  
підпис, дата

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
**Кафедра хімічної інженерії**

Спеціальність 133 "Галузеве машинобудування"  
Освітня програма "Комп'ютерний інжиніринг обладнання хімічних виробництв"

Курс 4    Група ХМ-91/3кі-1    Семестр 8

**ЗАВДАННЯ**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Студенту Павлієнку Владиславу Олександровичу

1 Тема роботи: Ректифікаційна установка. Розробити горизонтальний теплообмінник для випаровування бензолу

2 Вихідні дані: Розробити кожухотрубчастий теплообмінник з паровим простором для випаровування бензолу у кількості 2750 кг/год. під тиском 0,16 МПа. Гарячий теплоносій у трубах – насичена водяна пара під тиском 0,17 МПа.

Питання до розділу «Охорона праці»: Небезпечні зони устаткування. Класифікація та призначення засобів захисту.

3 Перелік обов'язкового графічного матеріалу (аркуші А1):

1. Технологічна схема ректифікаційної установки – 0,5 арк.
2. Складальний кресленик кожухотрубчастого випарника – 1,0 арк.
3. Складальні кресленики вузлів – 1,5 арк.

4 Рекомендована література: 1. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : СумДУ, 2019. – 32 с.

5 Етапи виконання кваліфікаційної роботи:

Етапи та розділи проектування	ТИЖНІ				
	1	2,3	4,5	6,7	8
1 Вступна частина	x				
2 Технологічна частина		xx			
3 Проектно-конструкторська частина			xx		
4 Розробка креслень				xx	
5 Оформлення записки					x
6 Захист роботи					x

6 Дата видачі завдання

жовтень 2022 р.

Керівник

\_\_\_\_\_

підпис

к.т.н. Острога Р.О.

## Зміст

	С.
Вступ	5
1 Технологічна частина	7
1.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки	7
1.2 Теоретичні основи процесів теплообміну	8
1.3 Опис кожухотрубчастого теплообмінника з паровим простором та вибір основних конструкційних матеріалів	16
2 Технологічні розрахунки процесу і апарата	22
2.1 Технологічні розрахунки	22
2.2 Конструктивні розрахунки	25
2.3 Гідравлічні розрахунки	27
2.4 Вибір допоміжного обладнання	29
3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність	34
3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки	34
3.2 Розрахунок опори апарата	37
4 Монтаж та ремонт апарата	40
4.1 Монтаж розробленого апарата	40
4.2 Ремонт апарата	44
5 Охорона праці	49
Список літератури	53
Додаток – Специфікації до складальних креслеників	

					<b>ХІ.Т.00.00.00 ПЗ</b>		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Лім.	Лист	Листів
Розроб.		Павлієнко			<b>Кожухотрубчастий теплообмінник з паровим простором</b> Пояснювальна записка		
Перевір.		Острога				4	54
Реценз.						<b>СумДУ, ХМ-91/Зкі-1</b>	
Н. Контр.							
Затверд.		Острога					

## Вступ

Теплообмінники – це пристрої, що забезпечують перехід тепла між різними робочими середовищами, незалежно від їхньої технологічної або енергетичної призначеності. Серед таких пристроїв можна виділити підігрівачі, випарні апарати, конденсатори, пастеризатори, випарники, деаератори, економайзери. Технологічне призначення теплообмінників різноманітне. Зазвичай розрізняють самі теплообмінники, в яких передача тепла є основним процесом, і реактори, у яких тепловий процес виконує допоміжну роль.

У хімічних виробництвах до 70 % всіх теплообмінних апаратів використовуються для передачі тепла між рідинами, рідина і паром за тиску до 1 МПа та температурі до 200°C. Для таких умов були розроблені і широко виробляються загального призначення теплообмінні апарати двох типів: кожухотрубного та спірального [1].

Перевагою кожухотрубного випарника є можливість забезпечення великої площі теплообміну при компактних розмірах і високій ступені промислової розвиненості. Однак, недоліком є велика витрата матеріалу, порівняно з деякими сучасними типами теплообмінних апаратів, такими як спіральні або пластинчасті теплообмінники. За оцінками фахівців, виготовлення трубчастих теплообмінників вимагає використання приблизно третини загального обсягу металу, який використовується у машинобудуванні [2].

Тому актуальною проблемою, над якою працюють фахівці з багатьох країн, є розробка методів підвищення ефективності теплообміну з метою зменшення ваги теплообмінників і збереження матеріалів. Один з найпростіших і ефективних способів інтенсифікації теплообміну полягає у зміні форми та режиму руху теплоносія. Це може бути досягнуто шляхом використання турбулентного потоку, збільшення швидкості теплоносія або зміни геометрії теплообмінного простору. Такі заходи сприяють покращенню переміщення тепла, забезпечують ефективнішу передачу тепла і дозволяють зменшити розмір теплообмінника. Інтенсифікація теплообміну дозволяє знизити витрати матеріалів, поліпшити теплову ефективність системи та підвищити загальну продуктивність процесу. Розробка нових ме-

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		5

тодів інтенсифікації теплообміну є важливою галуззю досліджень для вдосконалення енергоефективності та сталого розвитку промисловості.

Кваліфікаційна робота має на меті проєктування випарника з використанням плаваючої голівки типу ВП з метою ефективного випаровування бензолу. Плаваюча голівка є ключовим елементом цього випарника, яка забезпечує гнучкість і точність в управлінні процесом випаровування. Вона дозволяє регулювати поверхневу площу контакту між рідиною і теплоносієм, що сприяє покращенню передачі тепла і ефективному випаровуванню бензолу. Застосування плаваючої голівки також забезпечує стабільну роботу випарника навіть при зміні умов експлуатації або обсягу оброблюваної рідини.

Даний бакалаврський кваліфікаційний проєкт виконано в повній відповідності до методичних вказівок [3], включаючи всі розділи, вимоги до змісту та структуру.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<b>6</b>

# 1 Технологічна частина

## 1.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки

Технологічна схема досліджуваної ректифікаційної установки представлена на рис. 1.1.

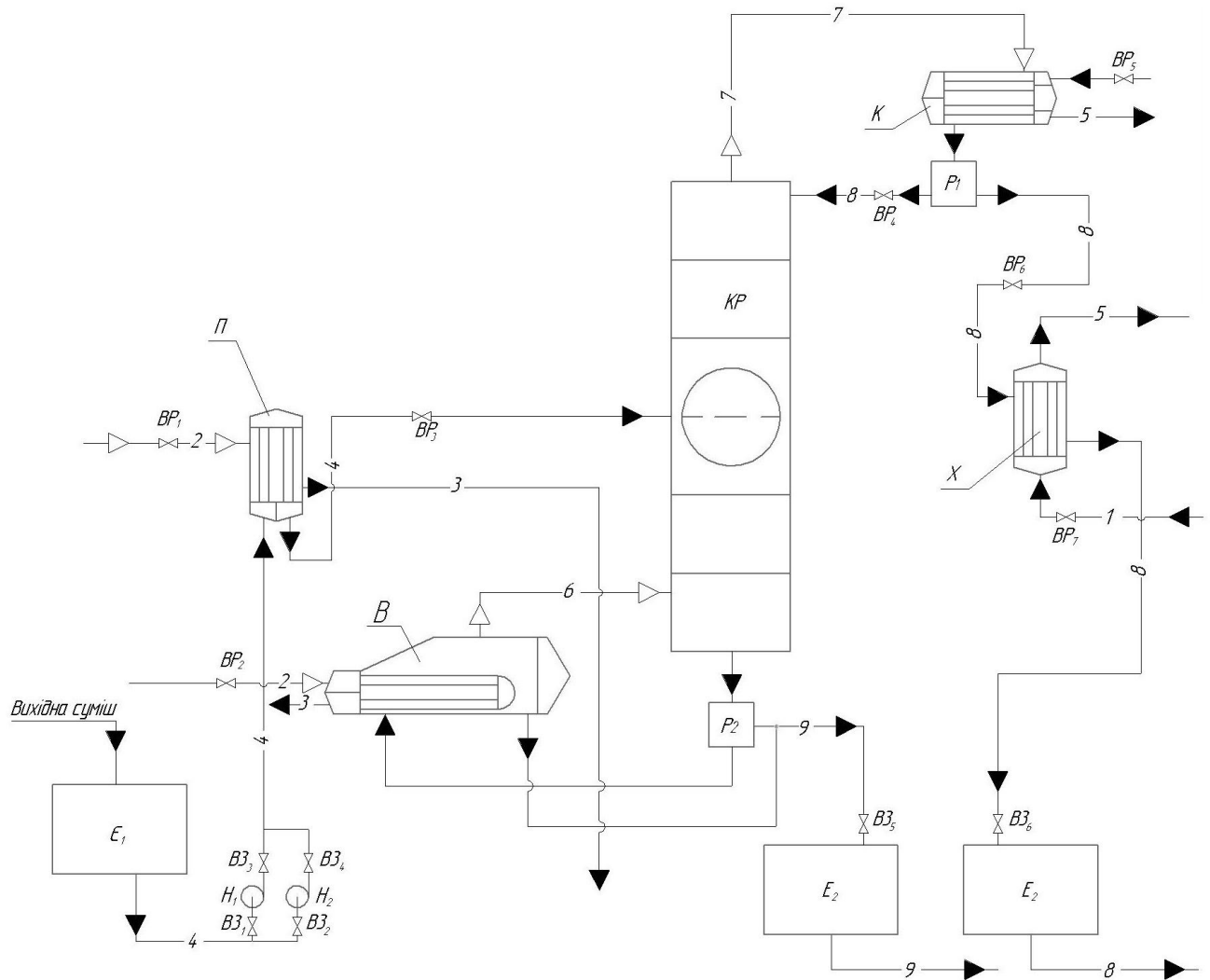


Рисунок 1.1 – Технологічна схема ректифікаційної установки

Розчин, що виходить зі збірника  $E_1$ , подається в теплообмінник П за допомогою відцентрових насосів  $H_1$  та  $H_2$ . У теплообміннику розчин підігрівається до температури кипіння за допомогою гарячої пари, яка конденсується у міжтрубному просторі. Після підігріву розчин направляє на тарілку живлення ректифікаційної колони КР, яка складається з верхньої (зміцнюючої) та нижньої (вичерпної) частин.

На тарілці живлення склад рідини відповідає складу вихідної суміші. У результаті поділу суміші в нижній частині колони відводиться бензол, який збирається у збірнику. Частина цього бензолу направляється в кожухотрубчастий випарник з паровим простором В. У випарнику за допомогою насиченої водяної пари, яка подається в трубний простір апарата, відбувається вскипання бензолу і утворення пари висококиплячого компонента (ВКК). Ця пара повертається до колони, конденсується та стає паровим зрошенням під нижньою тарілкою.

Таким чином, в нижній частині ректифікаційної колони відбувається процес відділення (вичерпання) висококиплячого компонента з рідкого розчину, який стікає вниз.

