

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

Тема роботи: Ректифікаційна установка для розділення суміші бензол – оцтова кислота. Розробити ректифікаційну колону з ситчатими тарілками

Виконав:
студент групи ХМ – 61/1 КХІ
Паламарчук Богдан Олександрович

підпис

Залікова книжка
№ _____

Кваліфікаційна робота бакалавра
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою _____

" ____ " _____ 20 ____ р.

Підпис голови
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, ст. викладач

Острога Руслан Олексійович

підпис, дата

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

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

Курс 4 Група ХМ – 61/1 КХІ

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Студент Паламарчук Богдан Олександрович

1 Тема проекту: Ректифікаційна установка для розділення суміші бензол – оцтова кислота. Розробити ректифікаційну колону з ситчатими тарілками

2 Вихідні дані: Розробити тарілчасту ректифікаційну колону для розділення суміші бензол – оцтова кислота продуктивністю 10500 кг/год. Вміст ЛЛК (% мол.): у початковій суміші – 25; у дистиляті – 94; у кубовому залишку – 2,5. Тиск у колоні – атмосферний.

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

1. Технологічна схема установки – 0,5 арк.
2. Складальний кресленик ректифікаційної колони – 1,5 арк.
3. Складальний кресленик корпусу апарата – 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. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – М. : Химия, 1972. – 494 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: 66 с., 9 рис., 1 табл., 2 додатки, 21 джерело.

Графічні матеріали: технологічна схема установки, складальний кресленик ректифікаційної колони, складальний кресленик корпусу апарата – усього 3 аркуші графічної частини (3×формат А1).

Тема кваліфікаційної роботи: «Ректифікаційна установка для розділення суміші бензол – оцтова кислота. Розробити ректифікаційну колону з ситчатими тарілками».

У роботі наведено теоретичні основи та особливості процесу розділення бінарних сумішей на окремі компоненти методом ректифікації, виконано технологічний розрахунок досліджуваного процесу, визначено габаритні розміри апарата та розраховано його гідравлічний опір. Також обґрунтовано вибір матеріалу для виготовлення основних деталей та вузлів ректифікаційної колони, розраховано і підібрано допоміжне обладнання. Розрахунками на міцність та герметичність доведена надійність роботи проектного апарату. Окремим підрозділом представлено монтаж розробленого апарату, діагностика та ремонт основних його складових вузлів. У розділі «Охорона праці» розглянуто параметри, що визначають пожежну небезпеку горючих газів, рідин та твердих речовин, а також поняття про процеси горіння та вибуху.

Ключові слова: ТЕХНОЛОГІЧНА СХЕМА, БІНАРНА СУМІШ, РЕКТИФІКАЦІЯ, КОРПУС, ТАРІЛКА, МОНТАЖ, РЕМОНТ, ПОЖЕЖНА НЕБЕЗПЕКА.

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	12
2 ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ І АПАРАТА	16
2.1 Технологічні розрахунки	16
2.2 Конструктивні розрахунки	22
2.3 Гідравлічний опір апарата	28
2.4 Вибір допоміжного обладнання	31
3 РОЗРАХУНКИ АПАРАТА НА МІЦНІСТЬ ТА ГЕРМЕТИЧНІСТЬ	37
3.1 Визначення товщини стінки циліндричної обичайки	37
3.2 Визначення товщини стінки еліптичного днища апарата	39
3.3 Розрахунок опори апарата	40
3.4 Розрахунок на вітрове навантаження	42
4 МОНТАЖ ТА РЕМОНТ АПАРАТА	44
4.1 Монтаж апарата	44
4.2 Ремонт апарата	46
5 ОХОРОНА ПРАЦІ	49
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	64
ДОДАТОК А – Побудування графічних залежностей	
ДОДАТОК Б – Специфікації до графічної частини	

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ		
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
<i>Розроб.</i>	<i>Паламарчук</i>				<i>Лім.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листів</i>
<i>Перевір.</i>	<i>Острога</i>					4	66
<i>Реценз.</i>					СумДУ, ХМ-61/1КХІ		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Затв.</i>	<i>Склабінський</i>						
					Ректифікаційна колона з ситчатиими тарілками		
					Пояснювальна записка		

ВСТУП

Суміші можуть відрізнятися між собою не лише за складом, але і за зовнішнім виглядом. Відповідно до того, як виглядає ця суміш і якими властивостями вона володіє, її можна віднести або до однорідних (гомогенних), або до неоднорідних (гетерогенних) сумішей [1].

