

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 кожухотрубний теплообмінник з паровим простором для випаровування етанолу

Виконав:  
студент групи ХМдн-74р  
Даценко Євгеній Віталійович

\_\_\_\_\_   
підпис

Залікова книжка

№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота бакалавра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Яхненко Сергій Михайлович

\_\_\_\_\_   
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 ХМдн-74р Семестр 8

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

Студенту Даценку Євгенію Віталійовичу

1 Тема роботи: Ректифікаційна установка. Розробити кожухотрубний теплообмінник з паровим простором для випаровування етанолу

2 Вихідні дані: Розробити кожухотрубний випарник з паровим простором продуктивністю 33,6 т/добу (за етанолом). Тиск у міжтрубному просторі апарату 1,3 ат. По трубному просторі рухається гарячий теплоносій (насичена водяна пара) під тиском 1,5 ат.

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

1. Технологічна схема ректифікаційної установки – 1,0 арк.
2. Складальне креслення кожухотрубного випарника – 1,0 арк.
3. Складальне креслення трубного пучка – 1,0 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.; 2. Основні залежності та приклади розрахунків теплообмінних апаратів : навчальний посібник / укладачі: Л. Г. Воронін, А. Р. Степанюк, Л. І. Ружинська. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011 – 68 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 2020 р.

Керівник

\_\_\_\_\_

підпис

доц. Яхненко С.М.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 44 с., 9 рис., 1 додаток, 21 джерело.

Графічні матеріали: технологічна схема ректифікаційної установки, складальне креслення кожухотрубного випарника, складальне креслення трубного пучка – усього 3 аркуші формату А1.

Тема кваліфікаційної роботи «Ректифікаційна установка. Розробити кожухотрубний теплообмінник з паровим простором для випаровування етанолу».

У роботі наведено теоретичні основи та особливості процесу теплообміну у виробництві етанолу, виконані технологічні розрахунки апарата, визначені його габаритні розміри, гідравлічний опір, обґрунтований вибір матеріалу для виготовлення апарата, розраховане і вибране допоміжне обладнання. Розрахунками на міцність і герметичність показана надійність роботи спроектованого апарата. Окремим розділом представлені організація монтажних і ремонтних робіт проектованого теплообмінника. У розділі «Охорона праці» розглянуті метеорологічні умови у виробничих приміщеннях, а також нормування параметрів мікроклімату.

Ключові слова: УСТАНОВКА, ЕТАНОЛ, КОЖУХОТРУБНИЙ ВИПАРНИК, ПАРОВИЙ ПРОСТІР, МОНТАЖ, РЕМОНТ, МІКРОКЛІМАТ, ПРИМІЩЕННЯ.

## Зміст

	С.
Вступ	5
1 Технологічна частина	6
1.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки	6
1.2 Теоретичні основи процесу	8
1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструкційних матеріалів	13
2 Технологічні розрахунки процесу і апарата	15
2.1 Технологічні розрахунки	15
2.2 Конструктивні розрахунки	18
2.3 Гідравлічний опір апарата	20
2.4 Вибір допоміжного обладнання	21
3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність	26
3.1 Розрахунок товщини стінки обичайки апарата	26
3.2 Розрахунок товщини стінки кришки апарата	29
3.3 Розрахунок опори апарата	29
4 Монтаж та ремонт апарата	33
4.1 Монтаж розробленого апарата	33
4.2 Ремонт апарата	34
5 Охорона праці	38
Список використаних джерел	43
Додаток – Специфікації до креслеників	

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>		
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.	Даценко				Лім.	Лист	Листів
Перевір.	Яхненко				4	44	
Реценз.					<b>СумДУ, ХМдн-74р</b>		
Н. Контр.							
Затверд.	Склабінський						
<b>Кожухотрубний теплообмінник</b>							
Пояснювальна записка							

## Вступ

Теплообмінними апаратами, або теплообмінниками, називаються пристрої для передачі тепла від одних середовищ (гарячих теплоносіїв) до інших (холодних теплоносіїв). Теплообмінні апарати застосовуються для нагрівання і охолодження речовин у різних агрегатних станах, випаровування рідин і конденсації пари, перегонки і сублімації, абсорбції та адсорбції, розплавлення твердих тіл і кристалізації, відведення і підведення тепла при проведенні екзо- та ендотермічних реакцій і т. д. Відповідно до свого призначення теплообмінні апарати називають підігрівниками, холодильниками, випарниками, конденсаторами, дистиляторами, субліматорами, плавильниками тощо [1].

У хімічних виробництвах до 70 % теплообмінних апаратів застосовують для середовищ рідина – рідина та пара – рідина при тиску до 1 МПа і температурі до 200°C. Для зазначених умов розроблені і серійно виготовляються теплообмінні апарати загального призначення кожухотрубного та спірального типів [1].

У даному кваліфікаційному проекті розглядається та проектується один із таких теплообмінних апаратів – кожухотрубний випарник. Це теплообмінний апарат, в якому холодоагент кипить за рахунок теплоти, що віднімається у гарячого теплоносія.

Технологічне призначення теплообмінників різноманітне. Зазвичай, розрізняються власне теплообмінники, в яких передача тепла є основним процесом, і реактори, в яких тепловий процес відіграє допоміжну роль.

Теплообмінники-випарники кожухотрубного типу застосовують у холодильних установках для випаровування низькокиплячих холодоагентів при охолодженні нагрітих робочих середовищ до низьких температур, а також у ректифікаційних та десорбційних установках у якості парогенеруючого обладнання для обігріву нижньої частини колони потоками пари киплячого компонента [2].

У даному проекті представлено розрахунок кожухотрубного випарника з паровим простором, який входить до складу ректифікаційної установки. Загалом кваліфікаційну роботу виконано у відповідності до методичних вказівок [3] із представленням усіх регламентованих розділів.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<b>5</b>

# 1 Технологічна частина

## 1.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки

Отримуваний етиловий спирт за своїм складом умовно поділяють на чотири класи [4]:

1. Промисловий етанол (96,5 % об.) – продукт для промислового й технічного використання: як розчинник, паливо тощо. Для запобігання його вживанню зазвичай до нього додають речовини із неприємним запахом, наприклад, піридин у кількості 0,5–1% (проводять денатурацію). Також для легшого визначення йому можуть надавати слабкого забарвлення метиловим фіолетовим;

2. Денатурований спирт – технічний продукт із концентрацією етанолу 88 % об., що має значну кількість домішок. Він денатурується і забарвлюється відповідним чином. Використовується в освітленні та обігріві;

3. Якісний алкоголь (96,0–96,5 % об.) – очищений етанол, що застосовується для потреб фармацевтики, у виготовленні косметичних засобів та для харчового споживання;

4. Абсолютний етанол (99,7–99,8 % об.) – надзвичайно чистий етанол, що застосовується у фармацевтиці, виготовленні аерозолів.

В Україні марки отримуваного ректифікованого етанолу регламентуються стандартом ДСТУ 4221:2003 «Спирт етиловий ректифікований». В залежності від ступеня очистки виділяється чотири сорти: «Пшенична сльоза», «Люкс», «Екстра» та «Вищої очистки» [1].

Ректифікаційна установка являє собою комплекс машин і апаратів, використовуваних для розділення двох- і більше компонентних речовин на окремі компоненти або їх групи (фракції). Технологічна схема ректифікаційної установки у виробництві етилового спирту представлена на рис. 1.

Принцип роботи даної установки полягає у наступному. Вихідна бікомпонентна суміш із проміжної ємності  $E_1$  надходить на розподільник  $P_1$ . У результаті цього ми отримуємо дві паралельні гілки потоків, що працюють за одним принципом.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						<b>6</b>
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

