

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ  
Кафедра "Процеси та обладнання хімічних  
і нафтопереробних виробництв"

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри

\_\_\_\_\_ підпис, дата

## Кваліфікаційна робота бакалавра

зі спеціальності 05050315  
"Обладнання хімічних виробництв  
і підприємств будівельних матеріалів"

Тема роботи: Блок отримання технічного пропан-бутану установки переробки нестабільної нафти. Розробити апарат повітряного охолодження для конденсації вуглеводневої суміші

Виконав:  
студент групи ХМдн-51чк  
Скок Олександр Анатолійович

\_\_\_\_\_ підпис

Залікова книжка

№ \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота бакалавра  
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою \_\_\_\_\_

" \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Підпис голови**  
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, ст. викл.

Острога Руслан Олексійович

\_\_\_\_\_ підпис, дата

**СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**ФАКУЛЬТЕТ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**  
**Кафедра процесів та обладнання хімічних і нафтопереробних виробництв**

Спеціальність 05050315

"Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів"

Курс 5 Група ХМдн-51чк Семестр 10

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

Студент Скок Олександр Анатолійович

1 Тема проекту: Блок отримання технічного пропан-бутану установки переробки нестабільної нафти. Розробити апарат повітряного охолодження для конденсації вуглеводневої суміші

2 Вихідні дані: Розробити апарат повітряного охолодження для конденсації парів дистилату атмосферної колони у кількості 4500 кг/год. Компонентний склад дистилату (% мас.):  $C_2H_6 = 0,6$ ;  $C_3H_8 = 1,1$ ;  $n-C_4H_{10} = 93,7$ ;  $i-C_4H_{10} = 4,6$ . Тиск в апараті 0,42 МПа.

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

1. Технологічна схема установки – 1,0 арк.
2. Складальне креслення апарата – 1,0 арк.
3. Складальне креслення теплообмінної секції – 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. Эмирджанов Р.Т. Основы технологических расчетов в нефтепереработке и нефтехимии / Р.Т. Эмирджанов, Р.А. Лемберанский . – М. : Химия, 1989. – 192 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 2019 р.

Керівник

\_\_\_\_\_

підпис

ст. викл. Острога Р.О.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 58 с., 7 рис., 2 табл., 1 додаток, 20 джерел.

Графічні матеріали: технологічна схема установки, складальне креслення апарата, складальне креслення теплообмінної секції – усього 3 аркуші формату А1.

Тема кваліфікаційної роботи бакалавра «Блок отримання технічного пропан-бутану установки переробки нестабільної нафти. Розробити апарат повітряного охолодження для конденсації вуглеводневої суміші».

У роботі представлено опис технологічної схеми установки переробки нестабільної нафти. Розглянуто теоретичні основи процесу теплообміну, особливості конструкції та класифікацію апаратів повітряного охолодження, обґрунтовано вибір конструкційних матеріалів, наведено їх фізико-механічні та технологічні властивості. Також виконано технологічний, конструктивний розрахунки, вибрано і розраховане допоміжне обладнання. Проведеними розрахунками на міцність підтверджена механічна надійність і конструктивна досконалість запроєктованого апарату, що є неодмінною умовою тривалої та безперебійної роботи обладнання. У розділі «Охорона праці» розглянуті параметри, що характеризують вібрацію, їх дію на організм людини, а також нормування та методи захисту.

Ключові слова: УСТАНОВКА, АТМОСФЕРНА ПЕРЕГОНКА, ДИСТИЛЯТ, ПРОПАН, БУТАН, АПАРАТ ПОВІТРЯНОГО ОХОЛОДЖЕННЯ, КОНДЕНСАЦІЯ, ВІБРАЦІЯ.

## Зміст

	С.
Вступ	5
1 Технологічна частина	6
1.1 Опис технологічної схеми установки	6
1.2 Теоретичні основи процесу	8
1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструктивних матеріалів	17
2 Технологічні розрахунки процесу і апарата	21
2.1 Технологічні розрахунки	21
2.2 Конструктивні розрахунки	29
2.3 Аеродинамічний опір апарата	31
2.4 Вибір допоміжного обладнання	33
3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність	39
3.1 Визначення товщини стінки апарата, кришки	30
3.2 Розрахунок висоти трубної решітки	33
3.3 Розрахунок опори апарата	33
4 Монтаж та ремонт апарата	43
4.1 Монтаж апарата	43
4.2 Ремонт апарата	45
5 Охорона праці	47
Список літератури	57
Додаток – Специфікації до графічної частини	

					<i>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</i>		
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Скок</i>				<i>Лім.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Острога</i>				4	58	
<i>Реценз.</i>					<i>СумДУ, ХМдн-51чк</i>		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Затверд.</i>	<i>Склабінський</i>						

**Апарат повітряного охолодження**  
**Пояснювальна записка**

## Вступ

Нафта і газ – це основні джерела енергії в сучасному світі. На паливі, отриманих з них, працюють двигуни сухопутного, повітряного та водного транспорту, теплові електростанції. Нафту та газ переробляють в хімічну сировину для виробництва пластичних мас, синтетичних каучуків, штучних волокон. У наш час нараховується близько 100 різних процесів первинної і вторинної переробки нафти, реалізованих у промисловості [1].

Установки переробки нестабільної нафти являє собою спрощений варіант первинної перегонки, де нафту розділяють на фракції, що розподіляються температурними межами кипіння. Цей розподіл проводять із застосуванням процесів підігрівання, дистиляції і ректифікації, конденсації та охолодження.

Галузь використання повітряного охолодження відноситься до таких промислових підприємств, де застосування інших систем охолодження технічно неможлива або недоцільна із економічної точки зору. Охоплює галузі промисловості, розташовані далеко від природних джерел води, що потребують охолодження технологічних рідин, парів і газів. Для цих цілей застосовуються спеціальні теплообмінні установки – апарати повітряного охолодження (АПО). Як правило, вартість АПО вище, ніж у теплообмінників, які охолоджуються водою. Однак, при охолодженні повітрям відсутні проблеми з корозією і забрудненням, які пов'язані із застосуванням охолоджуючої води, а також відсутня ймовірність змішування води з охолоджуваним технологічним середовищем [2].

Таким чином, витрати на технічне обслуговування апаратів повітряного охолодження нижче. Обладнання просте в експлуатації, ремонт та очищення їх не вимагають великих трудових витрат. Зовнішня поверхня теплообміну майже не забруднюється холодоагентом (повітрям), незважаючи на його запиленість.

Кваліфікаційну роботу бакалавра виконано у відповідності до методичних вказівок із дотриманням нормативних вимог і представленням регламентованих розділів [3].

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
						5
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 Технологічна частина

## 1.1 Опис технологічної схеми установки

Технологічна схема установки переробки нестабільної вуглеводневої сировини представлена на рис. 1.1.

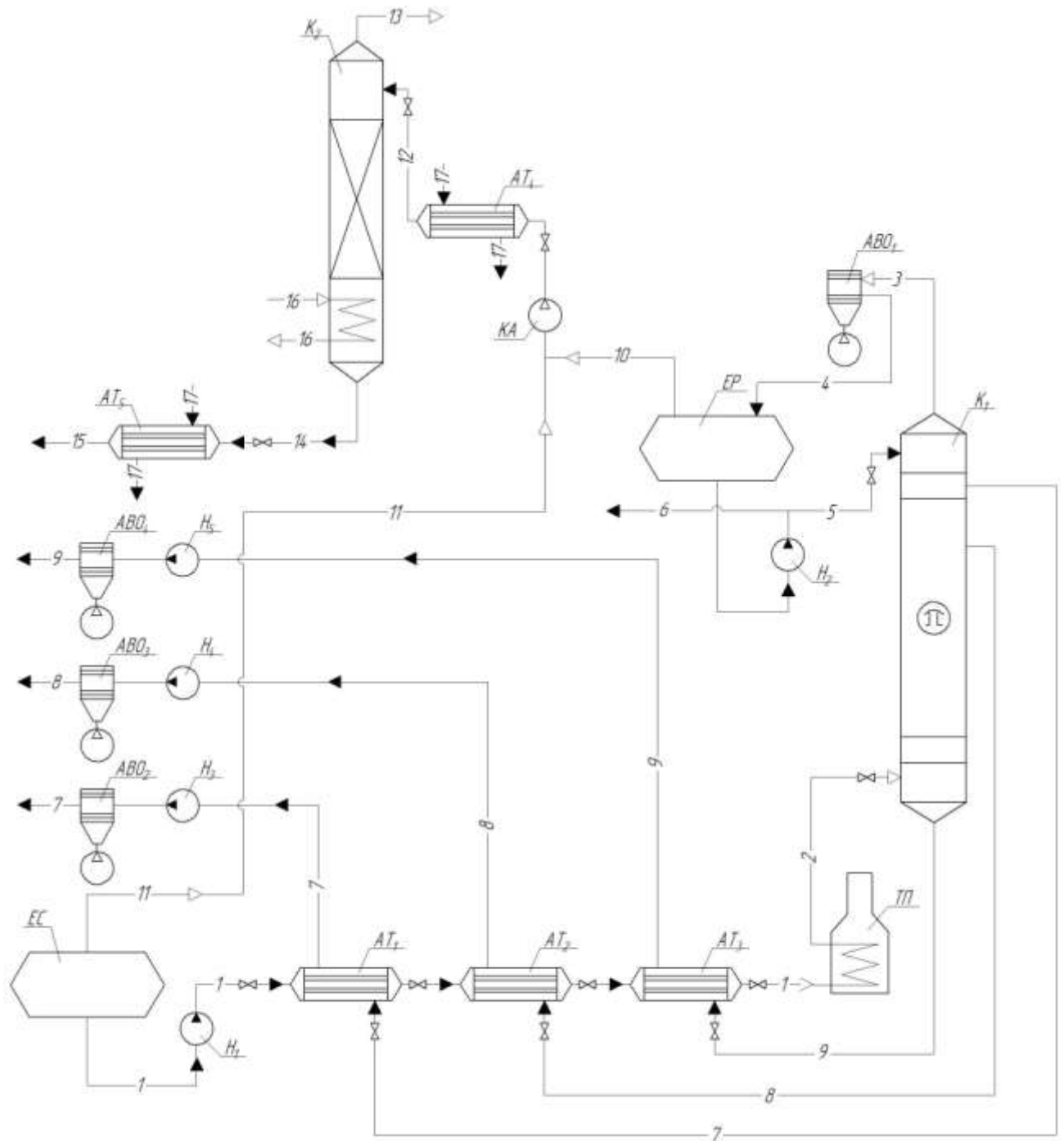


Рисунок 1.1 – Технологічна схема установки переробки нестабільної нафти

Працює установка наступним чином. У технологічному процесі, як уже було зазначено, використовується нестабільна нафта. Вона потрапляє до сировинної ємності  $E_1$ . За допомогою насоса  $H_1$  нафта послідовно проходить блок теплообмінних апаратів  $AT_1, AT_2, AT_3$ . Підігрів нестабільної нафти відбувається за рахунок тепла зустрічних потоків нафтопродуктів, тобто зазначені теплообмінники працюють по принципу рекуперації. Уже підігріта нафта поступає у трубчасту піч ТП, де відбувається її нагрівання аж до температури початку кипіння. Саме в такому стані вона подається під нижню тарілку атмосферної ректифікаційної колони  $K_1$ . По висоті колони  $K_1$ , від низу до гори, рухається парова фаза вуглеводнів. У верхню частину колони подається флегмове зрошення. У якості контактних пристроїв у колоні  $K_1$  встановлені ковпачкові тарілки. Піднімаючись по висоті колони, паро-газова суміш контактує на тарілках із вуглеводневою рідиною. Внаслідок такого контакту відбувається масообмінний процес при якому із пари в рідину конденсуються і переходять труднолетючі компоненти (ТЛК). Процес конденсації супроводжується значним виділенням тепла, яке витрачається на випарювання із суміші рідких вуглеводнів легколетючих компонентів (ЛЛК).