У верхній частині колони відбувається процес збагачення пари низькокиплячим компонентом (НКК) шляхом багатоступеневого контакту на масообмінних тарілках, де флегма стікає зверху вниз. Пара, що відводиться з верхньої частини колони, поступає в конденсатор К, де вона конденсується в міжтрубному просторі теплообмінника за рахунок відведення тепла холодоагентом, що протікає в трубному просторі. Частина утвореного конденсату повертається в колону у вигляді флегми для зрошення її верхньої частини. Інша частина (дистилят) додатково охолоджується в холодильнику Х та направляється в збірник як готовий продукт з високою концентрацією низькокиплячого компонента.

## 1.2 Теоретичні основи процесів теплообміну

Викладення теоретичних засад процесу теплообміну в цьому розділі базується на аналізі літературних джерел [4–8].

Теплообмін відбувається, коли тепло передається між тілами з різною температурою. Тепло природним чином переходить від тіла з вищою температурою до тіла з нижчою температурою. Тіла, які беруть участь у процесі теплообміну, називаються теплоносіями. Теплоносії з вищою температурою вважаються гарячими (вони віддають тепло), а з нижчою температурою – холодними (вони приймають тепло).

Теплообмінні апарати, також відомі як теплообмінники, використовуються для передачі тепла від одного теплоносія до іншого, який має нижчу температуру.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<b>8</b>

Теплообмінники можуть бути окремими пристроями або складовими частинами інших апаратів та пристроїв. Широке застосування теплообмінників спостерігається на хімічних підприємствах, оскільки багато технологічних процесів пов'язані з виділенням або поглинанням тепла.

Процес теплообміну може бути застосований для різних цілей, таких як нагрівання або охолодження. Теплоносіями можуть бути рідини, гази або тверді сипкі матеріали. Процес теплообміну може супроводжуватися зміною агрегатного стану одного або обох теплоносіїв, але також може відбуватись без цієї зміни.

Існує кілька принципів дії теплообмінників, які можна розрізнити:

- рекуперативні теплообмінники забезпечують передачу тепла через стінку, що розділяє обидва теплоносії;
- регенеративні теплообмінники використовують тверде тіло, таке як насадка, для передачі тепла від більш нагрітого теплоносія. Потім менш нагрітий теплоносій, омиваючи насадку, охолоджує її, при цьому сам нагріваючись;
- змішувальні теплообмінники передають тепло, коли теплоносії безпосередньо зіштовхуються один з одним.

Перші два типи теплообмінників відомі як поверхневі, оскільки у них поверхня теплообміну може бути геометрично визначена. У змішувальних теплообмінниках існує фізична поверхня теплообміну, але геометрично визначити її неможливо.

Різноманітність теплообмінників пояснюється різними функціями, які вони виконують, умовами, в яких вони працюють, а також властивостями теплоносіїв та матеріалів, з яких вони виготовлені. Це призводить до наявності безлічі різних конструкцій теплообмінників.

Рекуперативні теплообмінники можна класифікувати за такими характеристиками. За призначенням: вони можуть бути використані як холодильники, нагрівачі, конденсатори, випарники, реактори або бути вбудованими в інші апарати. За напрямком току теплоносіїв: вони можуть бути проточними (теплоносії протікають паралельно один одному), протиточними (теплоносії протікають у протилежних напрямках) або мати змішаний ток.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<b>9</b>



За матеріалом конструкції: вони можуть бути металевими або неметалеви-ми. За конструкцією та формою поверхні: вони можуть мати поверхню, створену з трубок або листів. За способом компенсації температурних розширень: вони можуть бути без компенсації або мати жорстку конструкцію, компенсуватися за допомогою пружних елементів або за рахунок вільних переміщень.

Кількість тепла, яка передається, є основою для визначення розміру поверхні теплообміну. Це надає конструктору індикативні вказівки щодо вибору конструкції теплообмінника, наприклад, простого змійовика або кожухотрубного теплообмінника.

Термодинамічні параметри та фізико-хімічні властивості впливають на значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  та коефіцієнта теплопередачі  $K$ , а також на розмір та форму поверхні теплообміну.

Коефіцієнт теплопередачі вимірює кількість тепла, яка передається від одного тіла до іншого за одиницю часу через одиницю поверхні при різниці температур між теплоносіями в  $1^{\circ}\text{C}$ .

Температури теплоносіїв визначаються середньою різницею температур  $\Delta t_{\text{ср}}$  і поверхнею теплообміну  $F$ , а також вибором напрямку теплоносіїв.

Об'єми теплоносіїв визначаються перерізами каналів теплообмінника, включаючи використання одно- або багатоходових конструкцій. Враховується агресивність теплоносіїв, що вимагає використання відповідних конструкційних матеріалів, що визначають форму та конструкцію теплообмінника. Забрудненість теплоносіїв призводить до застосування заходів, що запобігають відкладенню осаду, та вибору конструкції, що полегшує очищення забруднених поверхонь.

Вихідні дані визначення розмірів теплообмінника визначаються з теплового балансу:

$$Q = G_1 \cdot \Delta i_1 = G_2 \cdot \Delta i_2, \quad (1.1)$$

де  $Q$  – тепловий потік (кількість тепла, що передається від одного теплоносія іншому в одиницю часу), Вт;

$G_1$  і  $G_2$  – маса теплоносіїв, що обмінюються теплом, кг/с;

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		10

$\Delta i_1$  і  $\Delta i_2$  – зміна тепломістку теплоносіїв під час процесу теплопередачі, Дж/кг.

Якщо агрегатний стан теплоносія під час процесу теплопередачі залишається незмінним, то:

$$\Delta i = c_p \cdot (t_2 - t_1), \quad (1.2)$$

де  $t_1$  і  $t_2$  – температури теплоносія на вході та виході теплообмінника, К;  
 $c_p$  – середня теплоємність при температурі:

$$\frac{t_1 + t_2}{2}, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}. \quad (1.3)$$

Якщо в результаті кипіння або конденсації агрегатний стан теплоносія змінюється, то зміна тепломістку дорівнює:

$$\Delta i = c_n \cdot (t_n - t_n) + \tau + c \cdot (t_n - t_j), \quad \text{Дж/кг}; \quad (1.4)$$

де  $t_n$  і  $t_j$  – температури пари та рідини, К;  
 $t_n$  – температура насичення пари, К;  
 $c_n$  і  $c_j$  – середні теплоємності пари та рідини, Дж/(кг·К);  
 $\tau$  – теплота пароутворення, Дж/кг.

Визначення поверхні теплообмінника проводиться за основним рівнянням теплопередачі:

$$F = \frac{Q}{\Delta t_{cp} \cdot K}, \quad (1.5)$$

де  $F$  – поверхня теплообміну, м<sup>2</sup>;  
 $\Delta t_{cp}$  – середня різниця температур, К;  
 $K$  – коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м<sup>2</sup>·К).

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>11</b>

Температурна різниця  $\Delta t_{\text{сер}}$  є основною причиною для здійснення будь-якого процесу теплообміну і залежить від схеми руху теплоносіїв, а також збереження або зміни їхнього агрегатного стану. У випадку зміни агрегатного стану обох теплоносіїв:

$$\Delta t_{\text{сер}} = t_{\text{конд}} - t_{\text{кип}}, \text{ K}. \quad (1.6)$$

Якщо хоча б один із теплоносіїв не зазнає зміни свого агрегатного стану, то різниця температур при протіканні цього теплоносія вздовж стінки, що розділяє його від іншого теплоносія, буде змінюватись. У таких випадках основним температурним впливом є середня різниця температур.

Для випадків протитечії, паралельного току, а також коли одна сторона стінки, що розділяє теплоносії, омивається теплоносієм, який зберігає постійну температуру внаслідок зміни свого агрегатного стану, основним температурним фактором є середня логарифмічна різниця температур:

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{2,3 \cdot \lg \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}, \quad (1.7)$$

де  $\Delta t_1$  – більша різниця температур теплоносіїв біля одного кінця теплообмінника, К;

$\Delta t_2$  – менша різниця температур теплоносіїв біля іншого кінця теплообмінника, К.

Якщо відношення  $\frac{\Delta t_1}{\Delta t_2} \leq 2$ , то з достатньою точністю у якості середньої різниці температур можна приймати середню арифметичну різницю:

$$\Delta t_{\text{сер}} = \frac{\Delta t_1 + \Delta t_2}{2}. \quad (1.8)$$

Середня різниця температур при протитечії більша, ніж при паралельному току. Це означає, що для передачі заданої кількості тепла поверхня теплопередачі

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		12

стає найменшою у випадку протитечії. Крім того, при паралельному току кінцева температура теплоносія, що нагрівається, повинна бути обов'язково вищою за кінцеву температуру теплоносія, що гріє. У разі протитечії кінцева температура теплоносія, що гріє, може бути навіть нижчою за кінцеву температуру нагрівального теплоносія, що призводить до більш ефективної рекуперації тепла в протиточних теплообмінниках. Економічною перевагою протиточних теплообмінників є їх широке застосування. Протиточну конфігурацію можуть обмежувати важкі температурні умови, з якими має працювати метал теплообмінної поверхні з боку входу гарячого теплоносія, або технологічні обмеження, наприклад, небажання нагрівати оброблювані продукти.

Для перехресного току та інших схем взаємного руху теплоносіїв середня різниця температур підраховується як для протитоку, але отриманий результат множиться на поправочний коефіцієнт  $\varepsilon_T$ , тобто:

$$\Delta t'_{cp} = \varepsilon_T \cdot \Delta t_{cp}, \quad (1.9)$$

де  $\varepsilon_T$  – поправковий коефіцієнт.

Далі потрібно визначити коефіцієнт теплопередачі. Для плоскої стінки цей коефіцієнт обчислюється за допомогою такої формули:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{1}{\alpha_2} + \sum \frac{s}{\lambda}}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}, \quad (1.10)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі від гріючого теплоносія до стінки і від стінки до теплоносія, що нагрівається.,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$ ;

$s$  – товщина стінки, м;

$\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки,  $\frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$ .

Коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки визначає кількість тепла, яка переноситься через тіло протягом однієї секунди від однієї поверхні площею  $1 \text{ м}^2$

до іншої поверхні з такою ж площею, за умови, що товщина стінки становить 1 м, а різниця температур на поверхностях дорівнює 1°C. Величина коефіцієнта теплопровідності залежить від характеристик матеріалу стінки (наприклад, цегла, метал) і його структури, а також інших властивостей, і практично не залежить від температури.

Більшість стінок необхідно розглядати як багатошарові, оскільки під час експлуатації вони поступово покриваються шарами нальоту, уламків, мастила або корозії. Ці забруднюючі матеріали мають низьку теплопровідність, що в десятки або сотні разів менша, ніж у металів. Термічний опір цих шарів, навіть за малої їх товщини, може значно перевищувати термічний опір самої металевої стінки.

Термічний опір багатошарової стінки визначається як сума опорів кожного окремого шару, тобто:

$$\Sigma \frac{s}{\lambda} = \frac{s_1}{\lambda_1} + \frac{s_2}{\lambda_2} + \frac{s_3}{\lambda_3} + \dots \quad (1.11)$$

Зниження величини коефіцієнта теплопередачі, викликане збільшенням термічного опору, враховують при розрахунку. При цьому задаються максимальною товщиною забрудненого шару для твердих речовин від 0,5 до 1 мм, для мастила ~ 0,1 мм.