Однорідними називають такі суміші, в яких навіть за допомогою мікроскопу неможливо виявити частинки інших речовин. Склад і фізичні властивості в усіх частинах такої суміші однакові, оскільки між окремими її складовими частинами відсутні поверхні розділу. До однорідних сумішей належать: суміші газів, розчини, сплави [1].

Відповідно до теми кваліфікаційної роботи, бінарна суміш бензол – оцтова кислота є однорідною. Основний метод, що служить для розділення такої суміші – це дистиляція (ректифікація). Тобто, щоб розділити рідини, розчинні одна в одній, використовують різницю їхніх температур кипіння.

Таким чином, процес ректифікації являє собою розділення рідких сумішей, що містять два або кілька компонентів різної питомої ваги, багаторазовим випаровуванням суміші й конденсацією пари. Рушійною силою процесу є різниця між фактичними і рівноважними концентраціями компонентів у паровій фазі, що відповідають складу рідкої фази. Для ректифікації, як правило, використовують колонні апарати, що дозволяє реалізувати багаторазовий контакт між потоками рідкої і газоподібної фаз [2].

Апарат, у якому безпосередньо відбувається процес ректифікації – це тарілчаста ректифікаційна колона з ситчатими тарілками. Вона і є нашим об'єктом дослідження.

Кваліфікаційну роботу бакалавра виконано у відповідності до методичних вказівок [3]. Зміст і порядок розділів у даній пояснювальній записці також формувався відповідно цим вимогам.

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		5

1 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

1.1 Опис технологічної схеми установки

Ректифікаційні установки за принципом дії поділяються на періодичні та безперервні. В установках безперервної дії розділювана суміш надходить в колону і продукти поділу виводяться з неї безперервно. В установках періодичної дії суміш, яку поділяють, завантажують в куб і ректифікацію проводять до одержання продуктів заданого кінцевого складу. На рис. 1.1 наведено технологічну схему ректифікаційної установки безперервної дії для розділення суміші бензол – оцтова кислота.

Принцип роботи даної установки полягає у наступному. Бінарна суміш бензол – оцтова кислота із ємності E_1 за допомогою відцентрового насосу H подається в теплообмінник-підігрівач $П$, 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 KP . 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 (бензол), який спрямовується до споживача. Частина кубового залишку відбирається із нижньої частини колони і виходить у випарник $И$, де за рахунок тепла насиченої водяної пари відбувається кипіння кубової рідини і утворення парів ВКК. Останній повертається в колону, під її нижню тарілку, у якості парового зрошення. 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.