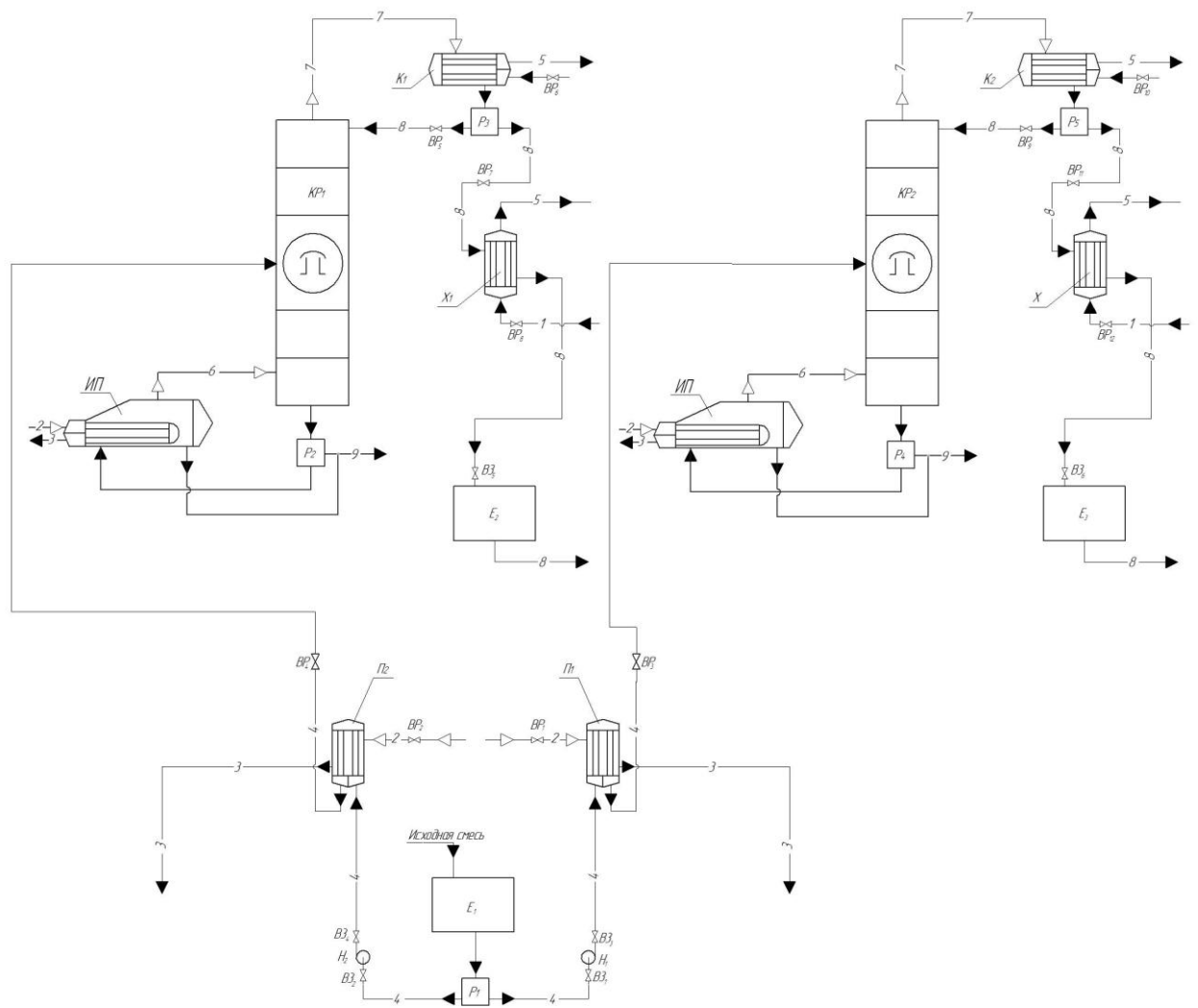


Рисунок 1 – Технологічна схема виробництва етилового спирту (етанолу)

Далі за допомогою насосів  $H_1$  і  $H_2$  суміш подається в теплообмінники-підігрівачі  $\Pi_1$  і  $\Pi_2$  відповідно, де нагрівається до температури кипіння зустрічним потоком гріючої пари, яка конденсується в міжтрубному просторі апарату.

Після таких процедур, уже нагріта суміш, надходить на тарілку живлення ректифікаційної колони. Колона складається із верхньої (зміцнюючої) і нижньої (вичерпної) частин. На тарілці живлення склад рідини відповідає складу вихідної суміші. У результаті розділення суміші з нижньої частини колони відводиться кубовий залишок (етанол), який спрямовується до споживача. Частина кубового залишку спрямовується у випарник типу ВП з паровим простором, де за рахунок тепла насиченої водяної пари відбувається вскипання кубової рідини і утворення парів ВКК. Останній повертається в колону, під її нижню тарілку, у якості парового зрошення.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						7
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Таким чином, у нижній частині ректифікаційної колони відбувається процес відгону (вичерпання) ВКК зі стікаючої донизу вихідної суміші.

У верхній частині колони відбувається процес збагачення (зміцнення) пари НКК за рахунок багатоступеневого контактування на масообмінних тарілках зі стікаючою зверху униз флегмою. Пари, що відводяться з верхньої частини колони, надходять в теплообмінник-конденсатор, де конденсуються у міжтрубному просторі апарату за рахунок відведення тепла холодоагенту, що рухається у трубному просторі. Частина отриманого конденсату відбирається і у вигляді флегми повертається в колону на зрошення її верхньої частини. Дистиллят додатково охолоджується в холодильнику і спрямовується до відповідного збірника у якості готового продукту із високою концентрацією НКК.

## 1.2 Теоретичні основи процесу

Теоретичні основи процесу теплообміну, які представлені у даному підрозділі, виконано на підставі аналізу літературних джерел [5–9].

У випарниках основним завданням процесу є випаровування робочого середовища (холодного теплоносія) і переведення його з рідкого стану в паровий (або газовий) стан за рахунок передачі тепла від гарячого теплоносія до холодного, що кипить та випаровується.

У випарниках-конденсаторах по обидві сторони поверхні теплопередачі теплоносії змінюють свій агрегатний стан – у той час як гарячий теплоносії віддає тепло та конденсується, холодний теплоносії, по іншу сторону поверхні, нагрівається та випаровується.

У залежності від агрегатного стану теплоносіїв розрізняють такі теплообмінні апарати:

- без зміни агрегатного стану обох теплоносіїв (газо-газові, газо-рідинні, рідинно-рідинні холодильники та підігрівачі);
- зі зміною агрегатного стану одного з теплоносіїв (підігрівник-випарник, конденсатор-підігрівник, холодильник-конденсатор тощо);
- зі зміною агрегатного стану обох теплоносіїв (конденсатор-випарник).

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<b>8</b>



За способом утворення теплообмінної поверхні розрізняють:

- апарати, що виготовлені із труб (трубні, кожухотрубні, змійовикові, кручені та ін.);
- теплообмінні апарати, що виготовлені з листового прокату (пластинчасті, спіральні, ламельні та ін.).

За орієнтацією теплообмінної поверхні розрізняють:

- вертикальні (В);
- горизонтальні (Г);
- похилі (П).

За способом компенсації температурних подовжень теплообмінні апарати бувають:

- без компенсації – жорсткої конструкції;
- з компенсацією пружним елементом – напівжорсткої конструкції;
- з компенсацією в результаті вільних подовжень – нежорсткої конструкції.

Наявність конструктивних пристроїв для компенсації температурних подовжень відбито в умовних позначеннях типу теплообмінника такими індексами:

- ВУ – випарник з U-подібними трубками;
- ТН – теплообмінник з нерухомими трубними дошками;
- ТП – теплообмінник із плаваючою голівкою;
- ХК – холодильник з температурним компенсатором на корпусі.

Окремі види теплообмінників мають додаткові класифікаційні ознаки.

Вибір теплообмінника здійснюється за площею поверхні теплопередачі, яка розраховується за формулою:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{CP}}, \quad (1)$$

де  $Q$  – тепловий потік в апараті, Вт;

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

$\Delta t_{CP}$  – середня різниця температур між теплоносіями, °С.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						<b>9</b>
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Коефіцієнт теплопередачі для плоскої стінки або при великому радіусі її кривизни ( $d_B / d_H > 0,5$ ) складе:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{CT}}{\lambda_{CT}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (2)$$

де  $\alpha_1$  і  $\alpha_2$  – коефіцієнти тепловіддачі теплоносіїв, Вт/(м<sup>2</sup>·К);

$\delta_{CT}$  – товщина стінки теплопередаючої поверхні, м;

$\lambda_{CT}$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу стінки, Вт/(м·К).

Середня різниця температур при прямотоці або протитоці теплоносіїв дорівнює:

$$\Delta t_{CP} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}}, \quad (3)$$

де  $\Delta t_B$  і  $\Delta t_M$  – різниці температур (великої й малої) теплоносіїв на кінцях теплообмінника.

Середня температура теплоносія, за якою визначаються його теплофізичні властивості, знаходиться двома способами. Для теплоносіїв, температури яких змінюються від початкової  $t_1$  до кінцевої  $t_2$  і  $t_2 / t_1 < 2$ , приймають середньоарифметичну температуру  $t_{CP} = (t_1 + t_2) / 2$ .

Для теплоносія, у якого  $t_2 / t_1 > 2$  середню температуру розраховують за формулою:

$$t_{CP} = \theta_{CP} \pm \Delta t_{CP}. \quad (4)$$

Основні критерії подібності, які застосовуються у розрахунках процесів конвективного теплообміну при вимушеному русі теплоносіїв, наведені нижче [9].

Критерій Нуссельта характеризує теплообмін між теплоносієм і стінкою

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}; \quad (5)$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		10

Критерій Рейнольдса характеризує гідродинамічний режим руху теплоносія

$$Re = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu}; \quad (6)$$

Критерій Прандтля характеризує теплофізичні властивості теплоносія

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}; \quad (7)$$

Критерій Грасгофа характеризує режим руху теплоносія при вільній конвекції

$$Gr = \frac{l^3 \cdot g \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot \Delta\theta}{\mu^2}. \quad (8)$$

У рівняннях (5) – (8) такі 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;

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

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

Під час вимушеної конвекції теплоносії рухаються уздовж поверхні теплообміну з певною швидкістю під дією зовнішньої сили, наприклад, сили тяжіння або сили тиску, що розвивається насосом, компресором або вентилятором.