Середня температура стінки:

$$t_{\text{сер}} = \frac{t_x + t_e}{2}. \quad (1.12)$$

Визначення температури стінки апаратів має велике значення для різних аспектів, таких як встановлення допустимих напруг, вивчення температурних розширень, оцінка температурних напруг, оцінка швидкості корозії та багатьох інших ситуацій. Це особливо важливо для точного визначення коефіцієнтів тепловіддачі ( $\alpha_e$  і  $\alpha_n$ ), які є ключовими для проектування ефективних теплообмінників.

Нижче наведено основні критерії подібності, які використовуються в розрахунках процесів примусового конвективного теплообміну при русі теплоносіїв.

Критерій Нусельта характеризує теплообмін між теплоносієм і стінкою:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}; \quad (1.13)$$

Критерій Рейнольдса характеризує гідродинамічний режим руху теплоносія:

$$Re = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu}; \quad (1.14)$$

Критерій Прандтля характеризує теплофізичні властивості теплоносія:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}; \quad (1.15)$$

Критерій Грасгофа характеризує режим руху теплоносія при вільній конвекції:

$$Gr = \frac{l^3 \cdot g \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot \Delta\theta}{\mu^2}. \quad (1.16)$$

У рівняннях (1.13)–(1.16) наступні позначення:

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

$\lambda$  – теплопровідність теплоносія, Вт/(м·К);

$\mu$  – динамічна в'язкість теплоносія, Па·с;

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

$\rho$  – густина теплоносія, кг/м<sup>3</sup>;

$\beta$  – коефіцієнт об'ємного розширення теплоносія, 1/К;

$w$  – швидкість теплоносія, м/с;

$l$  – визначальний геометричний розмір, м;

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>15</b>

$g$  – прискорення сили тяжіння,  $\text{м/с}^2$ ;

$\Delta\theta$  – частковий температурний напір (різниця між температурою гарячого теплоносія і температурою стінки або між температурою стінки і температурою холодного теплоносія),  $\text{К}$ .

В умовах як вільного, так і вимушеного руху теплоносія можна використовувати перетворене (спрощене) рівняння – більш зручний для визначення усередненого значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  через рушійну силу процесу  $\Delta T_{\text{кин}}$  :

$$\alpha = b^3 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot (\Delta T_{\text{кин}})^2}{\nu \cdot \sigma \cdot |T_{\text{кин}}|} \quad (1.17)$$

Чисельне значення безрозмірною функції  $b$ , визначаємо з рівняння:

$$b = 0,75 + 7,5 \cdot \left( \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{р}} - \rho_{\text{п}}} \right)^{2/3}, \quad (1.18)$$

де  $\rho_{\text{р}}$ ,  $\rho_{\text{п}}$  – відповідно густини рідини і пари,  $\text{кг/м}^3$ .

### **1.3 Опис кожухотрубчастого теплообмінника з паровим простором та вибір основних конструкційних матеріалів**

Схема запроєктованого випарника з паровим простором типу ТП (з плаваючою голівкою) представлена на рис. 1.2.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>16</b>

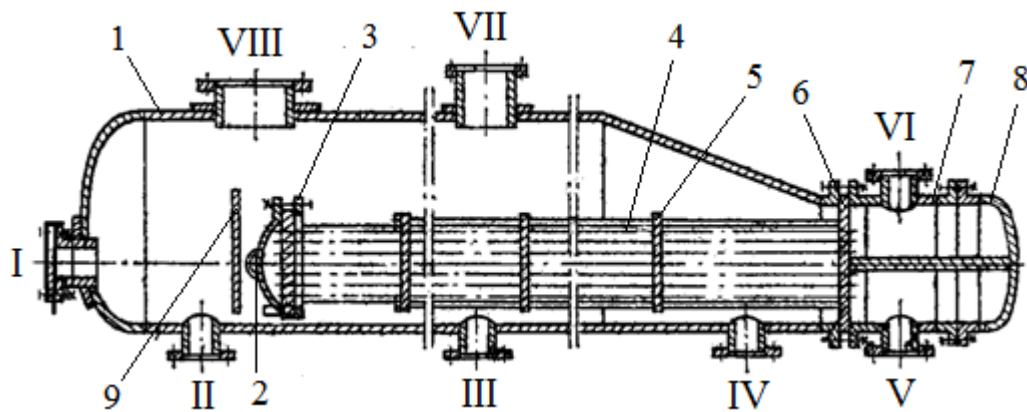


Рисунок 1.2 – Схема випарника з паровим простором типу ТП (з плаваючою голівкою): I – для монтажу пучка; II – вихід залишку продукту; III – дренаж; IV – вхід бензолу; V – вихід водяної пари (конденсату); VI – вхід водяної пари; VII – вихід парів бензолу; VIII – люк; 1 – кожух; 2 – плаваюча головка; 3 – рухома трубна решітка; 4 – теплообмінна труба; 5 – перегородка; 6 – нерухома трубна решітка; 7 – розподільна камера; 8 – кришка розподільчої камери

Принцип роботи випарника передбачає такий послідовний процес. Холодний теплоносій, а саме бензол, під тиском 0,16 МПа і при його кипінні, поступає через патрубок IV у міжтрубний простір випарника. У той же час, гарячий теплоносій – насичена водяна пара, яка при тиску 0,17 МПа має температуру 120°C, подається через патрубок VI до розподільної камери 7. Завдяки теплопередачі через стінку теплообмінних труб 4, відбувається активне випаровування бензолу. Відпрацьована водяна пара (або конденсат) видаляється з апарату через патрубок V.

Утворені пари бензолу, що виникають внаслідок його випаровування, видаляються з апарату за допомогою патрубку VII. Рівень рідини у випарнику підтримується за допомогою переливної планки 9. Якщо рідина перевищує встановлений рівень, вона виводиться з апарату через патрубок II. Перегородка 5 надає теплообмінним трубам жорсткість, щоб запобігти їх провисанню. Крім того, в апараті передбачені люк VIII і спеціальний патрубок I для забезпечення доступу для монтажу та ремонтних робіт.

Вибір матеріалів для виготовлення апарату ґрунтується на дослідженнях, які були проведені згідно з посиланнями [9, 10]. При виборі матеріалу враховується його корозійна стійкість і теплопровідність, оскільки конструкція теплообмінного апарату суттєво залежить від властивостей обраного матеріалу.



У випадку кожухотрубчастого випарника з паровим простором, матеріали вибираються відповідно до специфіки його експлуатації. Враховуються можливі зміни фізико-хімічних властивостей матеріалів під впливом робочого середовища, температури та хіміко-технологічного процесу, який відбувається. Такий підхід дозволяє забезпечити оптимальну вибіркову стійкість матеріалу до хімічних реагентів або інших факторів, що можуть впливати на його властивості під час роботи апарата.

При виборі матеріалу для конструкції апарата також потрібно враховувати наступні фактори:

1. Механічні властивості матеріалу: це включає межу міцності, відносне подовження, твердість та інші параметри, які визначають його здатність витримувати механічні навантаження і деформації. Це особливо важливо при роботі апарата під високим тиском або в умовах вібрацій.
2. Технологічність виготовлення, зокрема зварюваність: матеріал повинен бути легко піддатливим обробці і зварюванню, оскільки це впливає на ефективність виробничого процесу. Важливо обрати матеріал, який допускає зручне з'єднання компонентів апарата, забезпечуючи надійність і герметичність.
3. Хімічна стійкість проти роз'їдання: матеріал повинен бути стійким до дії хімічних реагентів, які можуть бути присутніми у робочому середовищі апарата. Це дозволяє забезпечити тривалий термін служби апарата без пошкоджень або деградації матеріалу.
4. Теплопровідність: ефективність теплообміну залежить від теплопровідності матеріалу. Вибір матеріалу з високою теплопровідністю дозволяє забезпечити ефективну передачу тепла і підвищити продуктивність апарата.

При виборі конструктивного матеріалу для апарата враховуються різні аспекти. Одним із ключових критеріїв є низька вартість матеріалу та його доступність на ринку. Вартість матеріалу грає важливу роль у загальній економіці проекту та може вплинути на вартість виготовлення апарата.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>18</b>

Однак, окрім вартості, необхідно також враховувати ефективну технологічність виготовлення. Матеріал повинен бути легким для обробки та зварювання, щоб забезпечити швидкий та ефективний процес виготовлення апарата. Технологічність виготовлення впливає на якість та надійність апарата, а також на тривалість виготовлення та збільшення продуктивності виробництва.

Окрім цього, розглядаються хімічна стійкість проти роз'їдання та теплопровідність матеріалу. Хімічна стійкість визначається здатністю матеріалу витримувати дію хімічних реагентів, які можуть бути присутніми у робочому середовищі апарата. Це важливо для забезпечення тривалої роботи апарата без деградації матеріалу.

Теплопровідність матеріалу має велике значення для ефективності теплообміну в апараті. Висока теплопровідність сприяє швидкій передачі тепла і поліпшує продуктивність апарата.

Враховуючи всі ці фактори, для виготовлення корпусу, фланців, розподільних камер та деталей, що працюють під тиском, раціонально використовувати сталь 16ГС. Вона відповідає вимогам щодо механічних властивостей та технологічності виготовлення.

Основні фізико-механічні властивості сталі 16ГС приведені в табл. 1.1.

Теплообмінні труби є одним з ключових елементів апарата, оскільки вони забезпечують ефективний теплообмін. Використання сталі 20 для виготовлення теплообмінних труб забезпечує необхідну міцність і стійкість до високих температур, що забезпечує довговічність та ефективну роботу апарата.

Штуцери, крипінні деталі (болти, гайки, шпильки), панелі, кронштейни, ребра жорсткості та інші деталі також виготовляються зі сталі 20. Цей матеріал має високу міцність, що дозволяє забезпечити надійну фіксацію компонентів апарата та стабільну роботу системи в цілому.

Сталь 20 також відзначається своєю хімічною стійкістю та теплопровідністю, що дозволяє їй витримувати агресивні середовища та ефективно передавати тепло. Це важливо для забезпечення безперебійної роботи апарата під впливом хімічних процесів та високих температур.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		19

Таблиця 1.1 – Фізико-механічні властивості сталі 16ГС

Показник	Значення
Модуль пружності E, МПа	200000
Модуль зсуву G, МПа	77000
Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850
Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	не менше 360
Межа текучості $\sigma_T$ , МПа	не менше 180
Відносне звуження $\psi$ , %	56
Відносне подовження $\delta$ , %	25
Твердість по Брінеллю, НВ	115
Зварюваність	без обмежень

Отже, використання сталі 20 для виготовлення теплообмінних труб, штуцерів, крипіжних деталей, панелей, кронштейнів, ребер жорсткості та інших компонентів дозволяє забезпечити високу міцність, хімічну стійкість та ефективну теплопровідність апарата.