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		6

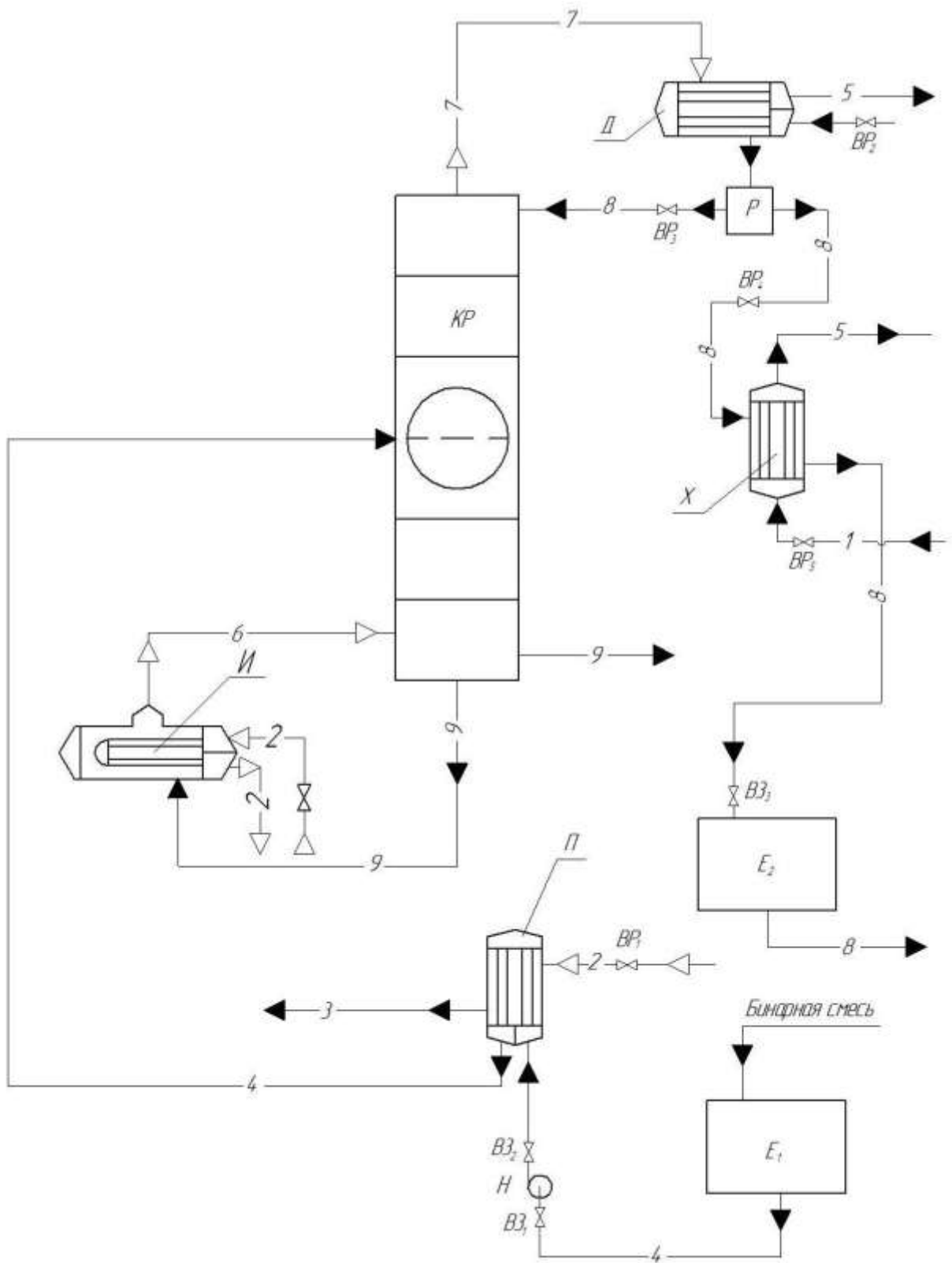


Рисунок 1.1 – Технологічна схема ректифікаційної установки:

E_1, E_2 – ємність; H – відцентровий насос; Π – підігрівач; И – випарник; KP – ректифікаційна колона; X – холодильник; D – дефлегматор; P – розподільник

Пари, що відводяться з верхньої частини колони, надходять у дефлегматор D , 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 X і спрямовується до збірника E_2 у якості готового продукту із високою концентрацією НКК.

1.2 Теоретичні основи процесу

Для отримання продуктів бажаного ступеня чистоти продуктів із високими виходами служить процес ректифікації. Теоретичні основи процесу ректифікації, які наведено у цьому підрозділі, виконано на підставі аналізу літературних джерел [4–7].

Ректифікація – це протитечійна взаємодія двох нерівноважних фаз – рідини і пари, що утворюється з цієї рідини. У результаті таких багаторазово повторюваних процесів висхідна в колоні парова фаза поступово збагачується низькокиплячим компонентом (НКК), і з верхньої частини колони відводяться майже чисті пари НКК. З іншого боку, стікаюча по колоні зверху вниз рідка фаза, збагачується висококиплячим компонентом (ВКК), і знизу апарата виводиться практично чистий ВКК.