Критерії  $Re$ ,  $Pr$  і  $Gr$  є визначеними, а критерій  $Nu$  – невизначеним (тобто залежить від інших критеріїв подібності).

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		<b>11</b>

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі при течії рідини в прямих трубах рекомендуються [9] наступні критеріальні рівняння:

$$- \text{ для ламінарного режиму } \quad Nu_2 = 0,74 \cdot (Re_2 \cdot Pr_2)^{0,2} \cdot (Gr_2 \cdot Pr_2)^{0,1}; \quad (9)$$

$$- \text{ для перехідного режиму } \quad Nu_2 = 0,008 \cdot Re_2^{0,9} \cdot Pr_2^{0,43}; \quad (10)$$

$$- \text{ для турбулентного режиму } \quad Nu_2 = 0,023 \cdot Re_2^{0,8} \cdot Pr_2^{0,4}. \quad (11)$$

У рівняннях (9) – (11) визначальним лінійним розміром є внутрішній діаметр труб  $d_{вн}$ , а визначальною температурою є середня температура гарячого теплоносія  $t_2$ .

Рівняння тепловіддачі при кипінні рідин істотно розрізняються в залежності від виду термомеханічного режиму цього енергоємного гетерогенного процесу, що супроводжується фазовим перетворенням. У цьому випадку коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha$  можна виразити без прямого звернення до методів статистики через узагальнений критерій Нуссельта  $Nu^*$  і за допомогою модифікованого критерію Рейнольдса  $Re^*$  і критерію Прандтля  $Pr$  [5]:

$$Nu^* = C \cdot Re^{*n_1} \cdot Pr^{n_2}, \quad (12)$$

де  $C, n_1, n_2$  – постійні.

Також в умовах як вільного, так і вимушеного руху теплоносія можна використовувати перетворене рівняння (12), якому надають спрощений вигляд – більш зручний для визначення усередненого значення коефіцієнта тепловіддачі  $\alpha$  через рушійну силу процесу  $\Delta T_{кин}$  [5]:

$$\alpha = b^3 \cdot \frac{\lambda^2 \cdot (\Delta T_{кин})^2}{\nu \cdot \sigma \cdot |T_{кин}|}. \quad (13)$$

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата

У рівнянні (13) усі позначення відповідають позначенням рівнянь (5) – (8), а  $\sigma$  – коефіцієнт поверхневого натягу, [Н/м].

Чисельне значення безрозмірною функції  $b$ , визначаємо з рівняння [5]:

$$b = 0,75 + 7,5 \cdot \left( \frac{\rho_{II}}{\rho_P - \rho_{II}} \right)^{2/3}, \quad (14)$$

де  $\rho_P, \rho_{II}$  – відповідно густини рідини і пари, кг/м<sup>3</sup>.

### 1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструкційних матеріалів

Загальний вигляд проєктованого апарату (випарник з паровим простором типу ВП) представлений на рис. 2.

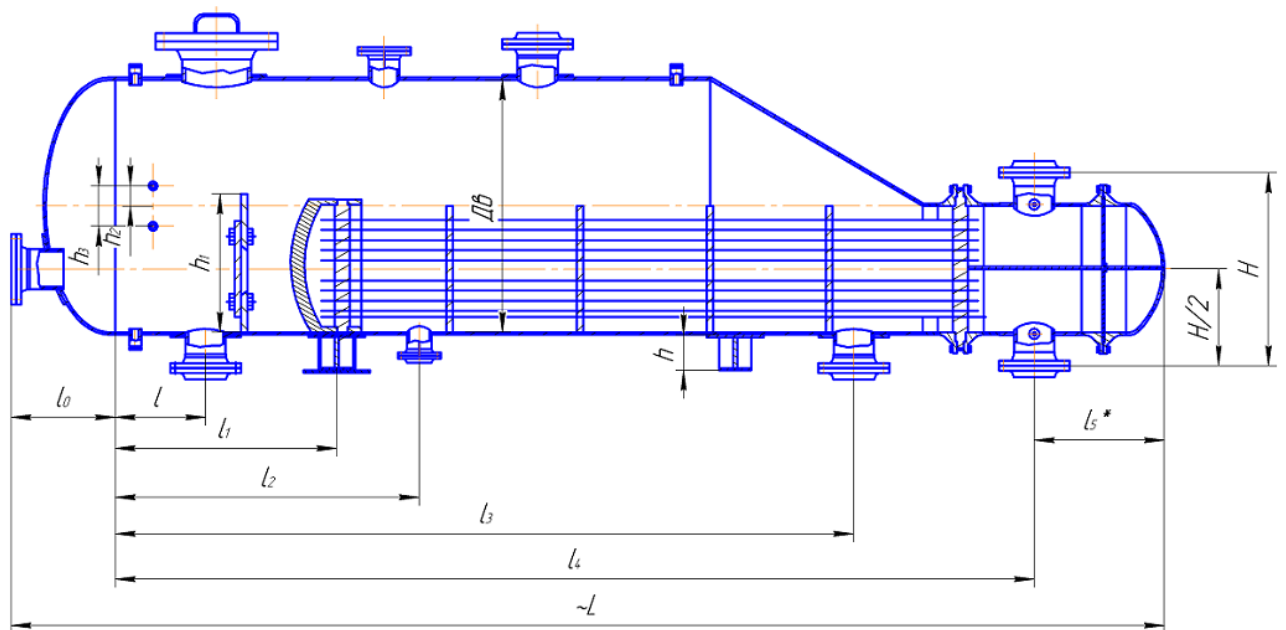


Рисунок 2 – Схема випарника з паровим простором типу ВП

Принцип роботи випарника полягає в наступному. Через патрубок при температурі кипіння під абсолютним тиском 0,13 МПа у міжтрубний простір випарника подається холодний теплоносій – етанол. При цьому в розподільну камеру випарника надходить гарячий теплоносій – насичена водяна пара, яка при тиску 0,15 МПа має температуру 111,7 °С. За допомогою теплопередачі через сталеву стінку теплообмінних труб відбувається активне випаровування етанолу.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		<b>13</b>

Утворені в результаті випаровування пари етанолу залишають апарат через верхній штуцер. Рівень рідини у випарнику підтримується за допомогою переливної планки. Рідина, яка перевищила встановлений планкою рівень, виводиться за межі апарату за допомогою зливного патрубку. Для монтажних і ремонтних робіт в апараті передбачені люк і спеціальний монтажний патрубок.

Вибір конструктивних матеріалів для виготовлення апарату проводився на підставі [10–12]. Вибір матеріалу диктується в основному його корозійною стійкістю і теплопровідністю, причому конструкція теплообмінного апарату істотно залежить від властивостей вибраного матеріалу.

Матеріали для виготовлення кожухотрубного випарника з паровим простором вибираємо відповідно до специфіки його експлуатації, при цьому враховуємо можливу зміну вихідних фізико-хімічних властивостей матеріалів під впливом робочого середовища, температури і хіміко-технологічного процесу, що протікає.

Також слід враховувати: механічні властивості матеріалу – межа міцності, відносне подовження, твердість тощо; технологічність виготовлення (особливо зварюваність); хімічну стійкість проти роз’їдання; теплопровідність.

Вибір конструктивного матеріалу робимо, виходячи із його низької вартості і не дефіцитності, але щоб можна було забезпечити ефективну технологічність виготовлення.

Таким чином, на підставі вищезазначеного, для виготовлення корпусу, фланців, розподільних камер, а також деталей, які працюють під тиском раціонально використовувати сталь 09Г2С.

Для виготовлення теплообмінних труб, штуцерів, крипінних деталей (болти, гайки, шпильки), панелей, кронштейнів, ребер жорсткості і т. ін. використовуємо сталь 20.

Для виготовлення неметалевих прокладок для ущільнення роз’ємів фланцевих з’єднань апарату використовуємо пароніт – листовий прокладковий матеріал, що виготовляється пресуванням азбокаучукової маси, яка складається із азбесту, каучуку і порошкових інгредієнтів.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		<b>14</b>

## 2 Технологічні розрахунки процесу і апарата

### 2.1 Технологічні розрахунки

Технологічний розрахунок починається із визначення основних теплофізичних властивостей теплоносіїв, а саме: щільності, динамічної в'язкості, теплоємності і теплопровідності [5–7].

Згідно вихідних даних, етанол надходить у випарник вже у киплячому стані (температура кипіння при абсолютному тиску 0,13 МПа становить 83,8 °С [14]).

Тому теплове навантаження випарника у нашому випадку буде становити:

$$Q = Q_{исп} = G_x \cdot r_x, \quad (15)$$

де  $r_x$  – питома теплота пароутворення етанолу,  $r_x = 843,8 \cdot 10^3$  Дж/кг [14].

$$Q = Q_{исп} = \frac{1400}{3600} \cdot 843,8 = 328 \text{ (кВт)}.$$

Витрата гарячого теплоносія (водяної пари):

$$G_2 = \frac{Q}{c_2 \cdot (t_{н2} - t_{к2})}, \quad (16)$$

де  $c_2$  – теплоємність водяної пари,  $c_2 = 2,2 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К) [14];

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

Для наближених (навчальних) розрахунків орієнтовно приймають, що температура кипіння робочого тіла повинна бути на 5–10 °С нижче середньої температури охолоджуваного теплоносія [9].