Основні фізико-механічні властивості сталі 20 приведені в табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Фізико-механічні властивості сталі 20

Показник	Значення
Модуль пружності E, МПа	200000
Модуль зсуву G, МПа	74000
Щільність $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	7850
Межа міцності $\sigma_B$ , МПа	не менше 420
Межа текучості $\sigma_T$ , МПа	не менше 250
Відносне звуження $\psi$ , %	40
Відносне подовження $\delta$ , %	16
Твердість по Брінеллю, НВ	156
Зварюваність	без обмежень, окрім хіміко-термічно оброблених деталей

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

**XI.T.00.00.00 ПЗ**

Лист

**20**

Для забезпечення герметичності фланцевих з'єднань апарата використовується неметалевий прокладковий матеріал – пароніт. Пароніт є листовим матеріалом, що виготовляється шляхом пресування азбокаучукової маси, яка складається з азбесту, каучуку та порошкових інгредієнтів.

Використання пароніту для прокладок має декілька важливих переваг. По-перше, азбестова основа надає пароніту високу стійкість до впливу різних хімічних речовин, включаючи розчинники, мастила та кислоти. Це дозволяє забезпечити ефективне ущільнення фланцевих з'єднань навіть у вимогливих середовищах.

Крім того, каучукова матриця у складі пароніту надає йому гнучкість і деформабельність, що сприяє пристосуванню прокладки до нерівностей поверхонь та запобігає протіканню рідини або газу через з'єднання.

Прокладки з пароніту є легкими у виготовленні, мають високу міцність та довговічність. Вони також добре витримують високі температури і не піддаються значному стиску при стисканні між фланцями.

Враховуючи ці переваги, використання пароніту являє собою оптимальний вибір для виготовлення неметалевих прокладок, необхідних для ущільнення роз'ємів фланцевих з'єднань апарата. Він забезпечує надійну герметичність і довговічність з'єднань, що є важливим фактором для ефективної роботи апарата.

## 2 Технологічні розрахунки процесу і апарата

### 2.1 Технологічні розрахунки

Вихідні дані підтверджують, що бензол надходить до випарника у вигляді киплячої рідини (температура кипіння при абсолютному тиску 0,16 МПа становить 102°C [7]). Ця інформація є важливою для подальшого розрахунку і проектування теплообмінного процесу. Знання теплофізичних властивостей бензолу дозволяє точно врахувати його поведінку під час процесу випаровування і забезпечити оптимальні умови для ефективного теплообміну.

Теплове навантаження випарника визначається не лише за температурою кипіння бензолу, але і з урахуванням його теплоємності та теплопровідності. Ці параметри дозволяють оцінити кількість тепла, яка потрібна для випаровування бензолу. Для визначення теплового навантаження випарника також потрібно врахувати режими роботи апарата, зокрема тиск і температуру в міжтрубному просторі, які впливають на швидкість випаровування бензолу. Це дозволяє встановити оптимальні параметри для досягнення бажаної продуктивності теплообміну.

Враховуючи теплове навантаження випарника, ми можемо здійснити ефективний розрахунок і проектування системи теплообміну. Це допомагає забезпечити оптимальне використання енергії, підвищити ефективність процесу та забезпечити стабільну роботу апаратури.

Тому теплове навантаження випарника у нашому випадку буде становити:

$$Q = Q_{исп} = G_x \cdot r_x, \quad (2.1)$$

де  $r_x$  – питома теплота пароутворення бензолу,  $r_x = 400$  кДж/кг [12].

$$Q = Q_{исп} = \frac{2750}{3600} \cdot 400 = 306 \text{ (кВт)}.$$

Витрата гарячого теплоносія (водяної пари):

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 \cdot (t_{н2} - t_{к2})}, \quad (2.2)$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>22</b>

де  $c_2$  – теплоємність водяної пари,  $c_2 = 2,17$  кДж/(кг·К) [12];

$t_{к2}$  – кінцева температура водяної пари.

Для навчальних розрахунків можна використовувати орієнтовне правило, що температура кипіння робочої рідини має бути на 5–6°C нижче середньої температури охолоджуваного теплоносія [13].

Для приблизного оцінювання теплових параметрів і встановлення початкових значень це правило може бути корисним. Врахування цієї різниці температур допомагає забезпечити ефективний процес теплообміну, де робоча рідина переходить у пароподібний стан. Таким чином, за рекомендацією [13] приймаємо  $t_{к2} = 108^\circ\text{C}$ .

$$G_2 = \frac{306}{2,17 \cdot (120 - 108)} = 11,8 \text{ (кг/с)}.$$

Середня різниця температур:

$$\Delta t_{cp} = \frac{18 - 6}{\ln\left(\frac{18}{6}\right)} = 11^\circ\text{C},$$

де більша різниця температур дорівнює  $\Delta t_B = 120 - 102 = 18^\circ\text{C}$ ;

менша різниця температур дорівнює  $\Delta t_M = 108 - 102 = 6^\circ\text{C}$ .

Розраховуємо поверхню теплопередачі:

$$F = \frac{306 \cdot 10^3}{450 \cdot 11} = 61,8 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Вибираємо стандартизований теплообмінник з такими характеристиками: поверхня теплообміну  $F = 62 \text{ м}^2$ ; внутрішній діаметр кожуха  $D = 1000 \text{ мм}$ ; довжина труб  $L = 6000 \text{ мм}$ ; сортамент труб  $\text{Ø}25 \times 2 \text{ мм}$ ; кількість трубних пучків 1; кількість труб у трубному пучку 132; площа прохідного перетину одного ходу по трубах  $s_{mp} = 23 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ .

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>23</b>

Фактична швидкість руху водяної пари у трубах:

$$w_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \cdot s_{mp} \cdot n}, \quad (2.3)$$

де  $\rho_2$  – густина водяної пари; при усередненій температурі  $\rho_2 = 0,8 \text{ кг/м}^3$ ;  
 $n$  – число ходів по трубах; згідно із прийнятою конструкцією  $n = 2$ .

$$w_2 = \frac{11,8}{0,8 \cdot 23 \cdot 10^{-2} \cdot 2} = 32 \text{ (м/с)}.$$

Враховуючи, що для водяної пари динамічний коефіцієнт в'язкості дорівнює  $\mu_2 = 12,4 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_2 = 2,48 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  і коефіцієнт об'ємного розширення теплоносія  $\beta_2 = 2,6 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$  визначаємо критерії:

– за рівнянням (1.14) – критерій Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{32 \cdot 0,021 \cdot 0,8}{12,4 \cdot 10^{-6}} = 43355.$$

– за рівнянням (1.15) – критерій Прандтля:

$$\text{Pr} = \frac{12,4 \cdot 10^{-6} \cdot 2,17 \cdot 10^3}{2,48 \cdot 10^{-2}} = 1,09.$$

За чисельним значенням критерію Рейнольдса можемо встановити, що режим руху водяної пари в трубах – турбулентний. Значить, для визначення критерію Нуссельта використовуємо рівняння:

$$\text{Nu}_2 = 0,023 \cdot \text{Re}_2^{0,8} \cdot \text{Pr}_2^{0,4};$$

$$\text{Nu}_2 = 0,023 \cdot 43355^{0,8} \cdot 1,09^{0,4} = 122.$$

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_2$ :

$$\alpha_2 = \frac{122 \cdot 0,248}{0,021} = 1441 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>24</b>

Коефіцієнт тепловіддачі зі сторони бензолу  $\alpha_x$  визначаємо з рівняння (1.17), попередньо розрахувавши за рівнянням (1.18) значення безрозмірної функції  $b$ :

$$b = 0,75 + 7,5 \cdot \left( \frac{7,5}{800 - 7,5} \right)^{2/3} = 1,08.$$

Для бензолу:  $\nu_x = 0,138 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_x = 0,121 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\sigma_x = 0,019 \text{ Н}/\text{м}$ .

$$\alpha = 1,08 \cdot \frac{0,121^2 \cdot 112^2}{0,138 \cdot 0,019 \cdot 102} = 742 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Далі визначаємо реальний коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{1441} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{742}} = 480 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

## 2.2 Конструктивні розрахунки

Розрахункова поверхня випарника складе:

$$F_p = \frac{306 \cdot 10^3}{480 \cdot 11} = 58 (\text{м}^2).$$

Запас поверхні:

$$\Delta = \frac{F - F_p}{F} \cdot 100\% ; \quad (2.4)$$

$$\Delta = \frac{62 - 58}{62} \cdot 100\% = 6,5\% .$$

Як бачимо, запас поверхні забезпечується.

Остаточо вибираємо випарник типу ТП з такими характеристиками: поверхня теплообміну  $F = 62 \text{ м}^2$ ; внутрішній діаметр кожуха  $D = 1000 \text{ мм}$ ; довжина труб  $L = 6000 \text{ мм}$ ; сортамент труб  $\text{Ø}25 \times 2 \text{ мм}$ ; кількість трубних пучків 1; кількість

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>25</b>



труб у трубному пучку 132; площа прохідного перетину одного ходу по трубах  $s_{mp} = 23 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ .

Діаметри штуцерів випарника для підведення-відведення теплоносіїв визначаємо за формулою:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot w}}, \quad (2.5)$$

де  $V$  і  $G$  – об'ємна і масова витрати рідини/пари відповідно,  $\text{м}^3/\text{с}$  і  $\text{кг}/\text{с}$ ;

$\rho$  – густина потоку середовища,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;

$w$  – швидкість витікання середовища,  $\text{м}/\text{с}$ .

Рекомендовані швидкості руху теплоносіїв [8]: для рідини 0,1–0,5  $\text{м}/\text{с}$  при самопливі і 0,5–2,5  $\text{м}/\text{с}$  в напірних трубопроводах; для пари або газу 5–25  $\text{м}/\text{с}$ .

Діаметр патрубку IV (рис. 1.2) для входу бензолу в апарат:

$$d_{x.vx} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2750 / 3600}{3,14 \cdot 800 \cdot 1,3}} = 0,031(\text{м}).$$

Діаметр патрубку VII (рис. 1.2) для виходу парів бензолу:

$$d_{x.vux} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2750 / 3600}{3,14 \cdot 7,5 \cdot 15}} = 0,093(\text{м}).$$

Діаметри патрубків VI і V (рис. 1.2) для входу і виходу водяної пари:

$$d_{z.vx} = \sqrt{\frac{4 \cdot 11,8}{3,14 \cdot 0,8 \cdot 20}} = 0,097(\text{м}).$$

За отриманими значеннями приймаємо стандартні патрубки: для входу бензолу  $D_y = 32 \text{ мм}$ ; для виходу парів бензолу  $D_y = 100 \text{ мм}$ ; для входу і виходу водяної пари  $D_y = 100 \text{ мм}$ .

## 2.3 Гідравлічні розрахунки

У процесі функціонування випарника бензол проходить через міжтрубний простір. Цей простір міститься між зовнішніми трубами і необхідний для забезпечення ефективного теплообміну. Однак, з огляду на низькі швидкості руху теплоносія в міжтрубному просторі, його гідравлічний опір може бути знехтуваний або вважатися дуже малим.

Головний акцент розрахунку гідравлічного опору здійснюється на інші елементи системи, такі як труби, фітинги, фланці і клапани, через які протікає теплоносій. Враховуючи параметри теплоносія та геометрію цих елементів, можна визначити опір, який необхідно подолати для руху теплоносіїв через апарат. Такий розрахунок є важливим для забезпечення ефективності теплообмінного процесу та визначення оптимальних режимів роботи випарника.