Здійснюючи багаторазово контактування відповідних нерівноважних потоків парової і рідкої фаз, можна змінити їх склади бажаного ступеня.

Процес ректифікації здійснюється в протитечійних апаратах – колонах: пари протікають від низу до верху, а назустріч парам зверху вниз стікає рідина, що подається в верхній елемент колони. Між рідкою і паровою фазами виникає масообмін, внаслідок якого пари в міру їх просування по колоні збагачуються легколетким компонентом, а рідина – менш летким компонентом. В кінцевому підсумку пара, що виходить з верхньої частини колони, являє собою більш-менш чистий легколеткий компонент, конденсація якого дає готовий продукт –

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

дистилят, а з нижньої частини колони виходить порівняно чистий менш леткий компонент, так званий кубовий залишок, який, так само як і дистилят, може бути кінцевим продуктом процесу.

Рідину, що надходить на зрошення колони, називають флегмою; її отримують шляхом конденсації пари, що піднімаються з верхньої частини колони, в спеціальних конденсаторах-дефлегматором або ж в апаратах повітряного охолодження.

Для утворення парів в нижній частині колони використовують гріючі пристосування або ж теплообмінники-випарники, в які і підводять необхідну кількість тепла, у більшості випадків із гріючою водяною парою.

Для проведення заданого процесу використовуємо тарілчасту ректифікаційну колону. Тарілки ректифікаційних колон можна умовно розглядати як тепломасообмінні елементи, в яких одночасно протікають теплообмінні процеси (конденсація парів і випаровування рідини), а також відбуваються масообмінні процеси між взаємодіючими паровою і рідкою фазами.

При розрахунках ректифікаційних колон кількість і склад фаз зручно виражати в молярних величинах. Отже, можна вважати, що при конденсації з пари n кмоль труднолеткого компонента випаровується з рідини n кмоль легколеткого компонента, тобто кількість фаз по всій висоті колони буде постійною. Прийmemo наступні допущення, які мало спотворюють фактичні умови протікання процесу, але значно спрощують розрахунок:

1) склад пари, що виходить з колони до дефлегматора (y_D), і склад флегми, що повертається в колону (x_D), однакові, тобто $y_D = x_D$;

2) склад пари, що піднімається з кип'ятильника в колону (y_W), дорівнює складу рідини в кубі-випарнику (x_W), тобто $y_W = x_W$;

Складемо матеріальний баланс ректифікаційної колони:

– за потоками

$$G_F = G_D + G_W; \quad (1.1)$$

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		9

– за легколетким компонентом

$$G_F \cdot x_F = G_D \cdot x_D + G_W \cdot x_W, \quad (1.2)$$

де G_F , G_D , G_W – масові або молярні витрати живлення, дистилляту і кубового залишку;

x_F , x_D , x_W – склад легколеткого компонента в живленні, дистилляті та кубовому залишку відповідно.

Для колони безперервної дії з урахуванням втрат теплоти в навколишнє середовище маємо:

прихід тепла:

- з гріноюю парою в кубі випарника Q_K ;
- з вихідною сумішшю

$$Q_F = G_F \cdot I_F; \quad (1.3)$$

витрата тепла:

- з водою від сконденсованих у дефлегматорі парів Q_D ;
- з дистиллятом

$$Q_D = G_D \cdot I_D; \quad (1.4)$$

- з кубовим залишком

$$Q_W = G_W \cdot I_W; \quad (1.5)$$

- втрати в навколишнє середовище $Q_{втр}$,

де I_D , I_F , I_W – відповідно ентальпії дистилляту, вихідної суміші та кубового залишку.