Отже, за рекомендацією [9] приймаємо  $t_{к2} = 90$  °С.

$$G_2 = \frac{328}{2,2 \cdot (111,7 - 90)} = 6,87 \text{ (кг/с)}.$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		15

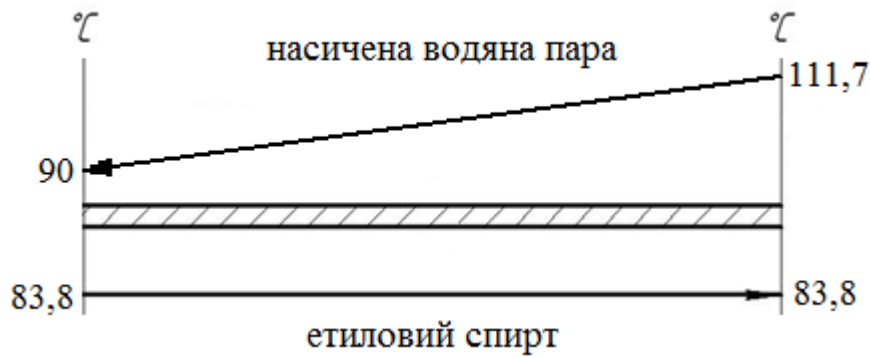


Рисунок 3 – Температурна схема процесу випаровування бензолу

Середню різницю температур визначаємо за рівнянням (3):

$$\Delta t_{cp} = \frac{21,7 - 6,2}{\ln\left(\frac{21,7}{6,2}\right)} = 12,4 \text{ } ^\circ\text{C},$$

де більша різниця температур дорівнює  $\Delta t_B = 111,7 - 90 = 21,7 \text{ } ^\circ\text{C}$ ;  
менша різниця температур дорівнює  $\Delta t_M = 90 - 83,8 = 6,2 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Попередньо, за рівнянням (1), розраховуємо поверхню теплопередачі:

$$F = \frac{328 \cdot 10^3}{450 \cdot 12,4} = 58,8 \text{ (м}^2\text{)}.$$

Вибираємо стандартизований теплообмінник з такими характеристиками:

- поверхня теплообміну  $F = 68 \text{ м}^2$ ;
- 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  $s_{mp} = 23 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ .

Фактична швидкість руху водяної пари у трубах:

$$w_2 = \frac{G_2}{\rho_2 \cdot s_{mp}}, \quad (17)$$



де  $\rho_2$  – густина водяної пари; при усередненій температурі  $\rho_2 = 0,8 \text{ кг/м}^3$ .

$$w_2 = \frac{6,87}{0,8 \cdot 23 \cdot 10^{-2}} = 37,3 \text{ (м/с)}.$$

Враховуючи, що для водяної пари динамічний коефіцієнт в'язкості дорівнює  $\mu_2 = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{с}$ , коефіцієнт теплопровідності  $\lambda_2 = 2,5 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$  і коефіцієнт об'ємного розширення теплоносія  $\beta_2 = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ 1/К}$  визначаємо критерії:

– за рівнянням (6) – критерій Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{37,3 \cdot 0,021 \cdot 0,8}{12,5 \cdot 10^{-6}} = 50180.$$

– за рівнянням (7) – критерій Прандтля:

$$\text{Pr} = \frac{12,5 \cdot 10^{-6} \cdot 2,2 \cdot 10^3}{2,5 \cdot 10^{-2}} = 1,1.$$

За чисельним значенням критерію Рейнольдса можемо встановити, що режим руху водяної пари в трубах – турбулентний. Значить, для визначення критерію Нуссельта використовуємо рівняння (11):

$$\text{Nu}_2 = 0,023 \cdot 50180^{0,8} \cdot 1,1^{0,4} = 137,6.$$

Коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_2$  визначаємо з рівняння (5):

$$\alpha_2 = \frac{137,6 \cdot 0,25}{0,021} = 1638 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Коефіцієнт тепловіддачі зі сторони етанолу  $\alpha_x$  визначаємо з рівняння (13), попередньо розрахувавши за рівнянням (14) значення безрозмірної функції  $b$ :

$$b = 0,75 + 7,5 \cdot \left( \frac{6,5}{740 - 6,5} \right)^{\frac{2}{3}} = 1,07.$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		17

Для етанолу:  $\nu_x = 0,34 \text{ м}^2/\text{с}$ ,  $\lambda_x = 0,159 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $\sigma_x = 0,017 \text{ Н}/\text{м}$ .

$$\alpha = 1,07 \cdot \frac{0,159^2 \cdot 110^2}{0,34 \cdot 0,017 \cdot 90} = 629 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Далі, за рівнянням (2), визначаємо реальний коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{1638} + \frac{0,002}{46,5} + \frac{1}{629}} = 446 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

## 2.2 Конструктивні розрахунки

Розрахункова поверхня випарника складе:

$$F_p = \frac{328 \cdot 10^3}{446 \cdot 12,4} = 59,3 (\text{м}^2).$$

Запас поверхні:

$$\Delta = \frac{F - F_p}{F} \cdot 100\% , \quad (18)$$

$$\Delta = \frac{68 - 59,3}{68} \cdot 100\% = 12,8\% .$$

Як бачимо, запас поверхні забезпечується.

Остаточо вибираємо випарник типу ГП з такими характеристиками:

- поверхня теплообміну  $F = 68 \text{ м}^2$ ;
- 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
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		<b>18</b>

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

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot V}{\pi \cdot w}} = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot w}}, \quad (19)$$

де  $V$  і  $G$  – об'ємна і масова витрати рідини/пари відповідно, м<sup>3</sup>/с і кг/с;  
 $\rho$  – густина потоку середовища, кг/м<sup>3</sup>;  
 $w$  – швидкість витікання середовища, м/с.

Рекомендовані швидкості руху теплоносіїв [9]:

– для рідини 0,1–0,5 м/с при самопливі і 0,5–2,5 м/с в напірних трубопроводах;

– для пари або газу 5–25 м/с.

Діаметр патрубку для входу рідкого етанолу в апарат:

$$d_{x.вх} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1400 / 3600}{3,14 \cdot 740 \cdot 0,7}} = 0,031 \text{ (м)}.$$

Діаметр патрубку для виходу парів етанолу:

$$d_{x.вих} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1400 / 3600}{3,14 \cdot 6,5 \cdot 8}} = 0,098 \text{ (м)}.$$

Діаметр патрубків для входу і виходу водяної пари:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4 \cdot 6,87}{3,14 \cdot 0,8 \cdot 15}} = 0,085 \text{ (м)}.$$

За отриманими значеннями приймаємо стандартні патрубки:

- для входу рідкого етанолу  $D_y = 32$  мм;
- для виходу парів етанолу  $D_y = 100$  мм;
- для входу насиченої водяної пари  $D_y = 100$  мм;
- для виходу насиченої водяної пари  $D_y = 100$  мм.

## 2.3 Гідравлічний опір апарата

Розрахунок гідравлічного опору випарника визначає кількість енергії, витраченої на рух теплоносіїв через апарат. Гідравлічний опір міжтрубного простору не визначаємо, оскільки, враховуючи невеликі швидкості теплоносія, його значення дуже маленьке [16].

Гідравлічний розрахунок проводимо у відповідності до методики, що викладена у [16].

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

$$\Delta P = \Sigma \Delta P_{TP} + \Sigma \Delta P_M + \Sigma \Delta P_y + \Sigma \Delta P_{\Gamma}, \quad (20)$$

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

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

$\Sigma \Delta P_y$  – сума втрат напору, обумовлених прискоренням потоку, Па;

$\Sigma \Delta P_{\Gamma}$  – перепад тиску для подолання стовпа рідини, Па.

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

$$\Delta P_{TP} = \lambda_{TP} \cdot \frac{L}{d_E} \cdot \frac{w_z^2 \cdot \rho_z}{2}, \quad (21)$$

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

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{\Delta}{d_E} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25}, \quad (22)$$

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.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		20

$$\lambda_{TP} = 0,11 \cdot \left( \frac{0,1}{0,021} + \frac{68}{50180} \right)^{0,25} = 0,1625;$$

$$\Delta P_{TP} = 0,1625 \cdot \frac{6}{0,021} \cdot \frac{37,3^2 \cdot 0,8}{2} = 25838 \text{ (Па)}.$$

Гідравлічні втрати тиску в місцевих опорах визначаємо за формулою:

$$\Delta P_M = \xi \cdot \frac{w_2^2 \cdot \rho_2}{2}, \quad (23)$$

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  $\xi_4 = 1,4$  [16]).

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

$$\Delta P_M = 5,9 \cdot \frac{37,3^2 \cdot 0,8}{2} = 3283 \text{ (Па)}.$$

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 ( $\Delta P_r = 0$ ), оскільки випарник не сполучається із навколишнім середовищем.