У результаті переробки нестабільної нафти найбільш легкою фракцією, що отримують на установці, є вуглеводневий газ. Його склад містить дуже цінні компоненти (пропан і бутан). Дана фракція із верхнього штуцера колони  $K_1$  потрапляє до апарату повітряного охолодження АПО<sub>1</sub>, де відбувається конденсація парів. Частина утвореного конденсату повертається в колону  $K_1$  у вигляді флегми для її зрошення.

Для виділення з газової суміші пропан-бутанової фракції необхідно створити певні умови – газовий потік спочатку стискається до тиску 3 МПа за допомогою компресорного агрегату КА, потім охолоджується в холодильнику  $AT_4$ , після чого спрямовується в етанову ректифікаційну колону  $K_2$ . Етанова колона являє собою насадкову ректифікаційну колону, у якій в результаті протитечійної взаємодії парової і рідкої фаз відбувається розділення суміші. Із

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
						7
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

верхнього штуцера відводиться метан-етанова фракція, а з нижньої частини колони – зріджений пропан-бутан, який охолоджується в холодильнику АТ<sub>5</sub> і відводиться споживачеві.

По висоті ректифікаційної колони К<sub>1</sub> бічними погонями відводяться цільові фракції атмосферної перегінки. Першим бічним погоном є фракція 150–200°С, яка йде зустрічним потоком у міжтрубний простір теплообмінника АТ<sub>1</sub> для підігрівання початкової сировини, а потім додатково охолоджується в апараті повітряного охолодження АПО<sub>2</sub>. Після чого, у якості готового продукту, відводиться в товарний парк.

Другий бічний погон – фракція 200–350°С також проходить дві стадії охолодження і спрямовується в товарний парк.

Кубовий залишок колони К<sub>1</sub> – мазут. Він відводиться через нижній штуцер і прямує в міжтрубний простір теплообмінника АТ<sub>3</sub>. Тут, нагріваючи зустрічний потік нафти, і в АПО<sub>4</sub> він охолоджується до необхідної температури і відводиться в товарний парк.

## 1.2 Теоретичні основи процесу

Теоретичні основи процесу, особливості конструкції та методика розрахунку апаратів повітряного охолодження, які представлені у цьому підрозділі, наведено після опрацювання літературних джерел [4, 5].

Апарати повітряного охолодження складаються із таких вузлів:

- теплообмінних секцій;
- осьового вентилятора з приводом;
- пристроїв для регулювання витрати охолоджуючого повітря;
- опорних і огорожувальних конструкцій.

Основним елементом апаратів повітряного охолодження є **теплообмінні секції**, теплообмінну поверхню яких komponують із оребрених труб, закріплених в трубних решітках в чотири, шість або вісім рядів. Труби зазвичай розташовують по вершинах рівностороннього трикутника, так як коридорне

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		8



розташування забезпечує набагато нижчу тепловіддачу. До трубних грат приєднані кришки, внутрішня порожнина яких служить для розподілу охолоджуваного потоку рідини по трубах. По боках секцій встановлені бічні рами, які утримують труби, трубні решітки та кришки в певному положенні. Секції мають розміщують горизонтально, вертикально або похило, що визначає тип АПО. Секції монтують на рамі, що спирається на опорні стійки апарату, і фіксують за одного кінця.

Охолодження та конденсація різних теплоносіїв повітрям було б економічно не вигідно, якби в трубних секціях встановлювалися звичайні гладкі труби: невисока швидкість охолоджуючого потоку в поєднанні з невисокою густиною і теплопровідністю повітря обумовлюють невеликі значення коефіцієнтів тепловіддачі з боку повітря. Щодо низьких коефіцієнтів тепловіддачі з боку повітря в порівнянні з коефіцієнтами для охолоджуваних або конденсованих рідин можуть бути частково компенсовані розвитком поверхонь з боку повітря. Така можливість з'являється, якщо використовувати **оребрені труби**, площа зовнішньої поверхні яких у 10–25 разів більше площі їх внутрішньої поверхні.

Форма ребер може бути різною (рис. 1.2), причому можуть використовуватися ребра для труб, об'єднаних в групи по дві, три труби і більше.

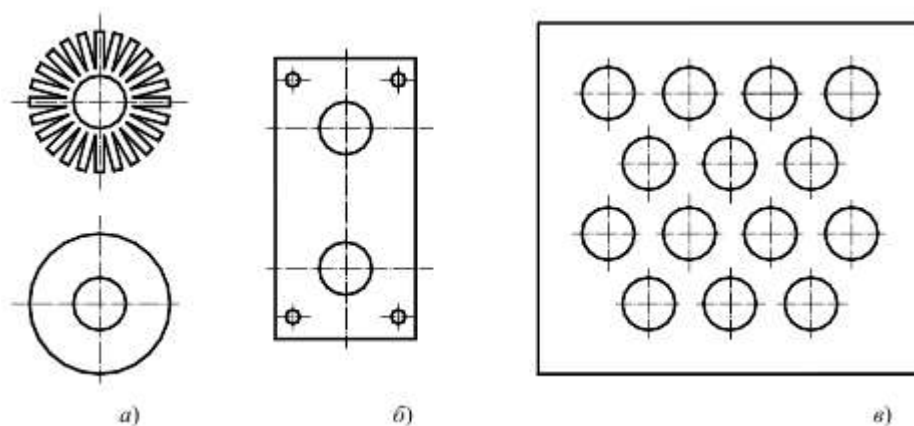


Рисунок 1.2 – Різна геометрія ребер: а) круглі ребра; б) прямокутні ребра; в) прямокутні ребра для пучків труб

Відомо, що ребра може виготовлятися різними способами: навивкою стрічки у вигляді спіралі навколо труби, запресовкою пластин круглої або прямокутної форми в неглибокі пази на зовнішній поверхні труби, приварюванням або паянням ребер або стержнів до труби. Однак у всіх наведених випадках спостерігається погіршення зчеплення ребра з поверхнею труби через явище корозії, особливо якщо ребра і основна труба виготовлені з різних матеріалів. Крім того, зазначені способи установки ребер характеризуються високою трудомісткістю.

На даний час найбільш практичними і технологічними є оребрені труби, виготовлені з суцільної товстостінної труби (як правило, з алюмінію або алюмінієвих сплавів), підданій механічній обробці. Ребра нарізаються при пропусканні труби через ряд формувальних дисків. Процес оребрення труб методом поперечно-гвинтового накочування має високу продуктивність, добре піддається механізації і автоматизації. Оребрення іншими способами не перевищує 10–15 % обсягу виробництва.

У середині оребреної труби може бути встановлена внутрішня труба з будь-якого необхідного для теплоносія матеріалу, при цьому забезпечується щільна посадка між вкладишем і оребреною частиною. У цьому випадку труба є біметалічною. Для всіх типів оребрених труб існують граничні температури, при перевищенні яких порушується контакт між трубою і ребром або оребреною трубою і вкладишем, що обмежує температурні межі експлуатації апаратів повітряного охолодження.

Труби для стандартизованих апаратів повітряного охолодження мають зовнішні ребра двох типів виконання, це:

- біметалічна труба, що складається із внутрішньої гладкою (сталеві або латунної) і зовнішньої (алюмінієвої) із торованим гвинтовим ребром (рис. 1.3, а);
- монометалічна (алюмінієва) труба з торованим гвинтовим (спіральним) ребром (рис. 1.3, б).

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		10

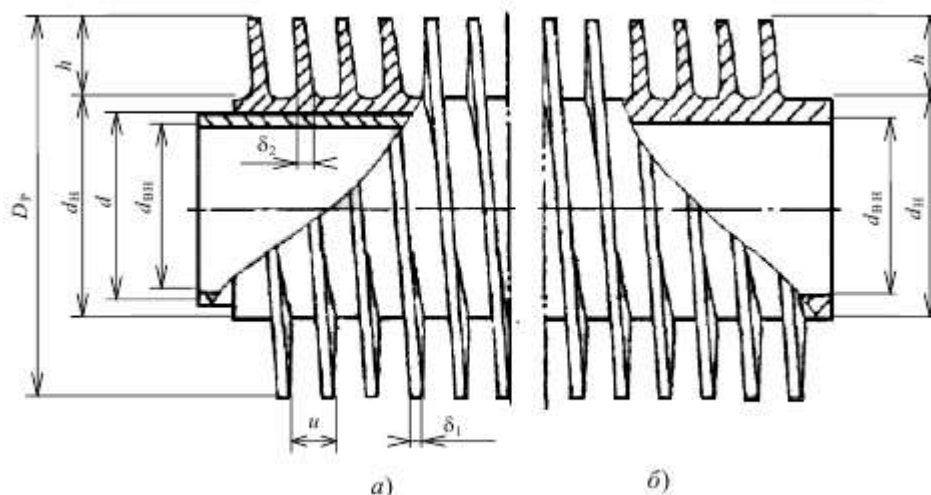


Рисунок 1.3 – Геометричні параметри оребреної труби:

а) біметалічна труба; б) монометалічна труба

Найбільшого поширення набули труби з коефіцієнтами оребрення  $\varphi = 9$  ( $\psi = 12$ ) і  $\varphi = 14,6$  ( $\psi = 19,6$ ); дещо рідше зустрічаються труби з  $\varphi = 20$  ( $\psi = 25,6$ ).

Другим необхідним елементом будь-якого типу АПО є **вентилятор**, який, обертаючись в порожнині колектора, нагнітає повітря через міжтрубний простір секцій. Значні витрати повітря в апаратах повітряного охолодження при порівняно невеликих статичних напорах (100–400 Па) забезпечуються осьовими вентиляторами з числом лопатей 4–8 і діаметром 0,8–6,0 м. Лопаті вентилятора закриті циліндричним колектором, який служить для кращої організації руху повітряного потоку. Колектор з'єднується з теплообмінними секціями за допомогою дифузора, форма якого сприяє вирівнюванню потоку повітря по перетину теплообмінної секції. Дифузор і колектор вентилятора кріпляться до рами, на якій встановлені теплообмінні секції. Вентилятор із приводом змонтований на окремій рамі.

**Опорні конструкції**, на яких монтуються елементи апарату, виконуються металевими або залізобетонними і містять поздовжні і поперечні опорні балки, що виконуються, як правило, зі стандартних двутаврів, стійки (зазвичай відрізки стандартних труб на опорних пластинах), косинки і ребра жорсткості. Стійки змонтовані на фундаменті і закріплені на ньому анкерними болтами.

У зв'язку зі змінним характером навантаження апарату, що залежить від технологічного режиму, температури і вологості повітря, вентилятори повинні мати можливість регулювання витрати повітря в широкому діапазоні. Регулювання повітряного охолодження сприяє економії енергії та сировини, збільшення термінів служби і підвищенню надійності роботи АПО, ефективному веденню технологічного процесу. Найсуттєвішою статтею експлуатаційних витрат АПО є електроенергія, споживана приводом вентилятора. При раціональному регулюванні економія електроенергії може досягати 60 % від споживаної двигунами при номінальному тепловому потоці.

Система регулювання повинна забезпечувати вимоги технології незалежно від зміни режиму роботи вентилятора. Регулювання витрати повітря проводиться декількома способами:

1. Зміною витрати охолоджуючого повітря, що подається в теплообмінні секції;
2. Підігріванням повітря (у зимовий період) на вході в АПО;
3. Перепуском частини технологічного потоку по байпасним лініям через регулюючі клапани;
4. Зволоженням охолоджуючого повітря і поверхні теплообміну, що дозволяє знизити температуру охолоджуючого повітря при високій його температурі в літній період.

Найбільш поширеним способом регулювання є зміна витрати охолоджуючого повітря, яке здійснюється:

- шляхом використання двошвидкісних електродвигунів, що дозволяє мати дві локальні величини витрати повітря і третю – мінімальну величину при зупиненому вентиляторі (у зимовий період при низькій температурі навколишнього повітря апарат може працювати з відключеним вентилятором, при цьому охолодження продукту відбувається за рахунок природної конвекції). Вважається, що регулювання витрати повітря зміною числа обертів є найбільш практичним і економічним способом.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		12

- шляхом плавного регулювання швидкості обертання вентилятора застосуванням електродвигуна з перемінним числом обертів, гідроприводу, гідромуфт, варіатора, коробки швидкостей і т. ін.