Рівняння теплового балансу запишеться у вигляді:

$$Q_K + Q_F = Q_D + Q_W + Q_{втр}. \quad (1.6)$$

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

Підставляючи замість Q відповідні значення, вирішимо рівняння теплового балансу відносно Q_k :

$$Q_k = G_D \cdot (R+1) \cdot r_D + G_D \cdot I_D + G_W \cdot I_W - G_F \cdot I_F + Q_{втр}. \quad (1.7)$$

Визначення висоти тарільчастої колони проводиться за рівнянням:

$$H = H_T + h_1 + h_2, \quad (1.8)$$

де $H_T = (n-1) \cdot h$ – висота тарільчастої частини колони, м;

h_1 – висота сепараційної частини колони, м;

h_2 – відстань від нижньої тарілки до днища, м;

n – кількість тарілок;

h – відстань між сусідніми тарілками, м.

При наближених розрахунках застосовують теоретично менш обґрунтований, але більш простий метод визначення числа тарілок за допомогою, так званого, середнього к. п. д. тарілок:

$$n = n_T / \eta, \quad (1.9)$$

де n_T – число теоретичних тарілок. Значення η визначають за дослідними даними і знаходяться в межах 0,3–0,8.

Процеси ректифікації здійснюються періодично або безперервно при різних тисках: під атмосферним тиском, під вакуумом, а також під тиском вище атмосферного. Тиск вище атмосферного застосовують у тих випадках, коли суміш, що розділяється при атмосферному тиску перебуває в газоподібному стані; ректифікацію при зниженому тиску (під вакуумом) проводять для поділу висококиплячих сумішей.

Чергуються багаторазово повторювані процеси випаровування рідини і конденсації пари на спеціальних контактних пристроях, розміщених у вертикальному колонному апараті. На ректифікаційних установках використовують, головним чином, апарати двох типів: насадкові і тарілчасті ректифікаційні колони.

Тарілчасті колони застосовують для великих виробництв, широкого діапазону змін навантажень за парою і рідиною, і вони можуть забезпечити досить чіткий поділ сумішей. Недоліком таких апаратів є відносно високий гідравлічний опір. Але в умовах ректифікації це не має істотного значення: підвищення гідравлічного опору призводить лише до деякого збільшення тиску і, відповідно, до підвищення температури кипіння рідини в кип'ятильнику колони.

Метою розрахунку ректифікаційної колони є визначення температури процесу і кількості відведеного тепла, вибір швидкості пари, насадки (для насадкових колон) і типу тарілок (для тарілчастих колон), розмірів і гідравлічного опору апарата.

При проектуванні ректифікаційних установок, із яких пара відводиться в атмосферу, необхідно враховувати питання охорони навколишнього середовища – концентрація поглинаючого компонента в паровій фазі на виході з колони не повинна перевищувати гранично-допустимого значення. Якщо це не досягається в одному апараті, то необхідно встановлювати додаткове обладнання.

1.3 Опис об'єкта розроблення та вибір основних конструктивних матеріалів

На ректифікаційних установках використовують, головним чином, апарати двох типів: насадкові і тарілчасті ректифікаційні колони [6].

Насадкові колони – це колони, в яких використовуються насадки різних типів, але в промисловості найбільш поширеними є колони з насадкою із кілець

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		12

Рашига або Паля. Перевага таких колон в тому, що вони мають невеликий гідравлічний опір. Недоліком є те, що рівномірний розподіл рідини по шару насадки в колонах великого діаметру дуже ускладнено. У зв'язку із цим діаметр промислових насадкових ректифікаційних колон зазвичай не перевищує 0,8–1 м. Тарілчасті колони застосовуються для великої продуктивності, широкого діапазону змін навантажень по паровій фазі та рідині і можуть забезпечити досить чіткий поділ сумішей. Недоліком таких апаратів є відносно високий гідравлічний опір. Але в умовах ректифікації це не має суттєвого значення, адже підвищення гідравлічного опору призводить лише до деякого збільшення тиску і відповідно до підвищення температури кипіння рідини в кип'ятильнику колони [6].

Об'єктом дослідження є тарілчаста ректифікаційна колона з ситчатыми тарілками (рис. 1.2).

Принцип роботи апарата полягає у наступному. Пара для нижньої частини колони утворюється у випарнику. Гаряча пара з випарника повертається в колону, під нижню її тарілку, у якості парового зрошення.