Повний напір, необхідний для руху середовищ через апарат складе:

$$\Delta P = 25838 + 3283 = 29121 \text{ (Па)}.$$

## 2.4 Вибір допоміжного обладнання

**Розрахунок і вибір збірника для вихідної суміші.** Відповідно до технологічної схеми (рис. 1), вихідна суміш, яка надходить на установку для подальшого розділення, потрапляє у збірник-сховище (поз. Е1).

За вихідними даними, витрата етанолу, що надходить у проєктований випарник, становить 1400 кг/год. Отже, приймаємо таке припущення, що

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						<b>21</b>
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

продуктивність ректифікаційної установки в цілому за вихідною сумішшю становить 10000 кг/год. Ємність для зберігання вихідної суміші розраховуємо, виходячи з 6–8 годинного резерву робочого часу і з урахуванням коефіцієнта заповнення  $\psi = 0,8 \dots 0,85$ . Приймаємо  $\psi = 0,85$ .

Розрахунковий об'єм ємності:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}, \quad (24)$$

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

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

$\rho$  – густина вихідної суміші,  $\rho = 740$  кг/м<sup>3</sup>.

$$V_{EP} = \frac{10000 \cdot 7}{0,85 \cdot 740} = 111,3 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Задаємося стандартизованим діаметром ємності  $D = 3,6$  м, тоді її висота складе:

$$H = \frac{V_{EP}}{0,785 \cdot D^2}; \quad (25)$$

$$H = \frac{111,3}{0,785 \cdot 3,6^2} = 11 \text{ (м)}.$$

**Розрахунок і вибір насоса для подачі вихідної суміші в колону** (рис. 1, поз. Н<sub>1</sub>). Для всмоктуючого і нагнітального трубопроводів прийmemo однакову швидкість плинy рідини, що дорівнює  $w = 2$  м/с.

Діаметр трубопроводу визначаємо за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (26)$$

де  $V$  – об'ємна витрата вихідної суміші, м<sup>3</sup>/с.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						<b>22</b>
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$d = \sqrt{\frac{3,47 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 2}} = 0,050 \text{ (м)}.$$

Визначаємо критерій Рейнольдса для рідини в трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_p}{\mu}; \quad (27)$$

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 0,050 \cdot 800}{0,25 \cdot 10^{-3}} = 320000,$$

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

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,050} = 0,004.$$

Далі отримаємо:

$$\frac{1}{e} = 250; \quad 560 \cdot \frac{1}{e} = 140000; \quad 10 \cdot \frac{1}{e} = 2500; \quad \text{Re} > 560 \cdot \frac{1}{e}.$$

Для зони, автомодельної по відношенню до Re:

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}; \quad (28)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot 0,004^{0,25} = 0,028.$$

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  $90^\circ$   $\xi_2 = 2 \cdot 1,1 = 2,2$ .

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

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						<b>23</b>
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

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

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:

$$h_{П.ВС.} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (29)$$

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

$$h_{П.ВС.} = \left( 0,028 \cdot \frac{8}{0,050} + 2,7 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,46 \text{ м.}$$

Втрачений напір в нагнітальній лінії знаходимо за формулою (29):

$$h_{П.НАГ.} = \left( 0,028 \cdot \frac{12}{0,050} + 5,6 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 2,51 \text{ (м).}$$

Загальні втрати напору:

$$h_{П.} = h_{П.ВС.} + h_{П.НАГ.}, \quad (30)$$

$$h_{П.} = 1,46 + 2,51 = 3,97 \text{ (м).}$$

Знаходимо напір насоса за рівнянням:

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		<b>24</b>



$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_p \cdot g} + H_{\Gamma} + h_{\Pi}, \quad (31)$$

де  $(P_2 - P_1)$  – різниця тисків в апараті і в ємності, із якої подається рідина;  
 $H_{\Gamma}$  – геометрична висота підйому рідини.

$$H = \frac{0,1}{740 \cdot 9,81} + 6 + 3,97 = 10 \text{ (м)}.$$

Корисну потужність насоса визначаємо за рівнянням:

$$N_{\Pi} = \rho_p \cdot g \cdot Q \cdot H, \quad (32)$$

де  $Q$  – подача (витрата),  $Q = 3,47 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ;

$H$  – напір насоса.

$$N_{\Pi} = 740 \cdot 9,81 \cdot 3,47 \cdot 10^{-3} \cdot 10 = 252 \text{ (Вт)}.$$

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

$$N = \frac{N_{\Pi}}{\eta_{\text{пер}} \cdot \eta_n}, \quad (33)$$

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

Отримуємо:

$$N = \frac{252}{1 \cdot 0,6} = 420 \text{ (Вт)}.$$

Вибираємо відцентровий насос марки ЦНС 13-18 з такими параметрами:  
 об'ємна подача насоса  $13 \text{ м}^3/\text{год}$ .; напір насоса  $18 \text{ м}$ ; потужність, споживана насосом  $2,5 \text{ кВт}$ ; частота обертання  $2200 \text{ об/хв}$ .

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		<b>25</b>

### 3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність

#### 3.1 Розрахунок товщини стінки обичайки апарата

Розрахунок проводимо відповідно до методики, що викладена у [17]. Приймаємо робочий тиск у міжтрубному просторі 0,13 МПа.

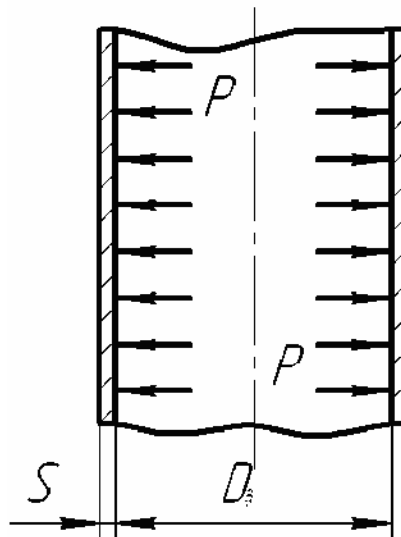


Рисунок 4 – Розрахункова схема циліндричної обичайки

Знаходимо величину нормативної допустимого напруження для сталі 09Г2С при розрахунковій температурі 90°C:  $\sigma^* = 202$  МПа.

Допустиме напруження:

$$[\sigma] = \sigma^* \cdot \eta, \quad (34)$$

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

$$[\sigma] = 202 \cdot 1 = 202 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження при гідравлічних випробуваннях:

$$[\sigma]_{II} = \frac{\sigma_T^{20}}{1,1}, \quad (35)$$

де  $\sigma_T^{20} = 280$  МПа – межа плинності сталі 09Г2С при температурі 20°C.

$$[\sigma]_{II} = \frac{280}{1,1} = 254,5 \text{ МПа.}$$

Далі визначаємо розрахунковий тиск:

$$P_p = P + P_r, \quad (36)$$

де  $P = 0,13 \text{ МПа}$  – робочий тиск;

$P_r$  – гідростатичний тиск середовища.

Гідростатичний тиск середовища:

$$P_r = g \cdot \rho_p \cdot H_p; \quad (37)$$

$$P_r = 9,81 \cdot 740 \cdot 0,6 = 0,004 \text{ МПа};$$

$$P_p = 0,13 + 0,004 = 0,134 \text{ МПа.}$$

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

$$P_{II} = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot P_p \cdot [\sigma]_{20}}{[\sigma]}, 0,2 \right\}, \quad (38)$$

де  $[\sigma]_{20} = \sigma_{20}^* = 196 \text{ МПа}$  – допустиме напруження сталі 09Г2С при 20°C.

$$P_{II} = \max \left\{ \frac{1,5 \cdot 0,134 \cdot 196}{202} = 0,195 \text{ МПа}, 0,2 \text{ МПа} \right\} = 0,2 \text{ МПа.}$$

Розрахункова товщина циліндричної обичайки:

$$S_p^{II} = \max \left\{ \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_p}, \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{II} - P_{II}} \right\}; \quad (39)$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						<b>27</b>
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

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

$$S_p^u = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,134 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 202 - 0,134} = 0,33 \\ \frac{0,2 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 254,4 - 0,2} = 0,4 \end{array} \right\} = 0,4 \text{ мм.}$$

Виконавча товщина циліндричної обичайки:

$$S_{II} \geq S_p^u + c, \quad (40)$$

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

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \quad (41)$$

$c_1$  – 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:

$$c_1 = P \cdot \tau, \quad (42)$$

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

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

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

$$S_{II} = 0,4 + 1,8 = 2,2 \text{ мм.}$$

Приймаємо  $S_{II} = 4$  мм.