- шляхом регулювання кута повороту лопатей вентилятора (широко застосовуваний спосіб). Застосовуються колеса з кутом установки лопатей від 10 до 30°. Зміна кута проводиться вручну, при зупиненому вентиляторі, перевстановленням кожної лопаті окремо або автоматично при використанні пневматичного або електромеханічного приводу. Ступенева зміна кута повороту лопатей із зупинкою вентилятора передбачена для сезонного регулювання. Можливість автоматичної безперервної зміни кута повороту лопатей дозволяє здійснити оптимальне регулювання, при якому положення лопаті в кожен момент часу відповідає певній температурі повітря. Автоматичне регулювання дозволяє підтримувати вихідну температуру охолоджуваних продуктів із точністю до  $\pm 1$  °С.

- установкою спеціальних жалюзійних пристроїв, що розташовуються як до вентилятора, так і після теплообмінних секцій. Жалюзійні пристрої можуть забезпечуватися ручним або пневматичним приводом. При повороті жалюзійних елементів зменшується витрата повітря і збільшується діапазон робочих режимів. Незважаючи на те, що використання жалюзі є найпоширенішим способом регулювання витрати повітря, воно не забезпечує економії енергетичних витрат, оскільки створюється додатковий аеродинамічний опір на шляху повітря, навіть при повному відкритті регулювального пристрою. Крім того, таке регулювання супроводжується зниженням ККД вентилятора. В окремих випадках потужність, споживана електродвигуном з мережі, може знижуватися на 10–20 %, але не виключено її збільшення.

У сучасних конструкціях АПО застосовують спільне регулювання декількома способами, поєднання яких дає можливість забезпечити економію електроенергії та стабілізацію вихідної температури.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		13

Вибір стандартизованого АПО, як і любого іншого теплообмінника, здійснюється за величиною площі поверхні теплопередачі [6–9].

Поверхня теплопередачі розраховується за формулою [6]:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{СЕР}}}, \quad (1.1)$$

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

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

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

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

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{\text{СТ}}}{\lambda_{\text{СТ}}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (1.2)$$

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

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

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

Орієнтовні значення коефіцієнтів теплопередачі та тепловіддачі наведені у відповідних таблицях [9].

Середня різниця температур теплоносіїв дорівнює [9]:

$$\Delta t_{\text{СЕР}} = \frac{\Delta t_B - \Delta t_M}{\ln \frac{\Delta t_B}{\Delta t_M}}, \quad (1.3)$$

де  $\Delta t_B$  і  $\Delta t_M$  – відповідно більша і менша різниці температур теплоносіїв на кінцях теплообмінника.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
						14
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

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  $t_{СЕР} = (t_1 + t_2) / 2$  [8].

Для теплоносія, у якого  $t_2/t_1 > 2$  середню температуру розраховують за формулою [8]:

$$t_{СЕР} = \theta_{СЕР} \pm \Delta t_{СЕР}. \quad (1.4)$$

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:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad (1.5)$$

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

$l$  – визначальний геометричний розмір, м;

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

Критерій Рейнольдса характеризує гідродинамічний режим руху теплоносія:

$$Re = \frac{w \cdot l \cdot \rho}{\mu}, \quad (1.6)$$

де  $w$  – швидкість теплоносія, м/с;

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

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

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
						15
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Критерій Прандтля характеризує теплофізичні властивості теплоносія:

$$Pr = \frac{\mu \cdot c}{\lambda}; \quad (1.7)$$

де  $c$  – питома теплоємність теплоносія, Дж/(кг·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  $Re$ ,  $Pr$  є визначеними, а критерій  $Nu$  – невизначеним (тобто залежить від інших критеріїв подібності) [8].

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

– для ламінарного режиму

$$Nu = 0,74 \cdot (Re \cdot Pr)^{0,2} \cdot (Gr \cdot Pr)^{0,1}, \quad (1.8)$$

де  $Gr$  – критерій Грасгофа, який характеризує режим руху теплоносія при вільній конвекції.

– для перехідного режиму

$$Nu = 0,008 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,43}; \quad (1.9)$$

– для турбулентного режиму

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{0,9} \cdot Pr^{0,3}. \quad (1.10)$$

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		16



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

Стандартизовані АПО призначені для роботи на відкритому повітрі в технологічних процесах хімічної, нафтопереробної, нафтохімічної і газової промисловості для охолодження та конденсації пароподібних, газоподібних і рідких середовищ з температурою від  $-40^{\circ}\text{C}$  до  $+400^{\circ}\text{C}$  і під абсолютним тиском до 12 МПа [8].

У проектуваному апараті приймаємо протитечійний рух середовищ, оскільки при цьому забезпечується: найбільший середній температурний напір, що пов'язано зі скороченням розміру поверхні теплопередачі; найкраще використання середовищ, в плані отримання найбільшої зміни температур теплоносіїв при мінімальній їх витраті.

Для конденсатора приймаємо оребрені біметалічні труби (рис. 1.3, а) з коефіцієнтом оребрення  $\phi = 9$ .

Вибираємо апарат повітряний горизонтальний (АПГ), який складається з трьох незалежних секцій з трубами довжиною 4 м або 8 м і оснащений одним або двома вентиляторами діаметром 2,8 м.

Теплообмінна секція (рис. 1.4) являє собою пучок оребрених труб, розташованих у шаховому порядку за ходом руху охолоджуючого повітря.

Кінці труб закріплені в трубній решітці та закриті кришками з отворами для приєднання зовнішньої трубопроводної обв'язки. У залежності від кількості ходів продукту – кришки виконуються із певним числом перегородок.

Коефіцієнт теплопередачі завжди менше меншого значення коефіцієнта тепловіддачі, тому при проектуванні теплообмінного апарату необхідно прагнути до збільшення меншого значення коефіцієнта тепловіддачі [8].

Аеродинамічні елементи АПО складаються з обичайки вентилятора, дифузора і колектора. Вентилятори з приводом від електродвигуна призначені для нагнітання охолоджуючого повітря в теплообмінні секції.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		17

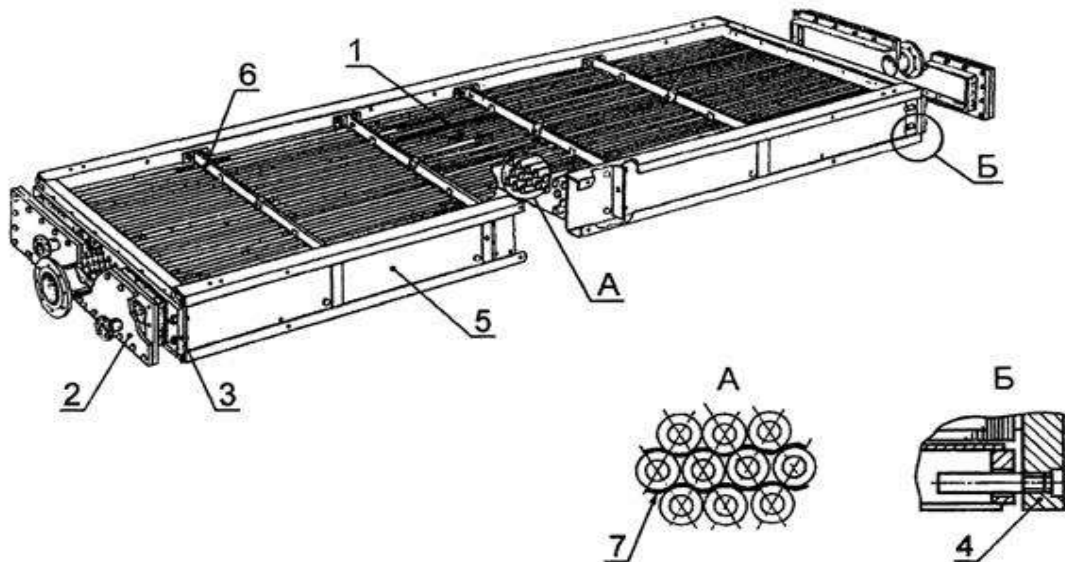


Рисунок 1.4 – Конструкція теплообмінної секції:

1 – трубний пучок; 2 – кришка камери; 3 – нерухома трубна дошка; 4 – рухома трубна дошка; 5 – бокова стінка; 6 – балка; 7 – дистанційний елемент

Конструкції, на яких монтуються теплообмінні секції, виконуються металевими або залізобетонними.

За способом примусової подачі охолоджуючого повітря на теплообмінну поверхню АПО поділяють на два типи: нагнітальний і витяжний. У даній кваліфікаційній роботі спроектовано нагнітальний АПО (рис. 1.5).

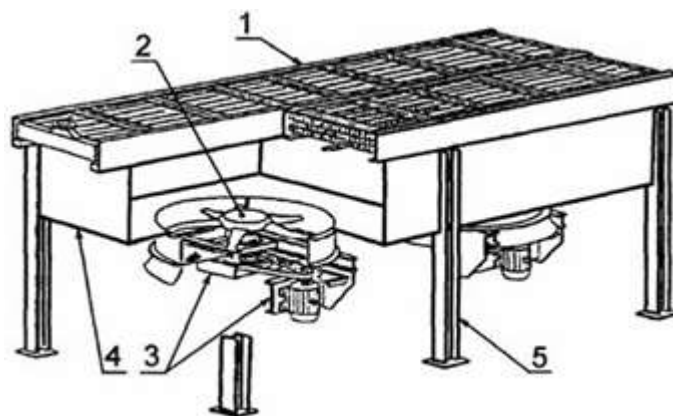


Рисунок 1.5 – Конструкція АПО нагнітального типу:

1 – теплообмінна секція; 2 – колесо вентилятора; 3 – привід вентилятора;  
4 – дифузор з колектором; 5 – металоконструкція

**Принцип роботи АПО** полягає у наступному. Теплопередача в апаратах повітряного охолодження відбувається за принципом протитоку. Вентилятором повітря проганяється через міжтрубний простір, тобто охолоджується зовнішня поверхня пучка труб. Цільовим процесом є охолодження з подальшою конденсацією вуглеводневого середовища, який рухається в середині трубок. Для рівномірного розподілення повітря по усій охолоджуваній поверхні труб – вентилятори з'єднується із трубними пучками за допомогою напрямних дифузорів.

Основними вимогами, яким повинні відповідати хімічні апарати, є механічна надійність, довговічність, конструктивна досконалість, простота виготовлення, зручність транспортування, монтажу та експлуатації [12–14].

Для виготовлення хімічних апаратів повинні використовуватися конструкційні матеріали, швидкість корозії яких не перевищує 0,1–0,5 мм/рік. Під швидкістю корозії металів розуміють проникнення корозії в глибину металу, яка розраховується з даних втрати маси після видалення продуктів корозії [12].

Здійснимо підбір конструкційних матеріалів для виготовлення основних деталей та вузлів АПО. Підбір здійснюємо, враховуючи значення температури та тиску, а також особливості робочих середовищ [13]:

- внутрішні труби – сталь 10Г2;
- матеріал оребрення – алюмінієвий сплав АД1М;
- трубні решітки – сталь 09Г2С;
- кришки – сталь ВСт3пс.

Нижче наведено властивості та призначення вибраних сталей [14].

**Сталь 10Г2** – труби. Призначення – різні деталі, які працюють при температурі від  $-70^{\circ}\text{C}$  під тиском. Технологічні властивості: температура кування,  $^{\circ}\text{C}$ : початку 1250, кінця 780–800. Заготовки з перетином до 100 мм охолоджуються на повітрі. Зварюваність – зварюється без обмежень; способи зварювання – РДЗ, АДЗ під флюсом і газовим захистом, ЕШЗ.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		19

**Сталь 09Г2С** – лист товстий. Призначення – різні деталі зварних металоконструкцій, які працюють при температурі від  $-70$  до  $+425^{\circ}\text{C}$  під тиском. Технологічні властивості сталі: температура кування,  $^{\circ}\text{C}$ : початку 1250, кінця 850. Зварюваність – зварюється без обмежень; способи зварювання: РДЗ, АДЗ під флюсом і газовим захистом, ЕШЗ. Різання – у нормалізованому, відпущеному стані  $\sigma_B = 520$  МПа,  $K_{V \text{ б. ст.}} = 1,0$ ;  $K_{V \text{ тв. спл.}} = 1,6$ . Схильність до відпускнуї крихкості – не схильна. Флокеночутливість – не чутлива.