Для збереження високої чистоти розділюваних компонентів, необхідно здійснювати зрошення у верхній частині колони. Внизу колони температура практично дорівнює температурі кипіння висококиплячого компонента при відповідному тиску в колоні, на верхній тарілці колони температура практично дорівнює температурі кипіння низькокиплячого компонента.

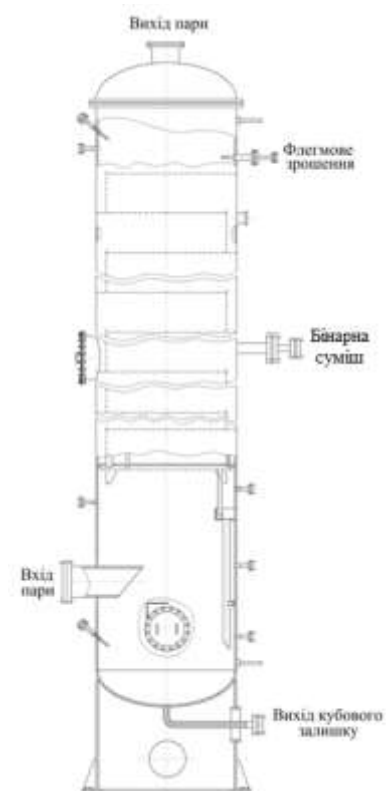


Рисунок 1.2 – Схема ректифікаційної колони з основними потоками

Конструктивно апарат складається із вертикального циліндричного корпусу, до якого приварено днище. Корпус і кришка роз'ємно з'єднані за допомогою фланцевого з'єднання. Усередині корпусу встановлені контактні пристрої у вигляді ситчатих тарілок. Саме за допомогою тарілок і створюється спрямований рух фаз і багаторазова взаємодія рідини і пари.

Ректифікаційна колона складається із двох частин: верхньої – зміцнюючої (концентраційної) і нижньої – вичерпної (відгінної).

На колоні передбачені штуцери для обв'язки апарата технологічними трубопроводами та підключення до технологічної лінії. Також до корпусу колони знизу приварена опорна частина, яка лапами кріпиться до фундаменту.

У кожний отвір ситчатої тарілки надходить пара, підхоплюючи і розпиляючи рідину, яка знаходиться на тарілці. Зливання рідини відбувається не тільки через зливні пристрої, але і через парові отвори.

Основними вимогами, яким повинні відповідати хімічні апарати, є механічна надійність, довговічність, конструктивна досконалість, простота виготовлення, зручність транспортування, монтажу та експлуатації [8–10]. Тому до конструкційних матеріалів проектованої апаратури висувають наступні вимоги [8]:

- 1) висока корозійна стійкість матеріалів в агресивних середовищах при робочих параметрах процесу;
- 2) висока механічна міцність при заданих робочих тисках, температурі і додаткових навантаженнях, що виникають при гідравлічних випробуваннях та експлуатації апаратів;
- 3) гарна зварюваність матеріалів із забезпеченням високих механічних властивостей зварних з'єднань;
- 4) низька вартість і доступність матеріалів.

Головною ж вимогою для матеріалів хімічних апаратів в більшості випадків є їх корозійна стійкість, так як вона визначає довговічність хімічного обладнання.

Із огляду на всі перераховані параметри, для деталей колони, які контактують із рідиною вибираємо матеріал – сталь 12Х18Н10Т, для інших – сталь Ст 3. Матеріал опори – ВСтЗсп [10].

Для виготовлення неметалевих прокладок для ущільнення роз'ємів з'єднань апарата використовуємо пароніт – листовий прокладковий матеріал, що виготовляється пресуванням азбокаучукової маси, яка складається із азбесту, каучуку і порошкових інгредієнтів [9].