Ми виконуємо гідравлічний розрахунок згідно з методикою, що описана у джерелі [14].

Повний напір, необхідний для руху рідини або газу через теплообмінник, визначаємо за такою формулою:

$$\Delta P = \Sigma \Delta P_{TP} + \Sigma \Delta P_M + \Sigma \Delta P_U + \Sigma \Delta P_G, \quad (2.6)$$

де  $\Sigma \Delta P_{TP}$  – сума гідравлічних втрат на тертя, Па;

$\Sigma \Delta P_M$  – сума втрат напіру в місцевих опорах, Па;

$\Sigma \Delta P_U$  – сума втрат напіру, обумовлених прискоренням потоку, Па;

$\Sigma \Delta P_G$  – перепад тиску для подолання стовпа рідини, Па.

Гідравлічні втрати на тертя в каналах при поздовжньому омиванні пучка труб теплообмінного апарату визначаємо за формулою:

$$\Delta P_{TP} = \lambda_{TP} \cdot \frac{L}{d_E} \cdot \frac{w_2^2 \cdot \rho_2}{2}, \quad (2.7)$$

де  $\lambda_{TP}$  – коефіцієнт опору тертя.

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d_E} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (2.8)$$

де  $\Delta$  – абсолютна шорсткість поверхні труб, мм.

Для сталевих нових труб  $\Delta = 0,06-0,1$  мм, для сталевих труб, що були в експлуатації, з незначною корозією  $\Delta = 0,1-0,2$  мм.

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{0,1}{0,021} + \frac{68}{43355} \right)^{0,25} = 0,163.$$

$$\Delta P_{TP} = 0,163 \cdot \frac{6}{0,021} \cdot \frac{32^2 \cdot 0,8}{2} = 19076 \text{ (Па)}.$$

Гідравлічні втрати тиску в місцевих опорах визначаємо за формулою:

$$\Delta P_M = \xi \cdot \frac{w_z^2 \cdot \rho_z}{2}, \quad (2.9)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт місцевого опору. Його знаходять як суму опорів кожного елемента випарника:  $\xi = 2 \cdot \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$  (вхідна і вихідна камери  $\xi_1 = 1,5$ , вхід у труби  $\xi_2 = 0,5$  і вихід із них  $\xi_3 = 1$ , поворот на  $180^\circ$  між ходами  $\xi_4 = 1,4$  [14]).

$$\xi = 2 \cdot 1,5 + 0,5 + 1 + 1,4 = 5,9.$$

$$\Delta P_M = 5,9 \cdot \frac{32^2 \cdot 0,8}{2} = 2417 \text{ (Па)}.$$

Оскільки для крапельних рідин втрати тиску  $\Delta P_y$  мізерно малі, то вони в розрахунок не приймаються ( $\Delta P_y = 0$ ).

Перепад тиску для подолання гідростатичного стовпа рідини дорівнює нулю ( $\Delta P_T = 0$ ), оскільки випарник не сполучається із навколишнім середовищем.

Повний напір, необхідний для руху середовищ через апарат складе:

$$\Delta P = 19076 + 2417 = 21493 \text{ Па} \approx 21,5 \text{ кПа}.$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>28</b>

## 2.4 Вибір допоміжного обладнання

### Розрахунок і вибір збірника для вихідної суміші.

У відповідності до технологічної схеми (див. рис. 1.1), початкова суміш, що поступає на установку для подальшого розділення, попередньо надходить у збірник-сховище  $\epsilon_1$ . Із урахуванням початкових даних, бензол, який входить в проєктований випарник, має витрату 2750 кг/год. Таким чином, ми робимо припущення, що загальна продуктивність ректифікаційної установки для початкової суміші становить 5000 кг/год. Щодо об'ємної ємності для зберігання початкової суміші, ми розраховуємо її, враховуючи резерв робочого часу тривалістю 6–8 годин і коефіцієнт заповнення приймаємо  $\psi = 0,85$ .

Розрахунковий об'єм ємності:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}, \quad (2.10)$$

де  $G$  – загальна витрата суміші, кг/год.;

$\tau$  – резерв робочого часу,  $\tau = 7$  год.;

$\rho$  – густина вихідної суміші,  $\rho = 800$  кг/м<sup>3</sup>.

$$V_{EP} = \frac{5000 \cdot 7}{0,85 \cdot 800} = 51,5 \text{ м}^3.$$

Задаємося стандартизованим діаметром ємності  $D = 3,2$  м, тоді її висота складе:

$$H = \frac{V_{EP}}{0,785 \cdot D^2}; \quad (2.11)$$

$$H = \frac{51,5}{0,785 \cdot 3,2^2} = 6,4 \text{ м.}$$

### Розрахунок і вибір насоса для подачі вихідної суміші в колону.

Для всмоктуючого і нагнітального трубопроводів приймемо однакову швидкість плинину рідини, яка становитиме  $w = 2$  м/с.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>29</b>

Діаметр трубопроводу визначаємо за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (2.12)$$

де  $V$  – об’ємна витрата вихідної суміші,  $\text{м}^3/\text{с}$ .

$$d = \sqrt{\frac{1,7 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 2}} = 0,032 \text{ м.}$$

Визначаємо критерій Рейнольдса для рідини в трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_p}{\mu}, \quad (2.13)$$

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 0,032 \cdot 800}{0,25 \cdot 10^{-3}} = 204800,$$

тобто режим турбулентний. Абсолютну шорсткість трубопроводу приймаємо  $\Delta = 2 \cdot 10^{-4}$  м. Тоді

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,032} = 0,00625.$$

Далі отримаємо:

$$\frac{1}{e} = 160; \quad 560 \cdot \frac{1}{e} = 89600; \quad 10 \cdot \frac{1}{e} = 1600;$$

$$\text{Re} > 560 \cdot \frac{1}{e}.$$

Для зони, що є автотурбулентною по відношенню до  $\text{Re}$ :

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}, \quad (2.14)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot 0,00625^{0,25} = 0,03.$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>30</b>

Далі визначаємо суму коефіцієнтів місцевих опорів окремо для всмоктуючої і нагнітальної ліній.

Для всмоктуючої лінії: 1) вхід у трубу (приймаємо з гострими краями)  $\xi_1 = 0,5$ ; 2) 2 коліна з кутом  $90^\circ$   $\xi_2 = 2 \cdot 1,1 = 2,2$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2;$$

$$\Sigma \xi = 0,5 + 2,2 = 2,7.$$

Для нагнітальної лінії: 1) вентилі прямоточні, 2 шт.  $\xi_1 = 2 \cdot 0,65 = 1,3$ ; 2) 3 коліна з кутом  $90^\circ$   $\xi_2 = 3 \cdot 1,1 = 3,3$ ; 3) вихід із труби  $\xi_3 = 1$ .

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3;$$

$$\Sigma \xi = 1,3 + 3,3 + 1 = 5,6.$$

Втрачений напір у всмоктуючій лінії знаходимо за формулою:

$$h_{П.ВС.} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (2.15)$$

де  $l, d_E$  – відповідно довжина і еквівалентний діаметр трубопроводу.

$$h_{П.ВС.} = \left( 0,03 \cdot \frac{8}{0,032} + 2,7 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 2,08 \text{ м.}$$

Втрачений напір в нагнітальній лінії:

$$h_{П.НАГ.} = \left( 0,03 \cdot \frac{12}{0,032} + 5,6 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 3,44 \text{ м.}$$

Загальні втрати напору:

$$h_{П.} = h_{П.ВС.} + h_{П.НАГ.}, \quad (2.16)$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>31</b>

$$h_{II} = 2,08 + 3,44 = 5,52 \text{ м.}$$

Знаходимо напір насоса за рівнянням:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_p \cdot g} + H_G + h_{II}, \quad (2.17)$$

де  $(P_2 - P_1)$  – різниця тисків в апараті і в ємності, із якої подається рідина;

$H_G$  – геометрична висота підйому рідини.

$$H = \frac{0,1}{800 \cdot 9,81} + 6 + 5,52 = 11,5 \text{ м.}$$

Корисну потужність насоса визначаємо за рівнянням:

$$N_{II} = \rho_p \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (2.18)$$

де  $Q$  – подача (витрата),  $Q = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;

$H$  – напір насоса.

$$N_{II} = 800 \cdot 9,81 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} \cdot 11,5 = 154 \text{ Вт.}$$

Потужність, яку повинен розвивати електродвигун насоса на вихідному валу при сталому режимі роботи:

$$N = \frac{N_{II}}{\eta_{пер} \cdot \eta_n}, \quad (2.19)$$

де  $\eta_n, \eta_{пер}$  – коефіцієнти корисної дії відповідно насоса і передачі від електродвигуна до насоса. Приймаємо  $\eta_n = 0,6$  і  $\eta_{пер} = 1$ .

Отримуємо:

$$N = \frac{154}{1 \cdot 0,6} = 257 \text{ Вт.}$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>32</b>

Вибираємо відцентровий насос марки ЦНС 13-18 з такими параметрами:  
об'ємна подача насоса 13 м<sup>3</sup>/год.; напір насоса 18 м; потужність, споживана насосом 2,5 кВт; частота обертання 2200 об/хв.

					<b>ХІ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>33</b>



### 3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність

#### 3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки

Розрахунок проводимо відповідно до методики, що викладена у [15]. Приймаємо робочий тиск у міжтрубному просторі 0,16 МПа.

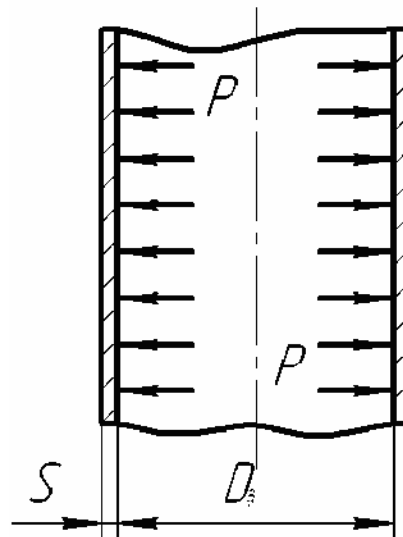


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема циліндричної обичайки

Знаходимо величину нормативної допустимого напруження для сталі 16ГС при розрахунковій температурі 102°C:  $\sigma^* = 200$  МПа.

Допустиме напруження:

$$[\sigma] = \sigma^* \cdot \eta, \quad (3.1)$$

де  $\eta = 1$  – поправковий коефіцієнт для листового прокату.

$$[\sigma] = 200 \cdot 1 = 200 \text{ МПа}.$$

Допустиме напруження при гідравлічних випробуваннях:

$$[\sigma]_{II} = \frac{\sigma_T^{20}}{1,1}, \quad (3.2)$$

де  $\sigma_T^{20} = 280$  МПа – межа плинності сталі 16ГС при температурі 20°C.

$$[\sigma]_{II} = \frac{280}{1,1} = 255 \text{ МПа}.$$

Далі визначаємо розрахунковий тиск:

$$P_p = P + P_r, \quad (3.3)$$

де  $P = 0,16$  МПа – робочий тиск;

$P_r$  – гідростатичний тиск середовища.