**Сталь ВСтЗпс.** Призначення – елементи зварних та незварних конструкцій і деталей, які працюють при позитивних температурах. Технологічні властивості: температура кування,  $^{\circ}\text{C}$ : початку 1300, кінця 750; охолодження на повітрі. Зварюваність – зварюється без обмежень; способи зварювання – РДЗ, АДЗ під флюсом і газовим захистом, ЕШЗ і КТЗ; для товщин понад 36 мм рекомендується підігрів і подальша термообробка. Різання – у гарячекатаному стані при НВ 124 і  $\sigma_B = 400$  МПа  $K_{V \text{ б. ст.}} = 1,6$ ;  $K_{V \text{ тв. спл.}} = 1,8$ . Флокеночутливість – не чутлива. Схильність до відпускнуї крихкості – не схильна.

					<i>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		20

## 2 Технологічні розрахунки процесу і апарата

### 2.1 Технологічні розрахунки

Розрахунок теплового навантаження АПО проводимо за методикою [9].

Щоб не ускладнювати розрахунок визначенням ентальпій кожного компонента вуглеводневої суміші – вважаємо суміш у будь-якій фазі за один компонент із молекулярною масою, яка дорівнює молекулярній масі суміші.

Також, аналізуючи компонентний склад вуглеводневих парів, які виходять через верхній штуцер атмосферної ректифікаційної колони (див. рис. 1.1), бачимо, що суміш на 98,3 % складається із нормального бутану та ізобутану. У завданні до кваліфікаційної роботи задано тиск  $P = 0,42$  МПа. При цьому значенні тиску температура конденсації бутану складає  $t_{1К} = 41^{\circ}\text{C}$ , а тому для подальших розрахунків приймаємо припущення, що вуглеводнева суміш надходить в АПО при температурі конденсації.

Таким чином, теплове навантаження проектованого теплообмінного апарату визначається за рівнянням:

$$Q = G \cdot r, \quad (2.1)$$

де  $G$  – витрата дистилляту, кг/с;

$r$  – питома теплота конденсації парів бутану, кДж/кг.

$$Q = \frac{4500}{3600} \cdot 400 = 500 \text{ кВт}.$$

Максимальна (орієнтовна) поверхня теплообміну складе:

$$F_{\max} = \frac{Q}{q}, \quad (2.2)$$

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		21

де  $q$  – теплонапруженість апарату, Вт/м<sup>2</sup>; за табличними даними [9] у випадку конденсації одного або декількох компонентів, при  $\Delta t = t_{1K} - t_{2П} = 41 - 20 = 21^\circ\text{C}$ ,  $q = 600$  Вт/м<sup>2</sup>.

$$F_{\max} = \frac{500 \cdot 10^3}{600} = 833 \text{ м}^2.$$

Вибираємо стандартизований апарат типу АПГ таким чином, щоб табличне значення зовнішньої оребреної поверхні апарату  $F_T$  було більшим за отримане значення  $F_{\max}$ :  $F_T = 875 \text{ м}^2 > F_{\max} = 833 \text{ м}^2$ .

Вибраний теплообмінний апарат має таку характеристику: повна зовнішня оребрена поверхня апарату  $875 \text{ м}^2$ ; довжина теплообмінних труб  $4 \text{ м}$ ; кількість секцій  $3$ ; число труб в одній секції  $94$ ; число труб в апараті  $282$ ; коефіцієнт оребрення труб  $9$ ; кількість рядів труб в секції  $4$ ; число ходів по трубам  $4$ ; сумарна площа найбільш вузького міжтрубного перетину  $5,35 \text{ м}^2$ .

За аеродинамічною характеристикою вентилятора [10] визначаємо (стандартні умови):

- об'ємну витрату повітря  $V_{П0} = 240000 \text{ м}^3/\text{год.}$ ;
- напір  $P_{П0} = 23 \cdot 9,81 = 225,63 \text{ Па}$ ;
- коефіцієнт корисної дії (к.к.д.)  $\eta = 0,68$ .

Для проєктованого апарату вибираємо осьовий вентилятор ЦАГІ КК – 2М із кутом установки лопатей  $17^\circ$ , частотою обертання колеса  $7,1 \text{ об/с}$  і пропелером діаметром  $2,8 \text{ м}$ .

Об'ємна витрата повітря, його густина і напір вентилятора при робочих умовах ( $t = t_{2H} = 20^\circ\text{C}$ ;  $P = P_0 = 101,3 \text{ кПа}$ ):

$$V_{П} = V_{П0} \cdot \frac{T \cdot P_0}{P \cdot T_0}; \quad (2.3)$$

$$V_{П} = 240000 \cdot \frac{293}{273} = 258 \cdot 10^3 \frac{\text{м}^3}{\text{год.}}$$

					<i>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		22

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{P \cdot T_0}{T \cdot P_0}, \quad (2.4)$$

де  $\rho_0$  – густина повітря при температурі  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ ;  $\rho_0 = 1,293 \text{ кг/м}^3$  [11].

$$\rho_{\Pi} = 1,293 \cdot \frac{273}{293} = 1,205 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3};$$

$$P_{\Pi} = P_{\Pi 0} \cdot \frac{\rho}{\rho_0}; \quad (2.5)$$

$$P_{\Pi} = 225,63 \cdot \frac{1,205}{1,293} = 210 \text{ Па}.$$

Масова витрата повітря (за одним вентилятором) складе:

$$G_{\Pi} = V_{\Pi} \cdot \rho_{\Pi}; \quad (2.6)$$

$$G_{\Pi} = 258 \cdot 10^3 \cdot 1,205 = 311 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{год.}}$$

Із рівняння теплового балансу, кінцева температура повітря дорівнює:

$$t_{2\text{к}} = t_{2\Pi} + \frac{Q}{c_{\Pi} \cdot G_{\Pi}}, \quad (2.7)$$

де  $t_{2\Pi}$  – початкова температура повітря,  $^\circ\text{C}$ ;

$c_{\Pi}$  – теплоємність повітря за робочих умов;  $c_{\Pi} = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  [11].

$$t_{2\text{к}} = 20 + \frac{500 \cdot 3600}{1,005 \cdot 311 \cdot 10^3} = 26^\circ\text{C}.$$

					<i>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
						23
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Отримане значення кінцевої температури повітря задовольняє умову:

$$t_{2K} < t_{1K} (27^{\circ}\text{C} < 41^{\circ}\text{C}).$$

Коефіцієнт теплопередачі знаходимо за рівнянням [7]:

$$K = \frac{1}{\psi \cdot \frac{1}{\alpha_{\Gamma}} + \frac{1}{\alpha_{\text{X}}} + r_3}, \quad (2.8)$$

де  $\psi$  – коефіцієнт збільшення поверхні;  $\psi = 12$ ;

$\alpha_{\Gamma}$  – коефіцієнт тепловіддачі з боку дистилляту,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$\alpha_{\text{X}}$  – приведений коефіцієнт тепловіддачі з боку повітря, який також враховує термічний опір металу,  $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;

$r_3$  – сумарні термічні опори можливих забруднень теплообмінної поверхні;  
 $r_3 = 0,0002 (\text{м}^2 \cdot \text{К})/\text{Вт}$  [7].

Коефіцієнт тепловіддачі з боку дистилляту:

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{\text{Nu} \cdot \lambda_{\text{СЕР1}}}{d_1}, \quad (2.9)$$

де  $\text{Nu}$  – критерій Нусельта;

$\lambda_{\text{СЕР1}}$  – коефіцієнт теплопровідності дистилляту,  $\text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ;

$d_1$  – внутрішній діаметр труби;  $d_1 = 0,021 \text{ м}$ .

Далі знаходимо фізичні параметри дистилляту при його середній температурі  $t_{\text{СЕР1}} = 41^{\circ}\text{C}$ :

– густина

$$\rho_{\text{СЕР1}} = 1000 \cdot [\rho_4^{20} - \gamma \cdot (t_{\text{СЕР1}} - 20)]; \quad (2.10)$$

$$\rho_{\text{СЕР1}} = 1000 \cdot [0,580 - 107,4 \cdot 10^{-5} \cdot (41 - 20)] = 557 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}.$$

					<i>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		24



– коефіцієнт теплопровідності

$$\lambda_{\text{СЕР1}} = \left( \frac{0,422 - 0,000228 \cdot t_{\text{СЕР1}}}{\rho_{15}^{15}} \right) \cdot \frac{1000}{3600}; \quad (2.11)$$

$$\lambda_{\text{СЕР1}} = \left( \frac{0,422 - 0,000228 \cdot 41}{0,585} \right) \cdot \frac{1000}{3600} = 0,20 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}.$$

– теплоємність

$$c_{\text{СЕР1}} = \frac{1,687 + 0,00339 \cdot t_{\text{СЕР1}}}{\sqrt{\rho_{15}^{15}}}; \quad (2.12)$$

$$c_{\text{СЕР1}} = \frac{1,687 + 0,00339 \cdot 41}{\sqrt{0,585}} = 2,39 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

– кінематична в'язкість

$$v_{\text{СЕР1}} = \frac{\mu}{\rho_{\text{СЕР1}}}, \quad (2.13)$$

де  $\mu$  – динамічний коефіцієнт в'язкості;  $\mu = 0,12 \cdot 10^{-3}$  Па·с [11].

$$v_{\text{СЕР1}} = \frac{0,12 \cdot 10^{-3}}{557} = 2,1 \cdot 10^{-7} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Далі визначимо мінімальну швидкість руху дистилляту в трубах, за якої забезпечується стійкий турбулентний потік, тобто  $Re > 10^4$ :

$$w_{\min} = \frac{10^4 \cdot v_{\text{СЕР1}}}{d_1}; \quad (2.14)$$

					<i>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		25

$$w_{\min} = \frac{10^4 \cdot 2,1 \cdot 10^{-7}}{0,021} = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Швидкість дистилляту:

$$w_1 = \frac{n_x \cdot V}{s_1 \cdot n_c}, \quad (2.15)$$

де  $n_x$  – число ходів по трубам;  $n_x = 4$ ;

$V$  – об'ємна витрата дистилляту (за середньої температури),  $\text{м}^3/\text{год.}$ ;

$s_1$  – загальна площа внутрішнього трубного простору,  $\text{м}^2$ ;

$n_c$  – число секцій;  $n_c = 3$ .

Об'ємна витрата дистилляту за середньої температури:

$$V = \frac{G}{\rho_{\text{сеп1}}}; \quad (2.16)$$

$$V = \frac{4500}{557} = 8,1 \frac{\text{м}^3}{\text{год.}} = 2,25 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Загальна площа внутрішнього трубного простору:

$$s_1 = n \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}, \quad (2.17)$$

де  $n$  – число труб в одній секції;  $n = 94$ .

$$s_1 = 94 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,021^2}{4} = 0,032 \text{ м}^2.$$

					<i>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		26

Знаходимо швидкість дистилляту за рівнянням (2.15):

$$w_1 = \frac{4 \cdot 2,25 \cdot 10^{-3}}{0,032 \cdot 3} = 0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Критерій Рейнольдса у трубному просторі:

$$\text{Re} = \frac{w_1 \cdot d_1}{\nu_{\text{СЕР1}}}; \quad (2.18)$$

$$\text{Re} = \frac{0,1 \cdot 0,021}{2,1 \cdot 10^{-7}} = 10000.$$

Для визначення коефіцієнта тепловіддачі у трубах при турбулентному режимі використовуємо критеріальне рівняння (1.10):

$$\text{Nu} = 0,023 \cdot 10000^{0,9} \cdot 1,4^{0,3} = 101.$$

Коефіцієнт тепловіддачі з боку дистилляту визначаємо за (2.9):

$$\alpha_{\Gamma} = \frac{101 \cdot 0,20}{0,021} = 965 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Приведений коефіцієнт тепловіддачі з боку повітря [7]:

$$\alpha_x = 61,6 \cdot \lg w - 0,035 \cdot t_{\text{СЕР2}} - 5,81, \quad (2.19)$$

де  $w$  – швидкість повітря у найвужчому перерізі міжтрубного простору, м/с;  
 $t_{\text{СЕР2}}$  – середня температура повітря в апараті, °С.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		27

$$t_{\text{СЕР2}} = \frac{t_{2\Pi} + t_{2\text{К}}}{2}; \quad (2.20)$$

$$t_{\text{СЕР2}} = \frac{20 + 26}{2} = 23^{\circ}\text{C}.$$

Швидкість повітря у найвужчому перерізі міжтрубного простору:

$$w = \frac{V_{\Pi}}{s_y}, \quad (2.21)$$

де  $V_{\Pi}$  – об'ємна витрата повітря,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$s_y$  – сумарна площа найбільш вузького міжтрубного перетину;  $s_y = 5,35 \text{ м}^2$ .

$$w = \frac{72}{5,35} = 13,5 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Знаходимо приведенний коефіцієнт тепловіддачі з боку повітря за (2.19):

$$\alpha_x = 61,6 \cdot \lg 13,5 - 0,035 \cdot 23 - 5,81 = 63 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Визначаємо коефіцієнт теплопередачі за (2.8):

$$K = \frac{1}{12 \cdot \frac{1}{965} + \frac{1}{63} + 0,0002} = 35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Температурна схема руху теплоносіїв представлена на рис. 2.1.