### 3.2 Розрахунок товщини стінки кришки апарата

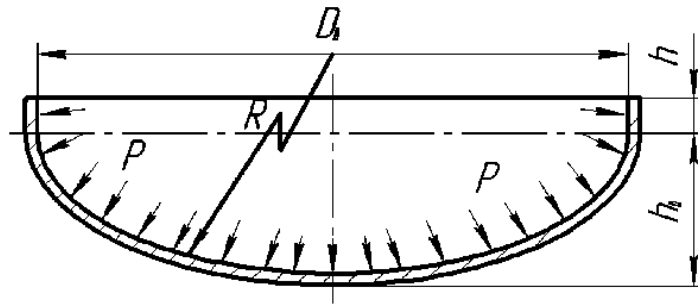


Рисунок 5 – Розрахункова схема еліптичного днища

Розрахункова товщина еліптичного днища:

$$S_P^E = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{P_P \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot P_P} \\ \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \phi \cdot [\sigma]_{II} - 0,5 \cdot P_{II}} \end{array} \right\}; \quad (43)$$

$$S_P^E = \max \left\{ \begin{array}{l} \frac{0,134 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 202 - 0,5 \cdot 0,134} = 0,33 \\ \frac{0,2 \cdot 1000}{2 \cdot 1 \cdot 254,4 - 0,5 \cdot 0,2} = 0,4 \end{array} \right\} = 0,4 \text{ мм.}$$

Виконавча товщина еліптичного днища:

$$S_E \geq S_P^E + c; \quad (44)$$

$$S_E = 0,4 + 1,8 = 2,2 \text{ мм.}$$

Приймаємо  $S_E = 4 \text{ мм.}$

### 3.3 Розрахунок опори апарата

Знаходимо масу обичайки кожуха:

$$m_k = \left[ \frac{\pi \cdot (D + 2 \cdot S_{II})^2}{4} - \frac{\pi \cdot D^2}{4} \right] \cdot H \cdot \rho, \quad (45)$$

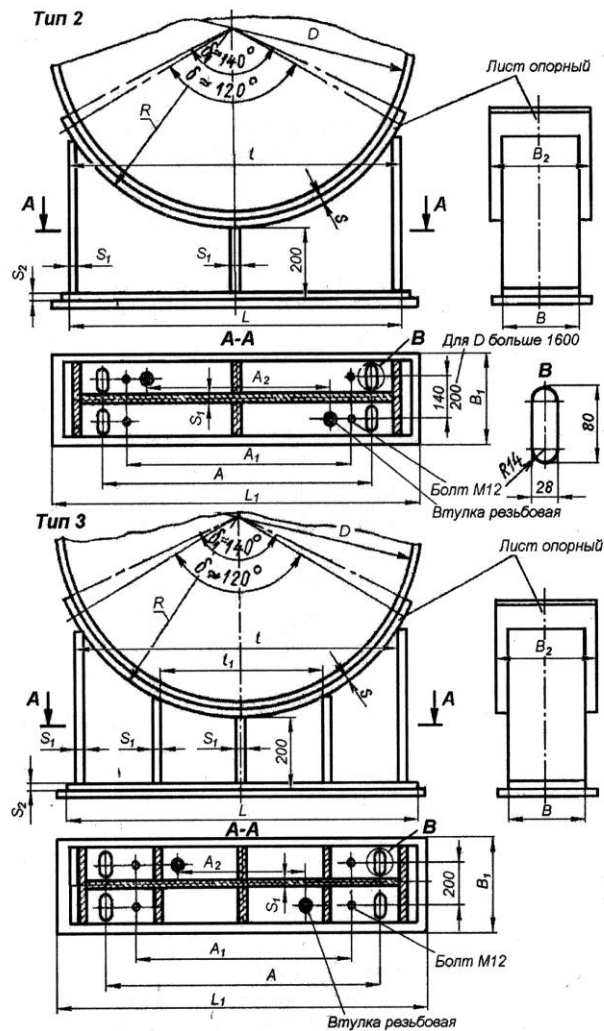


Рисунок 6 – Конструктивна схема стандартних сідлових опор

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

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

Маса еліптичного днища і кришки відповідно (згідно [17]):

$$m_E = 1,24 \cdot D^2 \cdot S_E \cdot \rho; \quad (46)$$

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

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

Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата
-----	------	----------	--------	------

Маса труб:

$$m_{mp} = \frac{\pi}{4} \cdot (d_n^2 - d_{вн}^2) \cdot H \cdot n \cdot \rho; \quad (47)$$

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

Маса фланця з решіткою:

$$m_{\phi} = \frac{\pi \cdot D_{\phi}^2}{4} \cdot h_{\phi} \cdot \rho, \quad (48)$$

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:

$$V_{mtp} = f_{mtp} \cdot H; \quad (49)$$

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

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

$$m_x = V_{mtp} \cdot \rho_x \cdot \varphi; \quad (50)$$

$$m_x = 1,2 \cdot 740 \cdot 0,5 = 444 \text{ (кг)}.$$

Сила тяжіння апарату в робочому стані:

$$G = g \cdot (m_k + m_{\text{Дон}} + m_{\text{Экр}} + m_{mp} + m_{\phi} + m_x); \quad (51)$$

$$G = 9,81 \cdot (597 + 39 + 14,1 + 903 + 138 + 444) = 20945 \text{ (Н)}.$$

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		<b>31</b>

Приймаємо кількість опор  $n = 2$  шт.

Навантаження на одну опору складе:

$$Q = \frac{G}{n}; \quad (52)$$

$$Q = \frac{20945}{2} = 10472,5 \text{ (Н)}.$$

Остаточно приймаємо стандартну сідлову опору 400-514-2-П, конструктивні розміри якої (умовні позначення див. рис. 6):  $D = 1000$  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
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		<b>32</b>



## 4 Монтаж та ремонт апарата

### 4.1 Монтаж розробленого апарата [18]

Випарник етанолу з паровим простором відноситься до кожухотрубних теплообмінників. Технологія монтажу апаратів такої конструкції залежить від місця і способу їх установки. Вони можуть бути встановлені на відкритому майданчику, на постаменті чи в середині будівлі, а також горизонтально чи вертикально.

У нашому випадку мова йде про горизонтальний апарат, який розміщений на відкритому майданчику на нульовій позначці. Фундаменти виконують у вигляді двох залізобетонних стовпів з анкерними болтами під опори. При монтажі встановлюють нерухому і рухому опори. Гайки на болтах не закручують повністю (залишають зазор 1–2 мм), щоб апарат міг вільно переміщуватись в горизонтальному напрямку. При установці опор, які мають змогу переміщуватися, перевіряють рівномірність прилягання ковзаник до опорних поверхонь і їх перпендикулярність осі апарата. Горизонтальність апарату перевіряють за рівнеміром.

У деяких випадках при монтажі проводять контрольне розбирання (ревізію) кожухотрубних теплообмінників. При цьому перевіряють наявність прокладок, комплектність знімних деталей, правильність їх взаємного розташування.

Для виявлення дефектів у розвальцьовуванні і обварці трубок трубний пучок спресовують (при знятій розподільній камері і кришці) шляхом подачі води в міжтрубний простір. При цьому також оглядають корпус теплообмінника. Дефекти розвальцьовування або обварки усувають.

Горизонтальне обладнання монтують за допомогою одного або двох (спарених) кранів. Спосіб підйому і вантажопідйомність кранів вибирають в залежності від розміру і маси обладнання, висоти і конфігурації фундаменту або постаменту під обладнання, наявності розташованих поруч будівельних конструкцій та ін.

Горизонтальні апарати особливо великої маси і при підйомі на значну висоту часто монтують за допомогою двох кранів. Монтаж починають з підйому апарата із вихідного горизонтального положення без відриву його від землі. На рис. 7 показані найбільш сприятливі умови роботи кранів при монтажі апаратів.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<b>33</b>

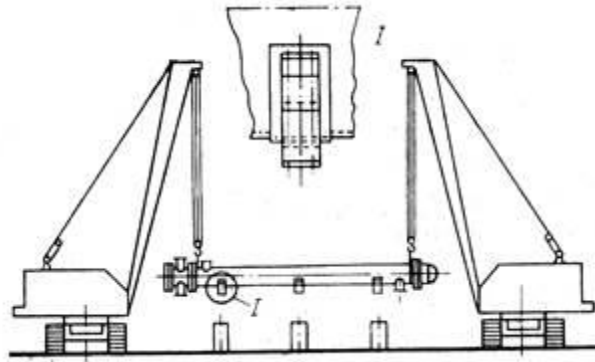


Рисунок 7 – Схема монтажу горизонтального теплообмінника

Коли установка одного з кранів із зовнішньої сторони фундаментів неможлива, монтаж апаратів виконують лише маневруванням стріли крана. У тих випадках, коли при підйомі апаратів неможливо розташувати крани із зовнішньої сторони фундаментів і проїхати між фундаментами, збільшують виліт стріли кранів або переміщують крани з піднятим апаратом у межах їх вантажної характеристики.

#### 4.2 Ремонт апарата [18]

Теплообмінники з трубною системою мають підвищену надійність, що дозволяє їм функціонувати без збоїв протягом довгих років. Але не варто забувати, що планове технічне обслуговування просто необхідне для профілактики поломок. Циркулюючий теплоносій з часом засмічує тонкі стінки трубок, осідаючи на них і перешкоджаючи вільному потоку. Уникнути передчасного виходу обладнання із ладу і зберегти енергоефективність дозволить регулярне чищення трубок. Завдяки систематичному промиванню можливо довгострокове підтримання робочих параметрів у нормі. Безпосередньо ж ремонт кожухотрубних теплообмінників, у більшості випадків, необхідний лише у разі надмірного зносу обладнання.