Гідростатичний тиск середовища:

$$P_r = g \cdot \rho_p \cdot H_p; \quad (3.4)$$

$$P_r = 9,81 \cdot 800 \cdot 0,6 = 0,005 \text{ МПа};$$

$$P_p = 0,16 + 0,005 = 0,165 \text{ МПа}.$$

Оскільки розрахунковий тиск менше 0,5 МПа, то пробний тиск при гідравлічних випробуваннях визначаємо за рівнянням:

$$P_{II} = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot P_p \cdot [\sigma]_{20}}{[\sigma]}, 0,2 \right\}, \quad (3.5)$$

де  $[\sigma]_{20} = \sigma_{20}^* = 196$  МПа – допустиме напруження сталі 16ГС при 20°C.

$$P_{II} = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot 0,165 \cdot 196}{200} = 0,24 \text{ МПа}, 0,2 \text{ МПа} \right\} = 0,24 \text{ МПа}.$$

Розрахункова товщина циліндричної обичайки:

$$S_p^{II} = \max \left\{ \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_p}, \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{II} - P_{II}} \right\}, \quad (3.6)$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>35</b>

де  $\varphi = 1$  – коефіцієнт міцності зварних швів із двостороннім суцільним проваром, виконаних автоматичним або напівавтоматичним зварюванням.

$$S_p^H = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,165 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 200 - 0,165} = 0,41 \text{ мм} \\ \frac{0,24 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 255 - 0,24} = 0,47 \text{ мм} \end{array} \right\} = 0,47 \text{ мм} .$$

Виконавча товщина циліндричної обичайки:

$$S_{ц} \geq S_p^H + c, \quad (3.7)$$

де  $c$  – прибавка до розрахункових товщин конструктивних елементів:

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \quad (3.8)$$

$c_1$  – прибавка для компенсації корозії та ерозії;

$c_2$  – прибавка для компенсації мінусового допуску;

$c_3$  – технологічна прибавка.

Приймаємо, що  $c_2 = c_3 = 0$ . Прибавку для компенсації корозії та ерозії визначаємо за рівнянням:

$$c_1 = P \cdot \tau, \quad (3.9)$$

де  $P = 0,12$  мм/рік – проникність матеріалу;

$\tau = 15$  років – термін роботи апарата.

$$c = c_1 = 0,12 \cdot 15 = 1,8 \text{ мм};$$

$$S_{ц} = 0,47 + 1,8 = 2,27 \text{ мм} .$$

Приймаємо  $S_{ц} = 4 \text{ мм}$  .

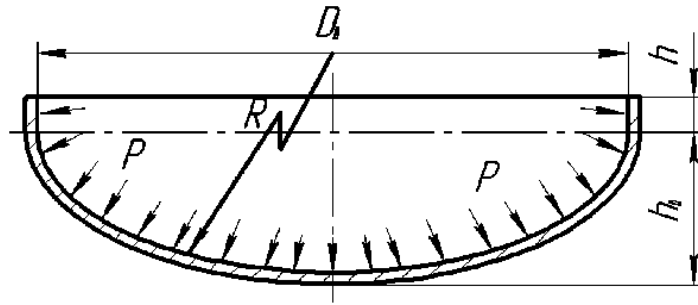


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема еліптичного днища

Розрахункова товщина еліптичного днища:

$$S_P^E = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_P \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot P_P} \\ \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma]_{II} - 0,5 \cdot P_{II}} \end{array} \right\}, \quad (3.10)$$

$$S_P^E = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,165 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 200 - 0,5 \cdot 0,165} = 0,41 \text{ мм} \\ \frac{0,24 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 255 - 0,5 \cdot 0,24} = 0,47 \text{ мм} \end{array} \right\} = 0,47 \text{ мм}.$$

Виконавча товщина еліптичного днища:

$$S_E \geq S_P^E + c, \quad (3.11)$$

$$S_E = 0,47 + 1,8 = 2,27 \text{ мм}.$$

Також приймаємо  $S_E = 4 \text{ мм}$ .

### 3.2 Розрахунок опори апарата

Знаходимо масу обичайки кожуха:

$$m_k = \left[ \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot S_{II})^2}{4} - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot H \cdot \rho, \quad (3.12)$$

де  $\rho$  – щільність сталі;  $\rho = 7890 \text{ кг/м}^3$ .

Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата

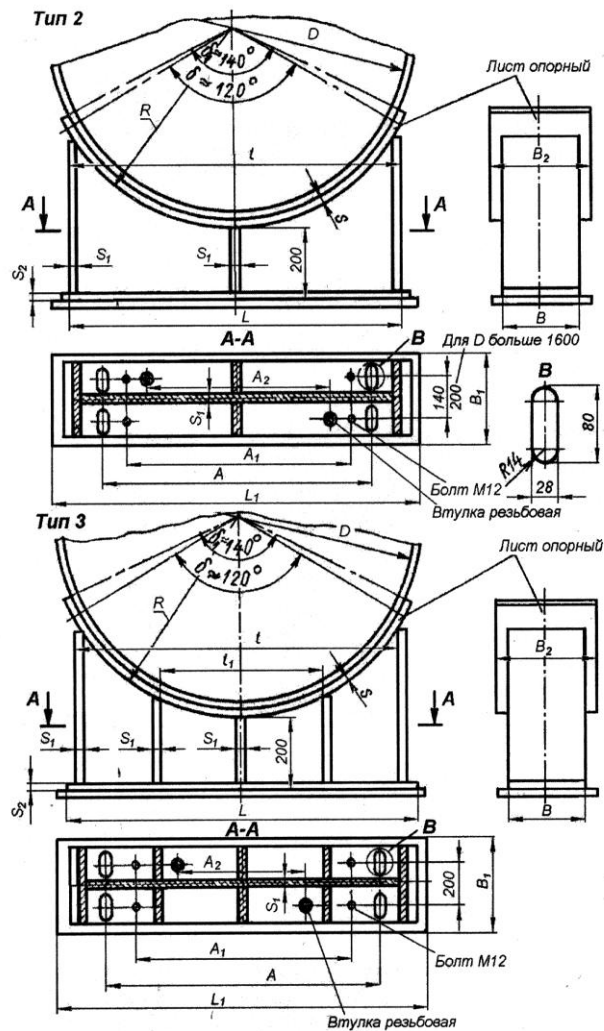


Рисунок 3.3 – Конструктивна схема стандартних сідлових опор

$$m_k = \left[ \frac{3,14 \cdot (1 + 2 \cdot 0,004)^2}{4} - \frac{3,14 \cdot 1^2}{4} \right] \cdot 6 \cdot 7890 = 597 \text{ (кг)}.$$

Маса еліптичного днища і кришки відповідно (згідно [15]):

$$m_E = 1,24 \cdot D^2 \cdot S_E \cdot \rho, \quad (3.13)$$

$$m_{E_{дн}} = 1,24 \cdot 1^2 \cdot 0,004 \cdot 7890 = 39 \text{ (кг)};$$

$$m_{E_{кр}} = 1,24 \cdot 0,6^2 \cdot 0,004 \cdot 7890 = 14,1 \text{ (кг)}.$$

Маса труб:

$$m_{тр} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_n^2 - d_{вн}^2) \cdot H \cdot n \cdot \rho, \quad (3.14)$$

$$m_{mp} = \frac{3,14}{4} \cdot (0,025^2 - 0,021^2) \cdot 6 \cdot 132 \cdot 7890 = 903 \text{ (кг)}.$$

Маса фланця з решіткою:

$$m_{\phi} = \frac{\pi \cdot D_{\phi}^2}{4} \cdot h_{\phi} \cdot \rho, \quad (3.15)$$

де  $D_{\phi}$  – зовнішній діаметр фланця, м;

$h_{\phi}$  – висота фланця, м.

$$m_{\phi} = \frac{3,14 \cdot 0,61^2}{4} \cdot 0,06 \cdot 7890 = 138 \text{ (кг)}.$$

Об'єм міжтрубного простору:

$$V_{mtp} = f_{mtp} \cdot H, \quad (3.16)$$

$$V_{mtp} = 0,2 \cdot 6 = 1,2 \text{ (м}^3\text{)}.$$

При коефіцієнті заповнення  $\varphi=0,5$  маса бензолу в апараті складе:

$$m_x = V_{mtp} \cdot \rho_x \cdot \varphi, \quad (3.17)$$

$$m_x = 1,2 \cdot 800 \cdot 0,5 = 480 \text{ (кг)}.$$

Сила тяжіння апарату в робочому стані:

$$G = g \cdot (m_k + m_{\text{эдн}} + m_{\text{экр}} + m_{mp} + m_{\phi} + m_x); \quad (3.18)$$

$$G = 9,81 \cdot (597 + 39 + 14,1 + 903 + 138 + 480) = 21300 \text{ (Н)}.$$

Приймаємо кількість опор  $n = 2$  шт.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>39</b>

Навантаження на одну опору складе:

$$Q = \frac{G}{n}; \quad (3.19)$$

$$Q = \frac{21300}{2} = 10650 \text{ (Н)}.$$

Остаточно приймаємо стандартну сідлову опору 400-514-2-П, конструктивні розміри якої (умовні позначення див. рис. 3.3):  $D = 1000$  мм;  $R = 514$  мм;  $S_1 = 8$  мм;  $S_2 = 14$  мм;  $L = 1000$ ;  $A = 650$  мм;  $A_1 = 550$  мм;  $A_2 = 400$  мм;  $l = 980$  мм;  $B = 250$  мм;  $L_1 = 1020$  мм; втулка для опори М48;  $S = 6$  мм;  $B_2 = 360$  мм.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>40</b>

## 4 Монтаж та ремонт апарата

### 4.1 Монтаж розробленого апарата [16]

Випарник бензолу з паровим простором належить до категорії кожухотрубних теплообмінників, які характеризуються певною технологією монтажу в залежності від місця і способу установки. Ці апарати можуть бути встановлені на відкритому майданчику, на спеціальних постаментах або всередині будівлі. Крім того, їх можна монтувати як горизонтально, так і вертикально, залежно від конкретних вимог технологічного процесу і умов розташування. Рішення щодо вибору місця і способу установки випарника залежить від вимог безпеки, доступності обслуговування та ефективності експлуатації апарату.

У нашому випадку ми маємо горизонтальний випарник, який розташований на відкритому майданчику на нульовій позначці. Для забезпечення стійкості і надійності монтажу випарника використовуються фундаменти у вигляді двох залізобетонних стовпів з анкерними болтами під опори. Під час монтажу, встановлюються нерухомі і рухомі опори. Гайки на болтах не закручуються повністю, залишаючи зазор 1–2 мм, щоб апарат міг вільно переміщуватись в горизонтальному напрямку.

Під час установки опор, які можуть зміщуватись, перевіряють рівномірність прилягання ковзенок до опорних поверхонь та їх перпендикулярність осі апарата. Горизонтальність випарника перевіряється за допомогою рівнеміра для забезпечення правильної геометричної конфігурації.