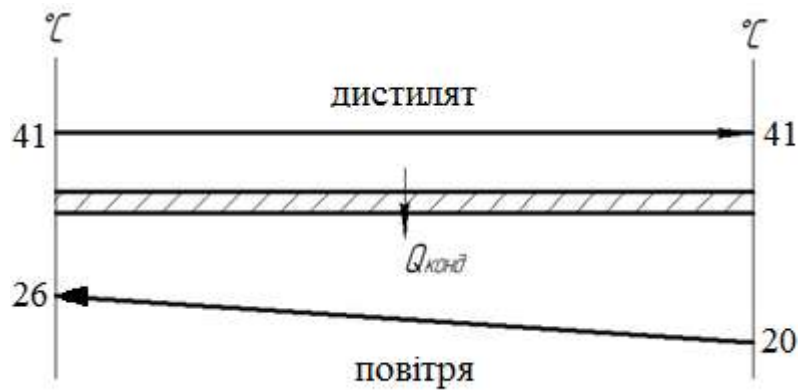


Рисунок 2.1 – Температурна схема процесу конденсації дистиляту

Середня різниця температур при  $\frac{\Delta t_{\text{Б}}}{\Delta t_{\text{М}}} = \frac{21}{14} = 1,5 < 2$  [9]:

$$\Delta t_{\text{СЕР}} = \frac{\Delta t_{\text{Б}} + \Delta t_{\text{М}}}{2}, \quad (2.22)$$

де  $\Delta t_{\text{Б}}$  і  $\Delta t_{\text{М}}$  – відповідно більша і менша різниці температур між потоками на вході та виході з апарату, °С.

$$\Delta t_{\text{Б}} = t_{1\text{К}} - t_{2\text{П}} = 41 - 20 = 21^\circ\text{С};$$

$$\Delta t_{\text{М}} = t_{1\text{П}} - t_{2\text{К}} = 41 - 26 = 15^\circ\text{С};$$

$$\Delta t_{\text{СЕР}} = \frac{21 + 15}{2} = 18^\circ\text{С}.$$

## 2.2 Конструктивні розрахунки

Поверхня теплообміну:

$$F_{\text{П}} = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{СЕР}}}; \quad (2.23)$$

$$F_p = \frac{500 \cdot 10^3}{35 \cdot 18} = 792 \text{ м}^2.$$

Коефіцієнт запасу теплообмінної поверхні:

$$\beta = \frac{F_T - F_p}{F_p} \cdot 100\%; \quad (2.24)$$

$$\beta = \frac{875 - 792}{792} \cdot 100\% = 10,5\%.$$

Визначаємо діаметри штуцерів для введення парів і виходу конденсату:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (2.25)$$

де  $V$  – об'ємна витрата теплоносія,  $\text{м}^3/\text{с}$ ;

$w$  – швидкість руху теплоносія,  $\text{м}/\text{с}$ ;

Для парів  $w_{\Pi} = 5 \div 25 \text{ м}/\text{с}$ , а для рідкого дистилляту  $w_p = 0,5 \div 2,5 \text{ м}/\text{с}$  [9].

Приймаємо  $w_{\Pi} = 12 \text{ м}/\text{с}$ ,  $w_p = 0,8 \text{ м}/\text{с}$

Діаметр штуцера для введення парів дистилляту:

$$V_1 = \frac{4500}{3600 \cdot 1,6} = 0,78 \frac{\text{м}^3}{\text{с}};$$

$$d_A = \sqrt{\frac{0,78}{0,785 \cdot 12}} = 0,288 \text{ м}.$$

Приймаємо  $D_y = 300 \text{ мм}$  за [4].

					<i>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		30

Діаметр штуцера для виведення конденсату:

$$d_b = \sqrt{\frac{2,25 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,8}} = 0,060 \text{ м.}$$

Приймаємо  $D_y = 65$  мм за [4].

### 2.3 Аеродинамічний опір апарата

Аеродинамічний опір пучка труб [4]:

$$\Delta P = 9,7 \frac{\rho_{\Pi}}{g} (w_y)^2 n_p \left( \frac{S_p}{d_3} \right)^{-0,72} \cdot Re^{-0,24}, \quad (2.26)$$

де  $\rho_{\Pi}$  – густина повітря при його початковій температурі;  $\rho_{\Pi} = 1,197$  кг/м<sup>3</sup>  
[11];

$w_y$  – швидкість у стислому перерізі оребреного пучка труб;  $w_y = 13,5$  м/с;

$n_p$  – число горизонтальних рядів труб в пучку;  $n_p = 4$ ;

$S_p$  – крок ребер;  $S_p = 0,0035$  м;

$d_3$  – зовнішній діаметр труби;  $d_3 = 0,028$  м;

$Re_3$  – критерій Рейнольдса, віднесений до зовнішнього діаметру труби.

$$Re_3 = \frac{w_y \cdot d_3}{\nu_{\Pi}}, \quad (2.27)$$

де  $\nu_{\Pi}$  – кінематична в'язкість повітря при  $t_{сер2} = 23^{\circ}\text{C}$ ;  $\nu_{\Pi} = 16 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с  
[11].

$$Re = \frac{13,5 \cdot 0,028}{16 \cdot 10^{-6}} = 23625.$$

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		31

Аеродинамічний опір пучка труб визначаємо за (2.27):

$$\Delta P = 9,7 \cdot \frac{1,197}{9,81} \cdot 13,5^2 \cdot 4 \cdot \left( \frac{0,0035}{0,028} \right)^{-0,72} \cdot 23625^{-0,24} = 345 \text{ Па}.$$

Обраний ранішк вентилятор ЦАГІ КК – 2М із запасом за продуктивністю і напором забезпечить роботу АПО.

Витрата енергії для вентилятора:

$$N_E = 0,00981 \cdot \frac{V_{\Pi} \cdot \Delta P}{g \cdot \eta}, \quad (2.28)$$

де  $V_{\Pi}$  – сумарна об'ємна витрата повітря;  $V_{\Pi} = 71,67 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  
 $\eta$  – к.к.д. вентилятора;  $\eta = 0,68$ .

$$N_E = 0,00981 \cdot \frac{71,67 \cdot 345}{9,81 \cdot 0,68} = 36,4 \text{ кВт}.$$

При виборі електродвигуна розрахункову потужність слід збільшити на 10 % для забезпечення пуску двигуна.

Дійсна потужність двигуна:

$$N_{\text{Е.д}} = 1,1 \cdot N_E; \quad (2.29)$$

$$N_{\text{Е.д}} = 1,1 \cdot 36,4 = 40 \text{ кВт}.$$

Установча потужність електродвигуна становить 55 кВт.

Коефіцієнт використання установчої потужності:

$$\varphi = \frac{N_{\text{Е.д}}}{N_{\text{уст}}}; \quad (2.30)$$

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		32



$$\varphi = \frac{40}{55} = 0,73.$$

Вибираємо тип електродвигуна 4А250М6У3 із потужністю 55 кВт, синхронною частотою обертання 1000 об/хв. [4], де:

4 – порядковий номер серії;

А – тип двигуна (асинхронний);

250 мм – висота осі обертання;

М – позначення, яке відноситься до установчого розміру за тривалістю станини;

6 – число полюсів;

У3 – двигун призначений для експлуатації в зоні помірного клімату.

## 2.4 Вибір допоміжного обладнання

**Розрахунок і вибір компресорного агрегату КА [10].** Відповідно до технологічної схеми (рис. 1.1) використовується один компресорний агрегат. Тобто, для розрахунку компресора необхідно визначити величину об'ємної витрати вуглеводнів  $Q$  (л/хв):

$$Q = \frac{g_f}{\rho_f}; \quad (2.31)$$

$$Q = \frac{1300}{35} = 37 \text{ м}^3/\text{год.} = 620 \text{ л/хв.}$$

Широко поширеною помилкою на практиці є неправильне розуміння величини продуктивності компресора. У каталогах будь-яких фірм-виробників компресорів під цією величиною розуміється максимальне споживання повітря на вході компресора, тобто, цю величину можна застосовувати як продуктивність компресора на виході, оскільки вона не враховує його ККД і конструктивні особливості.

					<b>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</b>	<i>Лист</i>
						<b>33</b>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		

Продуктивність компресора А (л/хв) визначаємо за рівнянням [10]:

$$A = Q \cdot \frac{\beta}{\eta}, \quad (2.32)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує конструктивні особливості і надійність різних груп компресорів;

$\eta$  – коефіцієнт корисної дії (ККД) компресора.

Довідкові значення  $\beta$  і  $\eta$  для роботи в діапазоні заданого робочого тиску в пневмосистемі наведені у табл. 2.1 [10].

Таблиця 2.1 – Значення  $\beta$  і  $\eta$  у залежності від конструкції компресора

Конструкція компресора	$\beta$	$\eta$
Напівпрофесійні	1,7	0,55
Професійні	1,5	0,65
ВК і HEAVY DUTY (особливо навантажені)	1,3	0,75
Роторні	1	1

Вибираємо професійний компресор, для якого продуктивність складе:

$$A = 620 \cdot \frac{1,5}{0,65} = 1430 \text{ л/хв.}$$

На промислових установках знаходять застосування поршневі (прямоточні і непрямоточні), ротаційні та гвинтові компресорні агрегати.

Слід відзначити, що традиційні поршневі компресори прекрасно себе зарекомендували: прості, надійні, не потребують кваліфікованого персоналу для їх обслуговування, невибагливі. Головне не допускати грубого порушення інструкції і своєчасно проводити заміну масла, слив конденсату, профілактичне обслуговування.

Маючи розрахункову величину продуктивності, за [10] вибираємо поршневий компресор марки ФУУ30 із такими характеристиками:

– кінцевий тиск (максимальний), МПа	4
– діаметр циліндра / хід поршня, мм	76,6 / 55
– теоретична об'ємна подача, л/хв ( $\text{м}^3/\text{с}$ )	1000 (0,0167)
– холодопродуктивність, кВт	62
– споживана потужність, кВт	21,5

**Розрахунок і вибір насосу  $\text{H}_2$  для подачі флегмового зрошення в атмосферну колону [10].**

Для всмоктуючого і напірного трубопроводів приймаємо однакову швидкість течіння рідини, яка дорівнює  $w = 2 \text{ м/с}$ .

Діаметр трубопроводу визначаємо за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (2.33)$$

де  $V$  – об'ємна витрата флегмового зрошення, що подається в колону.

$$V = \frac{3200}{3600 \cdot 670} = 1,33 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$d = \sqrt{\frac{1,33 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 2}} = 0,029 \text{ м}.$$

Приймаємо стандартизований діаметр трубопроводу 32 мм.