Найбільш поширеними дефектами поламаних теплообмінників є:

1) Виривання трубок з трубних дощок. Дана проблема зазвичай виникає через нерівномірне розширення трубок та корпусу. Варіанти вирішення:

- зачистка місця розриву і обварки трубки заново;
- висвердлювання трубки і установка нової трубки;
- зачистка і заварювання (заглушка) трубки.

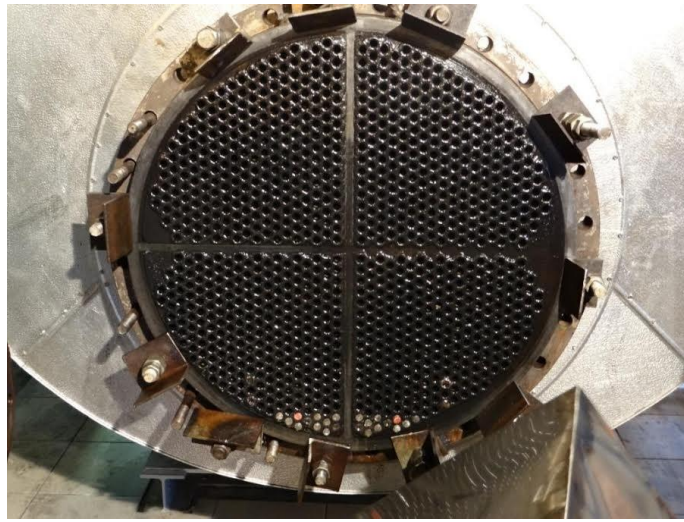


Рисунок 8 – Кожухотрубний теплообмінник з вирваними трубками

Якщо встановлюються заглушки на дефектні трубки, необхідно враховувати, що опір даної траси зростає, а також трохи погіршується теплообмін. Зазвичай теплообмінники розраховують таким чином, щоб без сильного впливу на технологічний процес можна було загнушити до 10 % трубок. У кожному разі це питання треба вивчати окремо.

2) Наскрізна корозія трубок. Дана проблема зазвичай виникає або через тривалість використання теплообмінника і безпосередній корозії, або при невірно підбраному матеріалі трубочатки. Варіанти вирішення:

- висвердлювання трубки і установка нової трубки;
- зачистка і заварювання (заклушка) трубки.



Рисунок 9 – Кожухотрубний теплообмінник з корозією трубок

Також, як і в описаному вище випадку, при встановленні заглушок необхідно дотримати вимоги з урахуванням збільшеного опору. Із огляду на причини виникнення наскрізної корозії, можна припустити, що з великою ймовірністю, найближчим часом можуть почати виходити з ладу такі трубки.

Нерідко при виникненні наскрізної корозії найбільш ефективним шляхом є просто заміна трубного пучка (виготовлення нового трубного пучка). Це особливо актуально, якщо повторний дефект виник швидко після першої поломки.

3) Наскрізна корозія корпусу або камер. Дана проблема, також як і наскрізна корозія трубок, зазвичай виникає або через тривалість використання теплообмінника і безпосередній корозії, або при невірно підбраному матеріалі трубок. Варіанти вирішення:

- підварювання або установка заплатки;
- виготовлення нової камери (корпусу).

4) Засмічення по трубках або по міжтрубному просторі. Ця проблема може виникнути в тому випадку, якщо один з теплоносіїв НЕ фільтрується належним чином, або якщо відбувається поява природного нагару (при роботі з вихлопними газами).

Варіанти вирішення:

- механічне очищення;
- хімічне очищення.

У тому випадку, якщо засмічення відбувається через відсутність належної фільтрації середовищ, рекомендується установка необхідних фільтрів. У тому випадку, якщо відбувається поява нагару, швидше за все, це обумовлено технологічними моментами. У такому випадку треба визначати, коли відбувається чергове засмічення теплообмінника (вимірювання температури або протитиску) і чистити його.

Подібні роботи слід проводити на місці експлуатації. У разі необхідності фахівці повинні виїхати на місце і провести цю роботу, але в більшості випадків ці операції виробляє експлуатаційний персонал.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		<b>36</b>

5) Покриття вапном (накипом) або іншими відкладеннями міжтрубного простору або самих трубок. Ця проблема може виникнути в тому випадку, якщо один з теплоносіїв є рідина (вода) з невідповідним для даного процесу хімічним складом (наприклад, надмірно мінералізована). Варіанти вирішення: очистка за допомогою спеціальних хімічних засобів.

У разі появи великого шару мінеральних відкладень (накипу) хімічне очищення може бути неефективним. У такому випадку трубний пучок не підлягатиме ремонту і буде необхідно виготовити новий трубний пучок.

Дефектні штуцера і трубні решітки при досягненні максимальних величин зносу і прогину замінюються.

Свищі і тріщини усуваються шляхом заварки або постановкою накладок з попереднім видаленням дефектної ділянки.

За допомогою кольорової дефектоскопії визначають протяжність і положення кінців тріщин, виявлених в корпусі. Ці кінці до заварки засвердлюють свердлами діаметром 3–4 мм. Некрізні тріщини глибиною не більше 0,4 товщини стінки розправляються під заварку односторонньою вирубкою на максимальну глибину тріщини зі зняттям крайок під кутом 50–60°. При тріщині понад 100 мм зварювання проводять оберненоступеневим методом. Наскрізні і некрізні тріщини глибиною більше 0,4 товщини стінки обробляють на всю товщину вирубкою зубилом або газорізкою. При появі гніздових тріщин пошкоджені місця вирізають і закривають латками без гострих кутів. Латки вваривать в рівень з основним металом. Площа латки не повинна перевищувати площі листа апарату.

Надійність ліквідації поверхневих дефектів контролюють магнітною або ультразвуковою дефектоскопією. Допускається глибина пошкодження в межах 10–20 % товщини стінки в залежності від розмірів ушкодження.

Усі поверхні ущільнювачів слід контролювати магнітною або ультразвуковою дефектоскопією на відсутність тріщин. Після ремонту конденсатора його піддають гідравлічним або пневматичним випробуванням.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<b>37</b>

## 5 Охорона праці

### Метеорологічні умови у виробничих приміщеннях. Нормування параметрів мікроклімату.

Одним із необхідних умов здорової і високопродуктивної праці на виробництві є забезпечення нормальних метеорологічних умов у виробничих приміщеннях. До метеорологічних умов виробничого середовища відносяться: температура повітря, відносна вологість, швидкість руху повітря, барометричний тиск і теплове випромінювання [19, 20].

Температура повітря є основним чинником, що визначає мікроклімат виробничого приміщення. Висока температура повітря у виробничих приміщеннях викликає швидко стомлюваність працюючого, перегрів організму і велике потовиділення. Це веде до зниження уваги, млявості і може навіть стати причиною нещасного випадку. При потовиділенні разом із водою з організму людини видаляються мінеральні солі (до 1 %), вітаміни С і В, згущується кров, підвищується кількість гемоглобіну, вміст цукру, і кальцію, знижується кислотність шлункового соку, посилюється витрата вуглеводів і розпад білків. Низька температура навпаки, може викликати місцеве або загальне охолодження організму і стати причиною ряду простудних захворювань – ангіни, ревматизму, катару верхніх дихальних шляхів, грипу [19].

Вологість повітря, тобто вміст у ньому парів води. Вологість буває абсолютною, максимальною і відносною. У повітрі, надмірно насиченому водяними парами, утруднюється випаровування вологи з поверхні шкіри і легенів, що може різко погіршити стан і знизити працездатність людини. При високій вологості та низькій температурі повітря відбувається більш інтенсивна тепловіддача організму, при високій вологості і високій температурі – тепловіддача утруднена. А низька вологість повітря при низькій температурі не робить помітного впливу на самопочуття людини. При низькій вологості і високій температурі відбувається посилена втрата вологи організмом, з'являється сухість слизових оболонок верхніх дихальних шляхів і кашель [19].

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<b>38</b>

Для створення здорових умов праці важливе значення має і швидкість руху повітря. Остання сприяє віддачі організмом тепла у зовнішнє середовище і прискорює випаровування вологи з поверхні шкіри, полегшуючи тим самим самопочуття людини при високій температурі і високій відносній вологості. Необхідно відзначити, що після 36,5°C збільшення швидкості руху повітря дає протилежний, тобто нагрівальний ефект [20].

Здатність людського організму підтримувати постійну температуру тіла при зміні параметрів мікроклімату називається терморегуляцією. Вона забезпечується встановленням певного співвідношення між теплоутворенням у результаті зміни речовин (хімічна терморегуляція), і тепловіддачею (фізична терморегуляція). Дослідженнями встановлено, що при температурі 18°C людина може працювати повною віддачею. Під час роботи в «гарячому» мікрокліматі (30°C) продуктивність праці знижується на 20–30 % [21].

Плюс певний вплив на організм людини надає барометричний тиск, оскільки він впливає на парціальний тиск основних компонентів повітря (кисню та азоту), а отже, на процес дихання. Життєдіяльність людини може проходити досить в широкому інтервалі близько 550–950 мм. рт. ст. Однак, для здоров'я людини важлива не сама величина тиску, а швидка його зміна [20].