Такий підхід до монтажу гарантує стабільність та безпеку експлуатації випарника, а також забезпечує можливість легкого обслуговування і переміщення апарату за необхідності.

Під час монтажу кожухотрубних теплообмінників в окремих випадках проводиться контрольне розбирання або ревізія. Це дозволяє перевірити наявність прокладок, комплектність знімних деталей і правильність їх взаємного розташування.

Під час контрольного розбирання або ревізії теплообмінників звертають особливу увагу на наявність і якість прокладок, які гарантують герметичність з'єднань. Також перевіряється повнота комплекту знімних деталей, таких як кришки, фланці,

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<b>41</b>



затискні пристрої тощо. Важливо переконатись, що всі ці деталі мають правильне розташування та встановлені згідно з вимогами і керівництвом.

Контрольне розбирання або ревізія є важливим кроком у монтажі кожухотрубних теплообмінників, оскільки це дозволяє впевнитись у правильному зборі та належному функціонуванні апарату. Цей процес сприяє забезпеченню якості монтажу і має велике значення для безперебійної та ефективної роботи теплообмінника протягом усього терміну його експлуатації.

Для виявлення дефектів, що можуть виникнути під час розвальцьовування та обварки трубок теплообмінника, застосовуються спеціальні методи. Один з таких методів полягає в спресовуванні трубного пучка, під час якого вода подається в міжтрубний простір, після видалення розподільної камери та кришки. Цей процес дозволяє перевірити наявність дефектів та оглянути корпус теплообмінника.

Під час спресовування трубного пучка водою, фахівці звертають увагу на будь-які ознаки дефектів, такі як незаповненість розвальцьованих трубок або неправильна обварка. Це може включати нерівномірність розвальцьованого краю, недостатнє проникнення заповнювального матеріалу або появу тріщин. Якщо виявлено будь-які дефекти, вони усуваються відповідними методами, щоб забезпечити належну якість з'єднання трубок.

Цей процес перевірки і усунення дефектів є важливим етапом виробничого процесу, оскільки дефекти можуть призвести до незадовільної роботи теплообмінника, витоку теплоносія або зменшення ефективності. Тому використання методів, які дозволяють виявити та усунути дефекти, є необхідним для забезпечення надійності та ефективності роботи теплообмінника.

Горизонтальне обладнання встановлюють за допомогою одного або двох спарених кранів, які виконують функцію підйому і переміщення обладнання. Вибір способу підйому та вантажопідйомності кранів залежить від кількох факторів, таких як розмір і маса обладнання, висота і конфігурація фундаменту або постаменту, що служить опорою для обладнання, а також наявність будівельних конструкцій у непосредствений близькості.

Для важких та габаритних обладнання може використовуватись система з двома спареними кранами, що забезпечує стабільність та більш рівномірне розпо-

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<b>42</b>

ділення вантажу під час підйому та переміщення. У разі меншого обладнання або відсутності обмежень у вантажопідйомності та конфігурації фундаменту, може використовуватись один кран.

При виборі кранів враховують також наявність будівельних конструкцій, які знаходяться поруч з обладнанням. Це можуть бути стіни, стелі або інші перешкоди, які можуть обмежувати доступну висоту для підйому. В таких випадках вибирають крани з відповідною висотою підйому та маневреними можливостями, щоб забезпечити безпечне переміщення обладнання у межах обмеженого простору.

Узгоджений вибір кранів для монтажу горизонтального обладнання допомагає забезпечити ефективність, безпеку та точність процесу установки, а також зменшує ризик пошкодження обладнання або оточуючих структур під час підйому та переміщення.

Горизонтальні апарати особливо великої маси і вимагають підйому на значну висоту часто монтують за допомогою двох кранів. Використання двох кранів дозволяє забезпечити стабільність та безпеку під час підйому важких апаратів.

Монтаж горизонтальних апаратів зазвичай розпочинають з підйому апарата з вихідного горизонтального положення, при цьому апарат не відірваний від землі. Цей підхід дозволяє уникнути перевантаження кранів і мінімізує ризик пошкодження апарату під час монтажу.

На рис. 4.1 показані найбільш сприятливі умови роботи кранів під час монтажу горизонтальних апаратів. Це включає оптимальне розташування кранів, їх висоту та кут нахилу, щоб забезпечити найкращу стабільність та контроль над підйомом апарату. Розташування кранів і їх параметри визначаються з урахуванням розмірів і маси апарату, характеристик фундаменту чи постаменту, а також обмежень, що можуть бути пов'язані з довкіллям або будівельними структурами поруч.

Забезпечення сприятливих умов роботи кранів важливо для успішного монтажу горизонтальних апаратів. Це допомагає забезпечити безпеку персоналу, запобігти можливим пошкодженням апарату та забезпечити точність позиціонування під час монтажу.

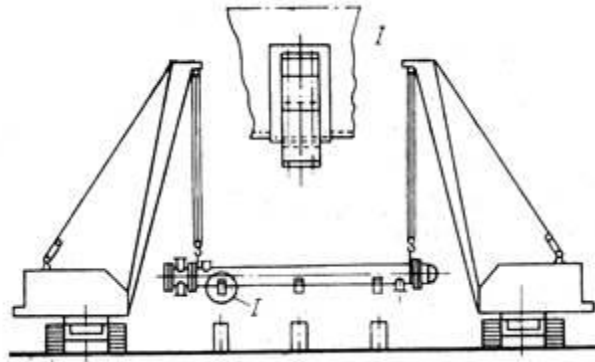


Рисунок 4.1 – Схема монтажу горизонтального теплообмінника за допомогою двох кранів

У випадках, коли неможливо встановити один з кранів зовнішньою стороною фундаментів, монтаж апаратів виконується шляхом маневрування стрілою крана. Цей метод дозволяє здійснювати підйом і переміщення апаратів без необхідності встановлення крана на зовнішній стороні фундаменту.

У випадках, коли з різних причин неможливо розташувати крани зовнішньою стороною фундаментів і пройти між фундаментами, використовують такі підходи: збільшення виліту стріли кранів або переміщення кранів з уже піднятим апаратом в межах їх вантажної характеристики.

Збільшення виліту стріли кранів дозволяє розмістити їх у відповідній позиції для підйому апарату. Це може бути досягнуто за допомогою спеціальних додаткових пристроїв або змінюванням конфігурації крана.

Переміщення кранів з піднятим апаратом у межах їх вантажної характеристики використовується в ситуаціях, коли неможливо збільшити виліт стріли кранів або встановити їх зовнішньою стороною фундаментів. Цей метод вимагає додаткових заходів безпеки та уважного контролю під час переміщення кранів разом з вантажем.

#### 4.2 Ремонт апарата [16]

Теплообмінники з трубною системою відрізняються підвищеною надійністю, що дозволяє їм безперебійно функціонувати протягом тривалого періоду. Проте, важливо пам'ятати, що регулярне планове технічне обслуговування є не-

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						<b>44</b>
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		

обхідним для запобігання виникненню поломок. З часом, циркулюючий теплоносіє може забруднювати стінки трубок, утворюючи на них відкладення і перешкоджаючи нормальному потоку. Щоб уникнути преждечасного виходу обладнання з ладу і зберегти його ефективність, необхідно регулярно чистити трубки. Систематичне промивання дозволяє тривалий час зберігати робочі параметри в нормальному стані. У більшості випадків, ремонт кожухотрубних теплообмінників потрібний лише при значному зношенні обладнання.

### **1. Виривання трубок із трубних решіток.**

Виривання трубок з трубних решіток теплообмінника є серйозною поломкою, яка може виникнути у деяких випадках. Ця поломка характеризується відкриттям або вириванням трубок з їхніх місць закріплення у решітках. Внаслідок цього може відбутись порушення герметичності системи і витік теплоносія або інших робочих речовин.

Причинами виривання трубок можуть бути механічні навантаження, наприклад, удари, вібрація або великі тискові навантаження. Також, недостатня міцність закріплення трубок у решітках, відпускання з'єднань або корозія можуть сприяти виникненню цієї поломки.

Виривання трубок є серйозним випадком, оскільки може призвести до зупинки роботи теплообмінника, втрати ефективності його роботи і потреби у ремонті. Швидке виявлення і вирішення проблеми виривання трубок є важливим для підтримання безперебійної роботи теплообмінного обладнання.

### **2. Корозія теплообмінних трубок.**

Корозія теплообмінних трубок є поширеною поломкою, яка може виникати внаслідок хімічної реакції між матеріалом трубок і оточуючим середовищем. Ця поломка характеризується зниженням міцності та товщини стінок трубок, що може призвести до їх прориву або протікання.

Корозія теплообмінних трубок може бути спричинена різними факторами, такими як хімічні реакції з агресивними речовинами, електрохімічні процеси, вплив вологості, температурний стрес та інші. В результаті цих процесів утворю-

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<b>45</b>

ються корозійні плями, відлущення матеріалу та формування отворів на поверхні трубок.

Характеристика поломки від корозії теплообмінних трубок включає зниження ефективності теплообміну, витік теплоносія або інших робочих речовин, зниження тискостійкості та загрозу безпеки експлуатації. Крім того, корозія може призвести до забруднення трубок та утворення відкладень, що зменшує пропускну здатність теплообмінника і підвищує його опір.

Вчасне виявлення і запобігання корозії теплообмінних трубок є важливими завданнями для забезпечення тривалої та безперебійної роботи системи теплообміну. Регулярне контрольне обстеження, застосування захисних покриттів, а також правильний вибір матеріалів трубок можуть допомогти у запобіганні корозії та збереженні надійності теплообмінника.

### **3. Корозія корпусу чи розподільної камери.**

Корозія корпусу або розподільної камери теплообмінника є серйозною поломкою, яка може виникати внаслідок хімічних реакцій між матеріалом корпусу або розподільної камери і навколишнім середовищем. Це може бути в результаті взаємодії з агресивними речовинами, електрохімічних процесів, впливу вологості, температурного стресу та інших факторів.

Характеристика поломки від корозії корпусу або розподільної камери теплообмінника включає зниження міцності та інтегритету конструкції, появу корозійних плям, відлущення та прогризання матеріалу, а також можливість протікання теплоносія чи інших робочих речовин. Крім того, корозія може призвести до зниження ефективності теплообміну та загрози безпеки експлуатації.

Запобігання корозії корпусу або розподільної камери теплообмінника є важливим завданням для забезпечення тривалої та надійної роботи системи теплообміну. Це можна досягти шляхом використання відповідних матеріалів, які мають високу стійкість до корозії, застосування захисних покриттів, регулярного контролю стану поверхні та вчасного проведення профілактичного обслуговування та очищення.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>46</b>

Врахування впливу корозії при проектуванні та експлуатації теплообмінника допоможе підтримувати його ефективність, тривалу роботу та забезпечити безпеку процесу.

#### **4. Засмічення трубок та міжтрубного простору.**

Засмічення трубок або міжтрубного простору теплообмінника є поширеною проблемою, яка впливає на його ефективність та надійність. Засмічення може виникати внаслідок накопичення відкладень, бруду, іржі, відмерлих організмів, маслянистих речовин, накипу, солей та інших забруднень у трубках або міжтрубному просторі.