Визначаємо критерій Рейнольдса для рідини у трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_p}{\mu}; \quad (2.34)$$

$$Re = \frac{2 \cdot 0,032 \cdot 670}{2,97 \cdot 10^{-4}} = 130842,$$

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

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,032} = 0,0069;$$

$$\frac{1}{e} = 145; 560 \cdot \frac{1}{e} = 81200; 10 \cdot \frac{1}{e} = 1450;$$

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

Для зони, що є автомодельною по відношенню до Re:

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}; \quad (2.35)$$

$$\lambda = 0,11 \cdot 0,0069^{0,25} = 0,032.$$

Визначаємо суму коефіцієнтів місцевих опорів окремо для всмоктуючої та напірної 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 напірної лінії: 1) вентиль прямоточний  $\xi_1 = 0,65$ ; 2) 3 коліна з кутом  $90^\circ$   $\xi_2 = 3 \cdot 1,1 = 3,3$ ; 3) вихід з труби  $\xi_3 = 1$ .

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
						36
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

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

$$\Sigma \xi = 0,65 + 3,3 + 1 = 4,95.$$

Втрату напору у всмоктуючій лінії знаходимо за рівнянням:

$$h_{П.ВС.} = \left( \lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (2.36)$$

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

$$h_{П.ВС.} = \left( 0,032 \cdot \frac{4}{0,032} + 2,7 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,37 \text{ м.}$$

Втрата напору в напірній лінії:

$$h_{П.НАГ.} = \left( 0,032 \cdot \frac{7}{0,032} + 4,95 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 2,44 \text{ м.}$$

Загальні втрати напору:

$$h_{П.} = h_{П.ВС.} + h_{П.НАГ.}; \quad (2.37)$$

$$h_{П.} = 1,37 + 2,44 = 3,81 \text{ м.}$$

Напір насосу знаходимо за рівнянням:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_p \cdot g} + H_{Г.} + h_{П.}, \quad (2.38)$$

де  $H_{Г.}$  – геометрична висота піднімання рідини.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
						37
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$(P_2 - P_1)$  – різниця тисків у апараті та в ємності, із якої подається рідина; у нашому випадку ця різниця дорівнює  $(P_2 - P_1) = 0,28 - 0,17 = 0,11$  МПа;

$$H = \frac{0,11 \cdot 10^6}{670 \cdot 9,81} + 3 + 3,81 = 23,5 \text{ м.}$$

Корисну потужність насосу визначаємо за рівнянням:

$$N_K = \rho_p \cdot g \cdot V \cdot H, \quad (2.39)$$

$$N_K = 670 \cdot 9,81 \cdot 1,33 \cdot 10^{-3} \cdot 23,5 = 206 \text{ Вт.}$$

Потужність, яку повинен розвинути електродвигун насосу на вихідному валу при встановленому режимі роботи:

$$N = \frac{N_K}{\eta_{пер} \cdot \eta_n}, \quad (2.40)$$

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

$$N = \frac{206}{1 \cdot 0,6} = 343 \text{ Вт.}$$

Вибираємо відцентровий насос марки НМШ 8-25-6,3/25-5 із наступними параметрами:

- об'ємна подача насосу 6,3 м<sup>3</sup>/год.;
- напір насосу 25 м;
- споживана потужність 7,5 кВт;
- частота обертання 1450 об/хв.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		38

### 3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність

Розрахункова товщина стінки плоскої кришки, яка працює під внутрішнім тиском [15]:

– при розрахункових параметрах

$$s_{IR} = K \cdot K_0 \cdot D_R \cdot \sqrt{\frac{P}{[\sigma] \cdot \varphi}}, \text{ мм} \quad (3.1)$$

де  $K$  – коефіцієнт, який визначається у залежності від типу з'єднання кришки із корпусом; за [15]  $K = 0,41$ ;

$K_0$  – коефіцієнт ослаблення кришки;

$D_R$  – розрахункова довжина кришки; за [4]  $D_R = D = 1300$  мм;

$\varphi$  – коефіцієнт міцності зварного шва;  $\varphi = 1,0$  [15];

$[\sigma]$  – допустима напруга у робочому стані.

$$[\sigma] = \sigma^* \cdot \eta, \text{ МПа} \quad (3.2)$$

де  $\sigma^*$  – нормативна допустима напруга при розрахунковій температурі;

$\sigma^* = 130$  МПа за [15] – для сталі ВСт3пс при температурі  $40^\circ\text{C}$ ;

$\eta$  – поправний коефіцієнт, який враховує вид заготовки;  $\eta = 1,0$  [15].

$$[\sigma] = 130 \cdot 1,0 = 130 \text{ МПа.}$$

Коефіцієнт ослаблення для кришки, яка має кілька отворів:

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{2 \cdot d_A}{D_R}\right)^3}{1 - \frac{2 \cdot d_A}{D_R}}}, \quad (3.3)$$

Беремо до уваги отвори під штуцер А, оскільки за діаметром вони більші.

$$K_0 = \sqrt{\frac{1 - \left(\frac{2 \cdot 300}{1300}\right)^3}{1 - \frac{2 \cdot 300}{1300}}} = 1,29.$$

Визначаємо розрахункову товщину стінки плоскої кришки при розрахункових параметрах за формулою (3.1):

$$s_{1R} = 0,41 \cdot 1,29 \cdot 1300 \cdot \sqrt{\frac{0,42}{130 \cdot 1,0}} = 39 \text{ мм.}$$

– при гідравлічному випробуванні

$$s_{1RB} = K \cdot K_0 \cdot D_R \cdot \sqrt{\frac{p_B}{[\sigma]_B \cdot \varphi}}, \text{ мм} \quad (3.4)$$

де  $p_B$  – пробний тиск при гідравлічному випробуванні, МПа;

$[\sigma]_B$  – допустима напруга при гідравлічному випробуванні, МПа.

Пробний тиск при гідравлічному випробуванні [15]:

$$p_B = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot p \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} \\ 0,2 \end{array} \right\}, \text{ МПа} \quad (3.5)$$

де  $[\sigma]_{20}$  – допустима напруга для ВСтЗпс при температурі +20°C; обчислюється за формулою (3.2):

$$[\sigma] = 140 \cdot 1,0 = 140 \text{ МПа.}$$

					<i>ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ</i>	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		40



Визначаємо пробний тиск при гідравлічному випробуванні за (3.5):

$$p_B = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot 0,42 \cdot \frac{140}{130} = 0,68 \\ 0,2 \end{array} \right\} = 0,68 \text{ МПа.}$$

Допустима напруга при гідравлічному випробуванні:

$$[\sigma]_{\text{и}} = \frac{\sigma_{T20}}{1,1}, \text{ МПа} \quad (3.6)$$

де  $\sigma_{T20}$  – мінімальне значення межі плинності матеріалу при температурі +20°C; за [15] для сталі ВСтЗпс  $\sigma_{T20} = 210$  МПа.

$$[\sigma]_{\text{в}} = \frac{210}{1,1} = 190,91 \text{ МПа.}$$

Визначаємо розрахункову товщину стінки плоскої кришки при гідравлічному випробуванні за (3.4):

$$s_{\text{IRB}} = 0,41 \cdot 1,29 \cdot 1300 \cdot \sqrt{\frac{0,68}{190,91 \cdot 1,0}} = 41 \text{ мм.}$$

Прибавка до розрахункових товщин [15]:

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \text{ мм} \quad (3.7)$$

де  $c_1$  – прибавка для компенсації корозії та ерозії, мм;

$c_2$  – прибавка для компенсації мінусового допуску;  $c_2 = 0$ ;

$c_3$  – технологічна прибавка;  $c_3 = 0$ .

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		41

Прибавка для компенсації корозії та ерозії:

$$c_1 = \Pi \cdot \tau + c_E, \text{ мм} \quad (3.8)$$

де  $\Pi$  – проникність матеріалу;  $\Pi = 0,1$  мм/рік.;

$\tau$  – термін служби апарату;  $\tau = 15$  років;

$c_E$  – прибавка для компенсації ерозії;  $c_E = 0$ .

$$c = c_1 = 0,1 \cdot 15 + 0 = 1,5 \text{ мм.}$$

Виконавча товщина плоскої кришки, яка працює під внутрішнім тиском:

$$s_1 = \max(s_{1R}; s_{1RH}) + c, \text{ мм} \quad (3.9)$$

$$s_1 = \max(39; 41) + 1,5 = 41 + 1,5 = 42,5 \text{ мм.}$$

Округлюємо до більшого стандартного значення:  $s_1 = 44$  мм.

Перевіряємо умову застосування розрахункових формул для плоскої кришки:

$$\frac{s_1 - c}{D_R} \leq 0,1; \quad (3.10)$$

$$\frac{44 - 1,5}{1300} = 0,033 < 0,1.$$

Умова застосування розрахункових формул виконується.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		42

## 4 Монтаж та ремонт апарата

### 4.1 Монтаж апарата [16, 17]

Монтаж апаратів повітряного охолодження проводиться у максимально зібраному вигляді – уже зі встановленими вузлами трубопроводів та металоконструкціями каркасів. Установці апарату в проектне положення передують його гідравлічне випробовування на міцність та герметичність. При цьому окремо випробовують міжтрубний і трубний простори.

Апарати встановлюють у проектне положення на фундамент або іншу підставу за допомогою монтажних кранів або інших вантажопідйомних механізмів.

Монтаж, пуск, експлуатація і ремонт АПО повинні проводитися із дотриманням правил безпеки, що встановлені для окремих видів робіт, загальних правил безпеки та пожежної безпеки, викладених у відповідних інструкціях, що діють на даному виробництві.

Апарат повітряного охолодження встановлюється на спеціальній технологічній етажерці. Монтаж АПО проводиться у такій послідовності:

1. Виставляють на технологічній етажерці контейнери; з'єднують та закріплюють їх між собою кріпильними болтами;
2. На контейнер встановлюють дифузори; з'єднують та закріплюють їх між собою кріпильними болтами;
3. Встановлюють та закріплюють теплообмінні секції на штирі дифузорів із відповідним маркуванням;
4. Перевіряють якість виготовлення шпильок, гайок та шайб: різьба повинна бути без забруднень, подряпин, зривів тощо; поверхня на нарізаній частині шпильок – гладкою; гайка, надіта на різьблення шпильки, не повинна мати слабину.
5. Затягують усі болтові з'єднання, використовуючи стандартні ключі, без подовжувачів;

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		43

6. Перед затягуванням гайок зробити ретельний огляд привалочних поверхонь фланців – дефекти на цих поверхнях не допускаються.

7. Перевіряють установку в теплообмінній секції відповідних фланців і прокладок на штуцерах входу і виходу робочого середовища.

8. Також слід перевіряти розмір і стан прокладок на відповідність їх розмірам привалочних поверхонь стикуючих фланців. Далі перевірити правильність установки прокладок, переконатися в наявності повного комплекту шпильок в отворах фланців і в тому, що прокладки увійшли в пази. Неповний комплект шпильок або перекося фланців не допускається. Також забороняється підтяжка шпильок під час роботи апарату.

Виявлені під час монтажу дефекти та методи їх усунення повинні бути зареєстровані в паспорті АПО.

Виконати під'єднання АПО до всіх необхідних комунікацій і арматури. Очистити від бруду і сторонніх предметів підводи і відводи трубопроводів перед приєднанням до апарату.

Провести заземлення апарату у відповідності вимогам ПУЕ.

Правильність установки апарату на фундамент вивіряють:

- теплообмінних секцій – гідростатичним або брусковим рівнем;
- осей опорних стійок – схилом;
- відхилення площин кронштейнів опорних стійок від розташування в одній горизонтальній площині – по натягнутій струні;
- відхилення від горизонтальності приводу вентилятора – брусковим рівнем.

При установці колеса вентилятора повинен бути витриманий рівномірний радіальний зазор в межах допустимих розмірів. При centruванні валів вимірювання слід проводити в чотирьох положеннях при спільному повороті напівмуфт на 90°. Центрування приводу вважається правильним, якщо різниця діаметрально протилежних розмірів перекося і паралельного зміщення осей не перевищують 0,06 мм (при діаметрі муфти 250 мм).