Гігієнічне нормування виробничого мікроклімату здійснюється відповідно до СанПіН від 30.04.2013 № 33 «Санітарні правила і норми. Вимоги до мікроклімату робочих місць у виробничих і офісних приміщеннях» і ГОСТом 12.1.005-88 «Повітря робочої зони. Загальні санітарно-гігієнічні вимоги».

ГОСТ 12.1.005-88 встановлює оптимальні параметри температури, відносної вологості та швидкості повітря у залежності від енерговитрат людини та пори року, крім того, даний ГОСТ враховує і кількість теплонадлишків у робочій зоні [19].

Залежно від надлишку явного тепла усі виробничі приміщення поділяються на дві категорії [19]:

- приміщення з незначними надлишками тепла, в яких тепловиділення від устаткування, людей не перевищує  $23 \text{ Дж/с}\cdot\text{м}^3$  (м'ясні, овочеві, рибні та цеха);

- приміщення зі значним надлишком явного тепла, в яких надлишок явного тепла більш  $23 \text{ Дж/с}\cdot\text{м}^3$  (гарячий цех, пічне опалення хлібозаводу, кондитерські цехи).

Період року характеризується середньодобовою температурою зовнішнього повітря  $+10^\circ\text{C}$  і вище, вважається теплим, а нижче  $+10^\circ\text{C}$  – холодним [21].

Категорії робіт – це розмежування робіт на основі загальні витрати організму людини, ккал/год. І всі роботи діляться на три категорії [20]:

I – легка, енерговитрати до 172 Вт;

II – середньої тяжкості і має дві підгрупи: IIa – 172–232 Вт; IIб – 232–293 Вт;

III – важка, енерговитрати більше 293 Вт.

ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ регламентує оптимальні та допустимі норми температури, відносної вологості та швидкості руху повітря в робочій зоні виробничих приміщень.

Поліпшення метеорологічних умов у виробничих приміщеннях здійснюється насамперед технічними засобами ще на стадії проектування – це механізація і автоматизація трудомістких робіт, виробничих процесів, а також застосування дистанційного керування і спостереження, коли обслуговуючий персонал знаходиться в приміщеннях з нормальним мікрокліматом [20].

Забезпечення нормальних параметрів мікроклімату досягається також у результаті зменшення теплових втрат, теплоізоляції апаратів і трубопроводів, застосуванням вентиляції робочих місць, екранування обладнання та забезпечення його герметичності, використання засобів індивідуального захисту, питного режиму, раціональної організації праці та відпочинку [19].

Теплоізоляція є ефективним заходом не тільки щодо зменшення інтенсивності теплового випромінювання від нагрітих поверхонь, але і загальних теплоносіїв, а також для запобігання опіків при дотику до цих поверхонь. За діючими санітарними нормами температура нагрітих поверхонь обладнання і огорожень на робочих місцях не повинна перевищувати  $45^\circ\text{C}$ , а для обладнання, всередині якого температура дорівнює або нижче  $100^\circ\text{C}$  – не більше  $35^\circ\text{C}$ . Для теплоізоляції застосовують різноманітні матеріали і конструкції (спеціальні бетони і цегла, мінеральну і скляну вату, азбест і т. д.). Важливу роль відіграє і забарвлення зовнішніх

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
						<b>40</b>
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



поверхонь нагрітих тел. Так, розрахунки показують, що покриття прес-форм алюмінієвою фарбою призводить до зниження променевої тепловіддачі у 2 рази, а витрата електроенергії на їх нагрівання – на 4 % [19].

Найбільш ефективним і поширеним способом захисту від теплового випромінювання є екранування. За принципом роботи екрани умовно поділяються на теплопоглинальні, тепловідображаючі і тепловідвідні, а у залежності від можливості спостереження за технологічним процесом екрани поділяються на три типи: непрозорі, напівпрозорі і прозорі. Матеріалами для тепловідображаючих екранів служить листовий алюміній, алюмінієва фольга; для теплопоглинальних екранів – азбестові щити, вогнетривкі цегли; тепловідвідні екрани представляють собою зварні або литі конструкції, що охолоджуються водою, яка протікає всередині [19].

До напівпрозорих екранів відносяться металеві сітки, ланцюгові ланки, армоване скло, водяні, повітряно-водяні завіси, що знижують інтенсивність теплового випромінювання до 80 %. У якості прозорих екранів використовують силікатне скло, кварцове і органічне скло [19].

Герметичність нагрітого обладнання порушується внаслідок постійної деформації швів, стиків конструкції апаратів, що призводить до погіршення метеорологічних умов. Плюс особливе значення для попередження перегріву організму у виробничих умовах має раціональний питний режим, режим праці та водні процедури. За існуючим у нашій країні законодавством працюючі у цехах із підвищеними тепловиділеннями (більше 20 ккал/м<sup>3</sup>·год.) забезпечуються підсоленою газованою водою, що містить від 0,2 до 0,5 % хлориду натрію. Пиття такої води сприяє зменшенню спеки, потовиділення, зниження температури тіла, підвищення продуктивності праці. Окрім того, слід враховувати можливий несприятливий вплив різкої зміни температури на робочому місці, наприклад, при температурі близько 40°C температура повітря в кімнаті відпочинку повинна підтримуватися на рівні 25–28°C [19].

Велике значення для створення нормальних метеорологічних умов має раціональне розміщення обладнання. Так, апарати з великими тепловиділеннями розміщують на відкритому повітрі або в окремих ізольованих приміщеннях, розміщуючи їх переважно в один ряд. Також важливим технічним засобом забезпечен-

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<b>41</b>

ня нормальних метеорологічних умов є вентиляція. Швидкість повітря при загальнообмінній вентиляції повинна бути не менше 0,3 м/с, при місцевій – 0,7–2 м/с. Якщо інтенсивність теплового випромінювання перевищує 348 Вт/м<sup>2</sup>, то передбачається душування робочого місця [20].

Найбільш ефективним засобом створення оптимальних умов мікроклімату і чистоти повітря є кондиціонування повітря, при якому здійснюється регулювання не тільки температури повітря, а і його вологість, швидкість і очищення від пилу.

Чималу роль у профілактиці перегрівання грають індивідуальні засоби захисту. Спецодяг повинен бути повітро- і вологопроникний (бавовняний, лляний). Для захисту від інфрачервоного випромінювання використовують відображаючі тканини, на поверхні яких розпорошено тонкий шар металів. Для захисту голови від випромінювання застосовують дюралеві, фіброві каски, повстяні капелюхи, а від перегріву і опіків застосовують капелюхи з широкими полями з повсті, фетру або сукна. Для захисту ніг застосовують спеціальне взуття. Матеріал взуття повинен бути стійким проти підвищеної температури, опромінення, іскор, малотеплопровідний і повітропроникний. Для захисту рук застосовують брезентові рукавиці. Для захисту очей від впливу енергії випромінювання використовують окуляри зі світлофільтрами. Світлофільтр підбирають зі спектральною характеристикою, що відповідає спектральному діапазону потоку випромінювання, для захисту від якого окуляри призначені. Для захисту обличчя та очей використовують щитки з органічного скла, металевої сітки і комбіновані (зі скла і сітки) маски зі світлофільтром [21].

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		<b>42</b>

## Список використаних джерел

1. Основні залежності та приклади розрахунків теплообмінних апаратів : навчальний посібник / укладачі: Л. Г. Воронін, А. Р. Степанюк, Л. І. Ружинська. – Київ : НТУУ «КПІ», 2011 – 68 с.
2. Дистанційний курс «Процеси та апарати хімічних виробництв». Тема 19. 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. Kosaric N. et al. Ethanol // Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. – 6th. – Weinheim : Wiley-VCH, 2005.
5. Маньковский О. Н. Теплообменная аппаратура химических производств: Инженерные методы расчета / О. Н. Маньковский, А. Р. Толчинский, М. В. Александров. – Ленинград : Химия, 1976. – 368 с.
6. 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.
7. 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.
8. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 752 с.
9. 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.
10. Лашинский А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.

					<b>XI.T.00.00.00 ПЗ</b>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		<b>43</b>

11. Лашинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник / А. А. Лашинский. – Л. : Машиностроение, 1981. – 382 с.
12. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин [и др.]. – Под общ. ред. Сорокина В. Г. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.
13. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Под ред. Дытнерского Ю. И. – М. : Химия, 1983. – 272 с.
14. 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.
15. Дячек П.И. Холодильные машины и установки: Учебное пособие / П.И. Дячек. – Ростов на Дону : Феникс, 2007. – 424 с.
16. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / Под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л. : Машиностроение, 1982. – 384 с.
17. 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.
18. 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.
19. Метеорологічні умови виробничого середовища та їх вплив на здоров'я, і працездатність людини. Нормування параметрів мікроклімату [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://studfile.net/preview/5441078/page:16/>
20. Метеорологічні умови виробничого середовища та їх нормування [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://znaytovar.ru/s/Meteorologicheskie-usloviya-proi.html>
21. Виробничий мікроклімат і основні методи його оптимізації [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://laborprotection.3dn.ru/book/pages/4.html>