Характеристика поломки від засмічення трубок чи міжтрубного простору теплообмінника включає зниження пропускної здатності, підвищений опір теплопередачі, збільшення теплового опору, погіршення робочих параметрів теплообміну, збільшення енергоспоживання та можливість перегріву обладнання. В результаті може виникнути зменшення продуктивності системи теплообміну, погіршення якості обробки теплоносія та вплив на загальну ефективність системи.

Запобігання засміченню трубок чи міжтрубного простору теплообмінника включає регулярне обслуговування, промивання, очищення та догляд. Це можна досягти шляхом використання фільтрів, водоочистних систем, регулярного контролю та очищення трубок, використання відповідних хімічних препаратів для розчинення накипу та забруднень, а також підтримки оптимальних умов експлуатації.

Правильне управління та попередження засмічення трубок та міжтрубного простору теплообмінника є важливими для забезпечення тривалої та ефективної роботи системи теплообміну.

#### **5. Покриття вапном (накипом) чи іншими відкладеннями.**

Утворення вапняного накипу чи інших відкладень на поверхнях теплообмінника є поширеною проблемою, яка може негативно впливати на його функціонування. Накип часто утворюється в результаті накопичення вапняних солей, оса-

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<b>47</b>

дів твердих частинок, мінеральних речовин або інших розчинних забруднень у системі теплоносія.

Характеристика поломки від утворення вапняного накипу чи інших відкладень на поверхнях теплообмінника включає зменшення пропускної здатності, зниження ефективності теплопередачі, збільшення теплового опору та підвищення енергоспоживання. Накип може обмежувати потік теплоносія та призводити до перегріву, а також сприяти корозії поверхонь теплообмінника.

Запобігання утворенню вапняного накипу чи інших відкладень на поверхнях теплообмінника включає регулярне обслуговування, промивання, догляд та використання відповідних методів та хімічних розчинників. Це може включати використання водоочисних систем, додавання інгібіторів накипоутворення, регулярне промивання теплообмінника та очищення поверхонь від відкладень.

Ефективне керування та попередження утворення вапняного накипу чи інших відкладень на поверхнях теплообмінника допоможе забезпечити нормальну роботу системи теплообміну, зберегти його продуктивність та знизити загальні витрати енергії на проведення процесу.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		<b>48</b>

## 5 Охорона праці

### Небезпечні зони устаткування.

#### Класифікація та призначення засобів захисту [17]

Небезпечні зони устаткування включають регіони або місця, де можуть виникати потенційно небезпечні умови або події, які можуть загрожувати безпеці персоналу, обладнанню або навколишньому середовищу. Такі зони визначаються на основі ризику вибуху, пожежі або інших небезпечних процесів, які можуть відбуватись в установках або приміщеннях.

Небезпечні зони устаткування можуть бути класифіковані відповідно до стандартів безпеки, таких як директива АТЕХ (Atmosphères Explosibles), яка визначає зони ризику вибуху. Основні небезпечні зони, які можуть існувати в установках, включають:

Зона 0: Регіон, де небезпечна суміш повітря та горючих речовин (газів, парів або туману) постійно присутня в достатній концентрації.

Зона 1: Регіон, де небезпечна суміш повітря та горючих речовин може виникати в нормальних умовах експлуатації.

Зона 2: Регіон, де небезпечна суміш повітря та горючих речовин може виникати лише при відхиленнях від нормальних умов експлуатації, наприклад, при аварійних ситуаціях або несправностях.

Крім того, існують також небезпечні зони, пов'язані з пожежними ризиками, хімічними речовинами або іншими потенційно небезпечними факторами, які вимагають виконання певних безпечних процедур, встановлення спеціального обладнання та дотримання відповідних заходів безпеки.

Небезпечні зони роботи устаткування визначаються залежно від різних факторів, таких як тип ризику, рівень безпеки, хімічні речовини, електричні параметри та інші фактори. Основні типи небезпечних зон роботи устаткування включають:

1. Вибухонебезпечні зони: Це зони, де може відбутись вибух внаслідок змішування запальних речовин (газів, парів або пилу) з повітрям у наси-

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>49</b>



ченій концентрації. Вибухонебезпечні зони можуть виникати в результаті присутності запальних речовин, відкритого вогню, електричних розрядів або іскор.

2. Хімічно небезпечні зони: Це зони, де присутні хімічні речовини або процеси, які можуть викликати токсичні, корозійні, іритуючі або інші негативні ефекти на здоров'я людей. Ці зони можуть бути пов'язані зі зберіганням, обробкою або виробництвом небезпечних хімічних речовин.
3. Електрично небезпечні зони: Це зони, де існує ризик електричного удару або виникнення пожежі внаслідок несправностей, неправильного підключення або неналежного використання електричного устаткування. Ці зони можуть бути пов'язані з присутністю електричних проводів, розподільних щитів або електричних приладів.
4. Механічно небезпечні зони: Це зони, де існує ризик поранення або травмування внаслідок контакту з рухомими частинами, небезпечними механізмами або обладнанням.
5. Термічно небезпечні зони: Це зони, де може виникнути небезпека опіків або перегріву через високу температуру устаткування, процесів нагріву або недостатньої вентиляції. Такі зони можуть бути пов'язані з печами, котлами, плавильними печами та іншими джерелами тепла.
6. Акустично небезпечні зони: Це зони, де рівень шуму перевищує припустимі норми і може призвести до пошкодження слуху або інших негативних впливів на здоров'я. Такі зони можуть бути пов'язані з роботою гучних машин, компресорів, турбін, насосів тощо.
7. Вібраційно небезпечні зони: Це зони, де вібрація устаткування може спричинити негативний вплив на здоров'я операторів або призвести до пошкодження обладнання. Вібраційно небезпечні зони можуть бути пов'язані з великими машинами, дзеркальними полірувальними машинами, компресорами та іншими джерелами вібрації.
8. Радіаційно небезпечні зони: Це зони, де присутня радіація, яка може мати шкідливий вплив на здоров'я людей або навколишнє середовище. Такі

зони можуть бути пов'язані з ядерними установками, радіоактивними матеріалами або медичними пристроями, що випромінюють.

Ці небезпечні зони вимагають відповідних заходів безпеки, які включають у себе правильне навчання персоналу, встановлення захисного обладнання та дотримання протоколів безпеки.

Засоби захисту відносяться до спеціальних засобів, які використовуються для запобігання небезпеці, зниження ризику та забезпечення безпеки людей, обладнання та навколишнього середовища. Засоби захисту можуть бути класифіковані залежно від їх призначення та застосування. Основні типи засобів захисту включають:

1. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ): Це засоби, призначені для захисту окремих осіб від небезпеки або шкідливих факторів. Це можуть бути рукавиці, маски, шоломи, захисні окуляри, навушники, респіратори, захисний одяг та взуття. ЗІЗ використовуються для захисту працівників від механічних, хімічних, біологічних, термічних та інших небезпек на робочому місці.
2. Засоби колективного захисту: Це засоби, які застосовуються для захисту групи людей або всієї робочої зони від певних небезпек. Наприклад, це можуть бути системи вентиляції для зниження концентрації шкідливих речовин у повітрі, системи пожежної безпеки, які автоматично виявляють та гасять пожежі, або системи контролю рівня радіації.
3. Засоби технологічного захисту: Це засоби, які використовуються для запобігання небезпечним ситуаціям або зниження ризику під час роботи з устаткуванням або процесами. Наприклад, це можуть бути системи автоматичного відключення, які активуються при виявленні небезпеки або несправності, системи контролю тиску, температури та інших параметрів.
4. Засоби захисту від електричних ризиків: Це засоби, які застосовуються для захисту від електричного удару, короткого замикання або інших електричних небезпек. Це можуть бути ізоляційні рукавиці, діелектричні

килимки, захисні шторки або пристрої для вимикання електричного живлення.

5. Засоби пожежної безпеки: Це засоби, які використовуються для запобігання пожежам, виявлення і сигналізації про пожежу та її локалізації. Це можуть бути пожежні тривоги, пожежні вогнегасники, системи автоматичного спінення пожеж, протипожежні системи вентиляції тощо.
6. Засоби захисту від вибуху: Це засоби, які використовуються для запобігання вибухам або зниження їх наслідків. Це можуть бути вибухозахисні контейнери, герметичні камери, системи видалення запальних речовин або спеціальні конструкції, що витримують вибуховий тиск.
7. Засоби захисту від радіації: Це засоби, які використовуються для захисту від радіаційного випромінювання. Це можуть бути протирадіаційні костюми, екрануючі перегородки, дозиметри, що вимірюють рівень радіації, та системи вентиляції для контролю радіаційного забруднення.

Це лише декілька прикладів засобів захисту, які застосовуються для забезпечення безпеки на робочому місці. Вибір конкретного засобу захисту залежить від виду небезпеки, ризику та вимог безпеки.

## Список літератури

1. Кожухотрубний теплообмінник [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://studwood.net/2138930/tovarovedenie/vvedenie>
2. Сучасні конструкції теплообмінного обладнання [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://dl.sumdu.edu.ua/textbooks/22852/266093/index.html>
3. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 32 с.
4. Маньковский О. Н. Теплообменная аппаратура химических производств: Инженерные методы расчета / О. Н. Маньковский, А. Р. Толчинский, М. В. Александров. – Ленинград : Химия, 1976. – 368 с.
5. Методичні вказівки та контрольні завдання для самостійної роботи з дисципліни «Процеси та апарати хімічних виробництв (частина 1)» / укладачі: Я.Е. Михайловський, М.П. Юхименко. – Суми: Вид-во СумДУ, 2010. – 61 с.
6. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1972. – 494 с.
7. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 752 с.
8. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : Учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с.
9. Лашинский А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.
10. Лашинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник / А. А. Лашинский. – Л. : Машиностроение, 1981. – 382 с.
11. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Под ред. Дытнерского Ю. И. – М. : Химия, 1983. – 272 с.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>53</b>

12. Врагов А. П. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв: Навчальний посібник / А. П. Врагов, Я. Е. Михайловський, С. І. Якушко. – За ред. А. П. Врагова. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 170 с.

13. Дячек П.И. Холодильные машины и установки: Учебное пособие / П.И. Дячек. – Ростов на Дону : Феникс, 2007. – 424 с.

14. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / Под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л. : Машиностроение, 1982. – 384 с.

15. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : Учеб. пособие для студентов вузов / М. Ф. Михалев, Н. П. Третьяков, А. И. Мильченко [и др.]. – Под общ. ред. Михалева М. Ф. – Л. : Машиностроение, 1984. – 301 с.

16. Фарамазов С. А. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефтеперерабатывающих заводов / С. А. Фарамазов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1980. – 312 с.

17. Рогач І.М. Охорона праці в лікувально-профілактичних та санаторних закладах : Навчально-методичний посібник / І.М. Рогач, Р.І. Шніцер, С.П. Козодаєв. – Ужгород : Ужгородський національний університет, 2011. – 38 с.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Изм.	Лист	№ докум.	Подпись	Дата		<b>54</b>