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		44

## 4.2 Ремонт апарата [16, 17]

Стан зовнішньої поверхні елементів апаратів повітряного охолодження, працюючих під тиском, перевіряється в таких місцях:

- в місці приварювання фланців;
- в місці перетину зварних швів;
- зовнішньої поверхні трубного простору.

Перевіряються наступні дефекти:

- на поверхні – тріщини, надриви, випучини;
- підвищена швидкість корозії стінок;
- на зварних швах – дефекти зварювання, тріщини, надриви тощо.

Апарат, який підлягає розборці для ремонту і очищення, повинен бути зупинений, звільнений від теплоносіїв, відключений і заглушений від іншої апаратури, пропарений і пройдений азотом. Повинні бути створені нормальні умови, а саме: тиск – атмосферний, температура – знижена до нормальної, вибухо- і пожежонебезпечні середовища – відсутні. У деяких випадках пропарку і промивку чередують кілька разів. Промивання водою сприяє швидшому охолодженню апарату. Не можна приступати до ремонтних робіт, якщо температура промивної води перевищує 50°C.

Пропарений і промитий теплообмінник від'єднують від усіх апаратів і комунікацій глухими заглушками, які встановлюються у фланцевих з'єднаннях штуцерів. Установку кожної заглушки і подальше її зняття реєструють у спеціальному журналі.

З метою скорочення тривалості ремонтних робіт, ще на етапі промивання апарата водою, відвертають частину болтів на тих люках, які будуть розкриватися, не порушуючи при цьому герметичності.

Після відкривання люка апарат деякий час повинен провітрюватися в режимі вільної конвекції. По завершенню провітрювання проводять аналіз проб повітря із апарату. До внутрішніх робіт (у середині апарату) можна

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		45

приступати лише тоді, коли аналіз покаже концентрацію шкідливих газів, яка не перевищує гранично допустимих значень санітарних норм.

Далі необхідно виконати ретельний зовнішній і внутрішній огляд апарату для виявлення можливих дефектів, що утворилися в процесі експлуатації (механічні пошкодження, тріщини, корозія тощо). За необхідності огляду всієї поверхні корпусу, розбирають внутрішні пристрої.

Очищення трубного простору теплообмінних секцій повинно проводитися відповідно до діючої інструкції на підприємстві.

Зношені штуцери і люки вирізають і замінюють новими (із обов'язковим встановленням зміцнювальних кілець). Бажано, щоб зміцнювальні кільця нових штуцерів мали дещо більший діаметр, аніж старі: це дозволяє приварювати їх у новому місці.

Дефекти на зовнішній поверхні (вм'ятини, корозійні руйнування і т. ін.) необхідно видаляти шліфуванням. Надійність усунення поверхневих дефектів контролюють магнітною або ультразвуковою дефектоскопією. Допустима глибина пошкодження становить 10–20 % від товщини стінки (у залежності від розмірів пошкодження).

Після ремонту апарат піддають гідравлічним або пневматичним випробовуванням.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		46

## 5 Охорона праці

### Параметри, що характеризують вібрацію. Дія на організм людини. Нормування та методи захисту.

Під вібрацією розуміють механічні коливання твердого тіла, що передаються організму людини. Найпростішим видом таких коливань є гармонійні коливання, при яких відбувається почергове наростання та спадання в часі (за синусоїдальним законом) значень рухомої точки чи механічної системи.

Вібрації виникають, зазвичай, при роботі машин та механізмів, які мають невірноважені і незбалансовані частини, що обертаються чи здійснюють зворотно-поступальний рух. До такого устаткування належать оброблювальні верстати, штампувальні та ковальські молоти, електро- та пневмоперфоратори, електроприводи, насосній установки, компресори, механізований інструмент, авіаційні двигуни та ін. При роботі даного устаткування вібрація відіграє негативну роль. У той же час, вібрацію застосовують і для інтенсифікації виробничих процесів, наприклад, при ущільненні бетонних сумішей, в роздрібнюванні та сортуванні інертних матеріалів, розвантажуванні та сортуванні сипучих матеріалів.

Вібрація характеризується абсолютними та відносними параметрами.

До основних абсолютних параметрів належать:

- вібропереміщення ( $s$ ) – миттєве значення кожної з координат, які описують положення тіла, чи матеріальної точки під час вібрації;
- амплітуда вібропереміщення ( $A$ ) – найбільше відхилення точки, яка коливається з певною частотою, від положення рівноваги, м;
- віброшвидкість ( $v$ ) – кінематичний параметр, що дорівнює швидкості переміщення (перша похідна вібропереміщення) точки, яка коливається з певною частотою, м/с;

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		47

- віброприскорення ( $a$ ) – кінематичний параметр, що дорівнює прискоренню переміщення (друга похідна вібропереміщення) точки, яка коливається з певною частотою,  $\text{м/с}^2$ ;
- період вібрації ( $T$ ) – найменший інтервал часу, через який під час періодичної вібрації повторюється кожне значення величини, яка характеризує вібрацію,  $\text{с}$ ;
- частота вібрації ( $f$ ) – величина, обернено пропорційна періоду вібрації, яка показує кількість коливань за одиницю часу точки під час вібрації,  $\text{Гц}$ .

Оскільки абсолютні параметри, що характеризують вібрацію змінюються в широких діапазонах, то на практиці частіше використовують відносні параметри – рівні, які визначаються відносно опорного (порогового) значення відповідного параметра [18].

Стандартні опорні значення наступні:

- амплітуди вібропереміщення  $A_0 = 8 \cdot 10^{-12}$  м – граничне мінімальне значення вібропереміщення, яке відчувається вібраційним аналізатором організму людини;
- віброшвидкості  $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  м/с – граничне мінімальне значення віброшвидкості, яке відчувається вібраційним аналізатором організму людини;
- віброприскорення  $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$   $\text{м/с}^2$  – граничне мінімальне значення віброприскорення, яке відчувається організмом людини.

За способом передачі на тіло людини розрізняють загальну та місцеву (локальну) вібрацію.

Загальна вібрація передається на тіло людини, яка сидить або стоїть, переважно через опорні поверхні – сидіння, підлогу.

Локальна вібрація передається через руки працюючих при контакті з ручним механізованим інструментом, органами керування машинами та обладнанням, деталями, які обробляються і т. п.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
						48
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		



Можлива також одночасна дія загальної та локальної вібрації. Наприклад, при роботі на дорожньо-будівельних машинах на руки передається локальна вібрація від органів керування, а на все тіло від машини через сидіння.

Залежно від джерела виникнення загальна вібрація підрозділяється на:

- транспортну, яка діє на операторів (водіїв) транспортних засобів (автомобілі, трактори);
- транспортно-технологічну, яка діє на операторів машини з обмеженою рухливістю та таких, що рухаються тільки по спеціально підготовлених поверхнях виробничих приміщень, промислових майданчиків та гірничих виробок (екскаватори, промислові та будівельні крани, автотранспортувачі, авто- та електрокари);
- технологічну, яка діє на операторів стаціонарних машин або передається на робочі місця, що не мають джерел вібрації (метало- і деревооброблювальні верстати, ковальсько-пресувальне устаткування, насосні станції, бурові вишки).

Загальну технологічну вібрацію за місцем дії поділяють на такі типи:

- на постійних робочих місцях виробничих приміщень підприємств;
- на робочих місцях складів, їдалень, побутових, чергових та інших виробничих приміщень, де немає джерел вібрації;
- на робочих місцях заводоуправлінь, конструкторських бюро, лабораторій, обчислювальних центрів, медпунктів, конторських приміщень, робочих кімнат та інших приміщень для працівників розумової праці.

За джерелом виникнення локальну вібрацію поділяють на таку, що передається від:

- ручних машин або ручного механізованого інструменту, органів керування машинами та устаткуванням;
- ручних інструментів без двигунів (наприклад, рихтувальні молотки) та деталей, які обробляються.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		49

За часовими характеристиками загальні та локальні вібрації поділяються на: **постійні**, для яких величина віброприскорення чи віброшвидкості змінюється менше ніж у два рази (менше 6 дБ) за робочу зміну; **непостійні**, для яких вище перераховані параметри вібрації змінюються не менше ніж у два рази (6 дБ і більше) за робочу зміну.

У свою чергу, непостійні вібрації поділяються на:

- коливні, рівні яких безперервно змінюються в часі;
- переривчасті, коли контакт з вібрацією в процесі роботи переривається, причому довжина інтервалів, під час яких має місце контакт, становить більше 1 с;
- імпульсні, що складаються з одного або кількох вібраційних впливів (наприклад, ударів), кожен довжиною менше ніж 1 с, при частоті їх дії менше ніж 5,6 Гц.

Загальна класифікація виробничої вібрації наведена на рис. 5.1.

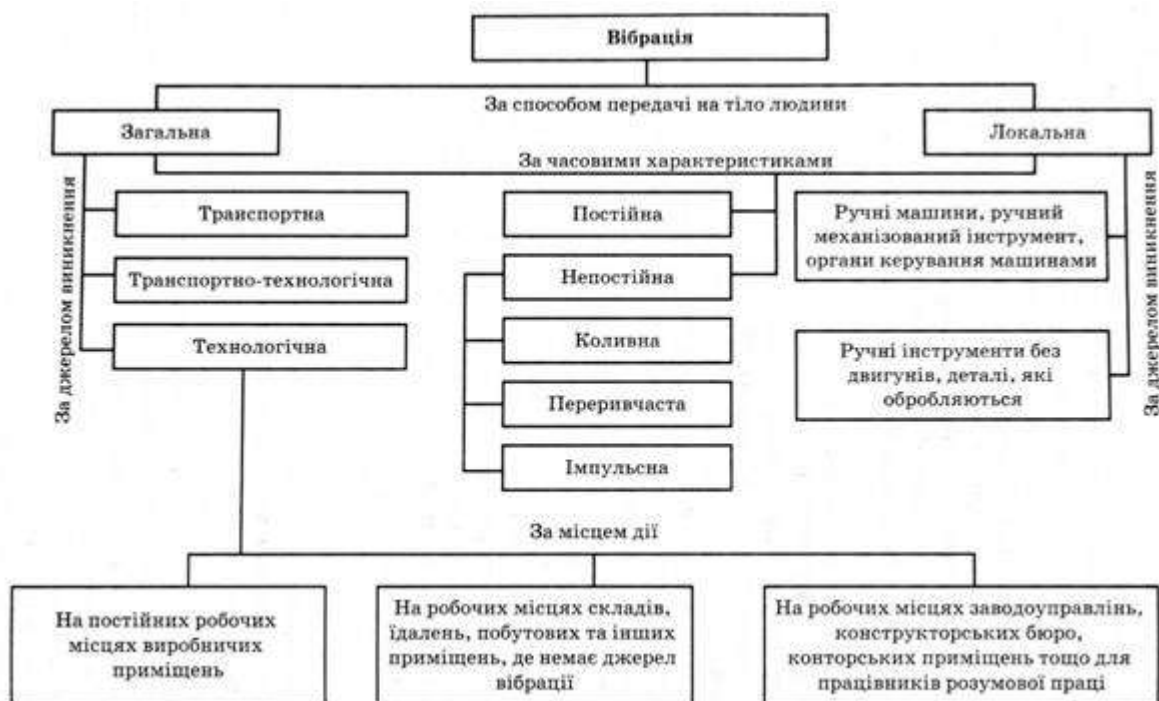


Рисунок 5.1 – Класифікація виробничої вібрації

Під час дії вібрації на організм людини спостерігаються зміни в діяльності серцевої та нервової систем, спазм судин, зміни у суглобах, що призводить до обмеження їх рухомості.

При нетривалій дії вібрації працівник передчасно втомлюється, при цьому його продуктивність праці знижується. Тривала дія вібрації може спричинити професійне захворювання - вібраційну хворобу. Під час розвитку цієї хвороби з'являється оніміння, відчуття повзання мурашок, біль у суглобах тощо. Слід зазначити, що ефективне лікування вібраційної хвороби можливе лише на ранній стадії її розвитку. Особливо небезпечна вібрація робочих місць з частотою, яка є резонансною з частотою коливання окремих органів чи частин тіла людини, що може призвести до їх механічного пошкодження.

Резонансні частоти окремих частин тіла наступні (Гц):

- очі – 22...27;
- горло – 6...12;
- грудна клітка – 2...12;
- ноги, руки – 2...8;
- голова – 8...27;
- обличчя та щелепи – 4...27;
- пояснична частина хребта – 4...14;
- живіт – 4...12.

Для більшості внутрішніх органів людини частота власних коливань становить 6–12 Гц [19].

Дія вібрації визначається інтенсивністю коливань, їх спектральним складом, тривалістю впливу та напрямком дії. Показниками інтенсивності є середньоквадратичні або амплітудні значення віброприскорення  $a$ , м; віброшвидкості  $V$ , м/с; віброзміщення  $x$ , м/с<sup>2</sup>. Параметри  $x$ ,  $V$ ,  $a$  – взаємозалежні, і для синусоїдальних вібрацій величина кожного з них може бути обчислена за значеннями іншого зі співвідношення:

$$a = V(2\pi f) = x(2\pi f)^2 \quad (5.1)$$

де  $2\pi f$  – кругова частота вібрації,  $\text{с}^{-1}$ .

Окрім того, вібрація характеризується таким параметром, як частота  $f$ , Гц.

На практиці, під час проведення віброакустичних досліджень, використовують відносні рівні *віброшвидкості*  $L_v$  та *віброприскорення*  $L_a$ , які вимірюються в децибелах і визначаються за формулами:

$$L_v = 20 \cdot \lg (V/V_0); \quad (5.2)$$

$$L_a = 20 \cdot \lg (a/a_0), \quad (5.3)$$

де  $V$ ,  $a$  – відповідно середньоквадратичне значення віброшвидкості і віброприскорення в точці виміру, м/с, м/с<sup>2</sup>;

$V_0 = 5 \cdot 10^{-8}$  м/с,  $a_0 = 3 \cdot 10^{-4}$  м/с<sup>2</sup> – граничні (порогові) значення віброшвидкості та віброприскорення.

Віброшвидкість  $10^{-4}$  м/с людина сприймає як порогову, а при швидкості понад 1 м/с – виникають больові відчуття.

Гігієнічна оцінка вібрації, яка діє на людину у виробничих умовах, здійснюється за допомогою таких методів: частотного (спектрального) аналізу її параметрів; інтегральної оцінки за спектром частот параметрів, що нормуються; дози вібрації.

Згідно із основним нормативним документом ГОСТ 12. 1. 012-90 “ССБТ. Вибрация. Общие требования безопасности” та ДСН 3.3.6.039-99 нормованими величинами є *середньоквадратичні значення віброшвидкості ( $V$ ) та віброприскорення ( $a$ ) або їх логарифмічні рівні  $L_v$ ,  $L_a$  (у дБ) в діапазоні октавних смуг із середньгеометричними частотами:*

- для локальної вібрації: 8,0; 16,0; 31,5; 63,0; 125,0; 250,0; 500,0; 1000,0 Гц;

- для загальної вібрації: 1,0; 2,0; 4,0; 8,0; 16,0; 31,5; 63,0 Гц, або в діапазоні 1/3 октавних смуг 0,8; 1,0; 1,25; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16,0; 20,0; 25,0; 31,5; 40,0; 50,0; 63,0; 80,0 Гц.

Параметром, що нормується, у випадку інтегральної оцінки за спектром частот є кореговане значення віброшвидкості або віброприскорення, або їх логарифмічні рівні, які вимірюються за допомогою коригуючих фільтрів або обчислюються.

У разі дії непостійної вібрації (крім імпульсної) параметром, що нормується, є вібраційне навантаження (еквівалентний корегований рівень, доза вібрації, D), одержане робітником протягом зміни та зафіксоване спеціальним приладом або обчислене для кожного напрямку дії вібрації (X, Y, Z) за формулою.

Еквівалентний корегований рівень віброшвидкості або віброприскорення розраховується шляхом енергетичного додавання рівнів з урахуванням тривалості дії кожного з них.

У разі дії імпульсної вібрації з піковим рівнем віброприскорення від 120 до 160 дБ, параметром, що нормується, є кількість вібраційних імпульсів за зміну (годину), в залежності від тривалості імпульсу.

Нормативні значення вібрації встановлені згідно з ДСН 3.3.6.039-99 за її дії протягом робочого часу 480 хвилин (8 год).

Заходи, щодо захисту від дії вібрації поділяють на технічні, організаційні та лікувально-профілактичні. Також вони можуть бути розподілені як колективні та індивідуальні.

До технічних заходів відносять:

- зменшення вібрації в джерелі її виникнення полягає у виборі таких кінематичних і технологічних схем, при яких процеси, що викликані ударами, різкими прискореннями виключаються (заміна кулачкових і кривошипних механізмів гідроприводами, штампування – пресуванням тощо);

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
						53
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

- *вібродемпфування* зводиться до перетворення механічної коливальної енергії в теплову. Досягається за рахунок використання конструкційних матеріалів з великим внутрішнім тертям (пластмаси, гума), нанесенням на вібруючі поверхні шару пружнов'язких матеріалів (мастики, пінопласт, пластикат тощо);
- *віброгасіння* – вібруюче обладнання встановлюється на масивні фундаменти. Масу фундаменту підбирають таким чином, щоб амплітуда коливань підшви фундаменту не перевищувала 0,1...0,2 мм, а для особливо точного обладнання – 0,005 мм;
- *віброізоляція* полягає в зменшенні передачі коливань від джерела вібрації до об'єкту, що захищається. Це досягається введенням в систему пружного елемента (віброізолятори, амортизатори, пружні каретки тощо).

Пружні елементи, що вводяться в коливальну систему можуть бути: пружинними; гумово-металевими; гумовими з ребристої або дірчастої гуми.

Ефективність віброізоляції визначається *коефіцієнтом передачі* (КП), який розраховується за формулою:

$$КП = 1 / ((f / f_0)^2 - 1), \quad (5.4)$$

де  $f$  і  $f_0$  – відповідно частота примушених і власних коливань системи.

Фізичний зміст коефіцієнта передачі – відношення амплітуди зміщення об'єкту, що захищається, до амплітуди джерела:

$$КП = a_{зах} / a_{джер}, \quad (5.5)$$

звичайно  $f / f_0 = 3 \dots 4$ , що відповідає оптимальному  $КП = 1/8 \dots 1/15$ ; чим менше значення КП, тим вище віброізоляція.

Ефективність віброізоляції  $\Delta L$ , дБ, визначають із виразу:

$$\Delta L = 20 \cdot \lg(1/KII); \quad (5.6)$$

*До організаційних заходів відносять:*

- організаційно-технічні (своєчасний ремонт та обслуговування обладнання за технологічним регламентом, контроль вібрації, дистанційне керування вібронебезпечним обладнанням);
- організаційно-режимні (режим праці та відпочинку, заборону залучення до вібраційних робіт осіб молодших 18 років, тощо);

Для профілактики віброзахворювання необхідний раціональний режим праці і відпочинку. Загальний час контакту з вібруючими машинами не повинен перевищувати 2/3 тривалості робочого дня, включаючи перерви на 10–15 хв. на кожні 60 хв. роботи. До робіт з вібруючими машинами та механізмами допускаються особи що досягли 18 років і пройшли медичне обстеження.

*До лікувально-профілактичних заходів відносяться:*

- медичний огляд (періодичний – 1 раз на рік);
- лікувальні процедури (фізіологічні процедури, вітаміно- та фітотерапія).

Протягом робочого дня рекомендується проведення виробничої гімнастики та масажу, рекомендується також ультрафіолетове випромінювання та вітамінізація.

Найбільш важливим напрямком захисту від вібрації є конструктивні методи зниження віброактивності машин та механізмів – зменшення діючих змінних сил у конструкції та зміна її параметрів (жорсткості, приведеної маси, сили тертя демпферного пристрою).

У випадках, коли технічними засобами не вдається зменшити рівень вібрацій до норми, передбачають забезпечення працівників засобами

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		55

індивідуального захисту. Засоби індивідуального захисту (ЗІЗ) можуть застосовуватися як для всього тіла людини, так і окремо для ніг та рук.

У якості таких засобів використовують віброізолювальні рукавиці із пружно-демпфуючих матеріалів; для захисту ніг – чоботи або черевики, в яких підошва виготовлена із пружно-демпфуючих матеріалів (гумова устілка товщиною 30 мм з пружинами), для захисту тіла оператора – нагрудні паси та спеціальні костюми, виготовлені із пружних матеріалів. Ефективність таких рукавиць та взуття не дуже висока, тому що товщина вказаних прокладок не може бути дуже великою. Через це вони не дають помітного зменшення вібрацій на низьких частотах, а на високих (більш 100 Гц) їх ефективність зменшується за рахунок хвильових властивостей тканин людського тіла. Засоби індивідуального захисту (взуття, рукавиці і т. ін.) від шкідливого впливу загальної та локальної вібрації повинні відповідати вимогам ГОСТ 12.4.024-76. "ССТБ. Обувь специальная виброзащитная" та ГОСТ 12.4.002-74 "ССБТ. Средства индивидуальной защиты рук от вибрации. Общие технические требования". Для зниження впливу локальної вібрації, що діє під час роботи з перфораторами та відбійними молотками використовують спеціальні пристрої до ручки керування (з елементами пружності, які згинаються, стискаються або скручуються, з телескопічними або шарнірними елементами).

Рівні вібрації під час виконання робіт з ПК у виробничих приміщеннях не повинні перевищувати допустимих значень, визначених в Державних санітарних нормах виробничої загальної та локальної вібрації ДСН 3.3.6.039-99 та ДСанПіН 3.3.2-007-98 (табл. 5.1) [20].

Таблиця 5.1 – Гранично допустимі рівні вібрації на робочому місці, дБ

Нормований параметр	Середньгеометричні частоти октавних смуг, Гц						Кориговані та еквівалентні кориговані рівні, в дБ W
	2	4	8	16	31,5	63	
<b>Віброшвидкість</b>	79	73	67	67	67	67	72
<b>Віброприскорення</b>	25	25	25	31	37	43	30



## Список літератури

1. Курсова робота на тему «Апарат повітряного охолодження» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.kursak.com/aparat-povitrianoho-okholodzhennia-kursova/>.

2. Сікорський В.О. «Інтенсифікація конвективного теплообміну при поперечному омиванні трубного пучка апарату повітряного охолодження : магістерська робота : 8.144 / В.О. Сікорський. – Київ, 2018. – 69 с.

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. Крюков Н.П. Аппараты воздушного охлаждения / Н.П. Крюков. М.: Химия, 1983 г. – 168 с.

5. Бахмат Г.В. Аппараты воздушного охлаждения газа на компрессорных станциях / Г.В. Бахмат, Н.В. Еремин, О.А. Степанов. СПб. : Недра, 1994. – 512 с.

6. Кузнецов А.А. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности / А.А. Кузнецов, С.М. Кагерманов, Е.Н. Судаков. – Л. : Химия, 1974 – 344 с.

7. Эмирджанов Р.Т. Основы технологических расчетов в нефтепереработке и нефтехимии / Р.Т. Эмирджанов, Р.А. Лемберанский . – М. : Химия, 1989. – 192 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. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Под ред. Дытнерского Ю. И. – М. : Химия, 1983. – 272 с.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		57

11. 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.

12. Лашинский А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лашинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.

13. Лашинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник / А. А. Лашинский. – Л. : Машиностроение, 1981. – 382 с.

14. 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.

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. Ермаков В.И. Ремонт и монтаж химического оборудования / В.И. Ермаков, В.С. Шейн. – Л. : Химия, 1981. – 368 с.

18. Параметри та види вібрації, її дія на організм людини [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://pidruchniki.com/1181092038290/bzhd/vibratsiya>.

19. Вібрація та її вплив на людину [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://moodle.hups.mil.gov.ua/pluginfile.php/6339/mod\\_resource/content/1/лекція%20№6.pdf](http://moodle.hups.mil.gov.ua/pluginfile.php/6339/mod_resource/content/1/лекція%20№6.pdf).

20. Гігієнічне нормування та заходи і засоби захисту від вібрації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://spo.stu.cn.ua/Oksana/posibnik/860.html>.

					ПОХНВ.Т.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		58