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	<i>Лист</i>
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		15

2 ТЕХНОЛОГІЧНІ РОЗРАХУНКИ ПРОЦЕСУ І АПАРАТА

2.1 Технологічні розрахунки

Оскільки продуктивність колони по бінарній суміші задана в кг/год., перерахуємо молярні частки легколеткого компонента в масові [4]:

$$\bar{x}_f = x_f \cdot \frac{M_{\text{ллк}}}{M_f}; \quad (2.1)$$

$$\bar{x}_D = x_D \cdot \frac{M_{\text{ллк}}}{M_D}; \quad (2.2)$$

$$\bar{x}_W = x_W \cdot \frac{M_{\text{ллк}}}{M_W}; \quad (2.3)$$

$$M_F = M_{\text{ллк}} \cdot x_F + M_{\text{тлк}} \cdot (1 - x_F), \text{ кг/кмоль}, \quad (2.4)$$

де $M_F = 78,11 \cdot 0,25 + 60,05 \cdot (1 - 0,25) = 64,57$ кг/кмоль;

$M_D = M_{\text{ллк}} \cdot x_D + M_{\text{тлк}} \cdot (1 - x_D)$, кг/кмоль;

$M_D = 78,11 \cdot 0,94 + 60,05 \cdot (1 - 0,94) = 77,03$ кг/кмоль;

$M_W = M_{\text{ллк}} \cdot x_W + M_{\text{тлк}} \cdot (1 - x_W)$, кг/кмоль;

$M_W = 78,11 \cdot 0,025 + 60,05 \cdot (1 - 0,025) = 60,5$ кг/кмоль;

$M_{\text{ллк}} = 78,11$ кг/кмоль, $M_{\text{тлк}} = 60,05$ кг/кмоль – молярні маси легколеткого і важколеткого компонентів [11].

$$\bar{x}_f = 0,25 \cdot \frac{78,11}{64,57} = 0,302 \text{ мас. частки};$$

$$\bar{x}_D = 0,94 \cdot \frac{78,11}{77,03} = 0,953 \text{ мас. частки};$$

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

$$\bar{x}_W = 0,025 \cdot \frac{78,11}{60,5} = 0,032 \text{ мас. частки.}$$

Матеріальний баланс ректифікаційної колони складається з потоків [6]:

$$G_f = G_D + G_W. \quad (2.5)$$

За легколетким компонентом:

$$G_f \cdot \bar{x}_f = G_D \cdot \bar{x}_D + G_W \cdot \bar{x}_W. \quad (2.6)$$

Спільне вирішення рівнянь (2.5) і (2.6) дозволяє отримати залежність для визначення масових витрат дистилляту і кубового залишку:

$$G_D = G_f \cdot \frac{\bar{x}_f - \bar{x}_W}{\bar{x}_D - \bar{x}_W}; \quad (2.7)$$

$$G_W = G_f \cdot \frac{\bar{x}_D - \bar{x}_f}{\bar{x}_D - \bar{x}_W}; \quad (2.8)$$

$$G_D = 10500 \cdot \frac{0,302 - 0,032}{0,953 - 0,032} = 3078 \text{ кг/год.};$$

$$G_W = 10500 \cdot \frac{0,953 - 0,302}{0,953 - 0,032} = 7422 \text{ кг/год.}$$

Будуємо криву рівноваги (див. Додаток А, рис. А2).

Мінімальне флегмове число визначаємо за рівнянням [4]:

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

$$R_{\min} = \frac{x_D - y_f^*}{y_f^* - x_f}, \quad (2.9)$$

де $y_f^* = 0,7$ – склад пари, що перебуває в рівновазі з вихідною сумішшю; визначається за кривою рівноваги (див. Додаток А, рис. А2).

$$R_{\min} = \frac{0,94 - 0,7}{0,7 - 0,25} = 0,53.$$

Визначаємо оптимальне флегмове число R при $\beta = 2,2$ [7]:

$$R = \beta \cdot R_{\min} = 2,2 \cdot 0,53 = 1,17. \quad (2.10)$$

Значення оптимального флегмового числа вирішальним чином впливає на розміри ректифікаційної колони і дозволяє розрахувати масові витрати стікаючої по колоні флегми і піднімаючихся парів [7]:

$$G_R = R \cdot G_D; \quad (2.11)$$

$$G_V = (R + 1) \cdot G_D; \quad (2.12)$$

$$G_R = 1,17 \cdot 3078 = 3601 \text{ кг/год.};$$

$$G_V = (1,17 + 1) \cdot 3078 = 6679 \text{ кг/год.}$$

Робочі лінії процесу визначаються рівняннями [6]:

– для верхньої частини колони:

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		18

$$y = \frac{R}{R+1} \cdot x + \frac{x_D}{R+1}; \quad (2.13)$$

– для нижньої частини колони:

$$y = \frac{F+R}{R+1} \cdot x - \frac{F-1}{R+1} \cdot x_W, \quad (2.14)$$

де F – число живлення, яке визначається за формулою:

$$F = \frac{G_F}{G_D} \cdot \frac{M_D}{M_F}; \quad (2.15)$$

$$F = \frac{10500}{3078} \cdot \frac{77,03}{64,57} = 4,07.$$

Далі визначаємо координати точки, у якій перетинаються робочі лінії (див. Додаток А, рис. А.1):

$$y_f' = \frac{1,17}{1,17+1} \cdot 0,25 + \frac{0,94}{1,17+1} = 0,57;$$

$$y_f'' = \frac{4,07+1,17}{1,17+1} \cdot 0,25 - \frac{4,07-1}{1,17+1} \cdot 0,025 = 0,57.$$

Отримані рівні значення свідчать про правильність виконаних розрахунків.

Середні молярні концентрації рідини визначаються за середньоарифметичними залежностями [4]:

– у верхній частині колони:

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

$$x'_{cp} = \frac{(x_F + x_D)}{2}; \quad (2.16)$$

– у нижній частині колони:

$$x''_{cp} = \frac{(x_F + x_W)}{2}; \quad (2.17)$$

$$x'_{cp} = \frac{(0,25 + 0,94)}{2} = 0,595;$$

$$x''_{cp} = \frac{(0,25 + 0,025)}{2} = 0,1375.$$

Середні молярні концентрації парової фази визначаються за рівняннями робочих ліній [6]:

– у верхній частині колони:

$$y'_{cp} = \frac{R}{R+1} \cdot x'_{cp} + \frac{x_D}{R+1}; \quad (2.18)$$

– у нижній частині колони:

$$y''_{cp} = \frac{F+R}{R+1} \cdot x''_{cp} - \frac{F-1}{R+1} \cdot x_W; \quad (2.19)$$

$$y'_{cp} = \frac{1,17}{1,17+1} \cdot 0,595 + \frac{0,94}{1,17+1} = 0,754;$$

$$y''_{cp} = \frac{4,07+1,17}{1,17+1} \cdot 0,1375 - \frac{4,07-1}{1,17+1} \cdot 0,025 = 0,297.$$

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		20

Середня молярна маса парів розраховується за формулами [4]:

– у верхній частині колони:

$$M'_{cp} = y'_{cp} \cdot M_{ллк} + (1 - y'_{cp}) \cdot M_{тлк}; \quad (2.20)$$

– у нижній частині колони:

$$M''_{cp} = y''_{cp} \cdot M_{ллк} + (1 - y''_{cp}) \cdot M_{тлк}; \quad (2.21)$$

$$M'_{cp} = 0,754 \cdot 78,11 + (1 - 0,754) \cdot 60,05 = 73,67 \text{ кг/кмоль};$$

$$M''_{cp} = 0,297 \cdot 78,11 + (1 - 0,297) \cdot 60,05 = 65,41 \text{ кг/кмоль}.$$

Середні густини парів визначаються за рівнянням Клайперона:

– у верхній частині колони [4]:

$$\rho'_y = \frac{M'_{cp} \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + t'_y)}; \quad (2.22)$$

– у нижній частині колони:

$$\rho''_y = \frac{M''_{cp} \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + t''_y)}; \quad (2.23)$$

де t'_y – середня температура пари у верхній частині колони;

t''_y – середня температура пари в нижній частині колони.

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

$$\rho'_y = \frac{73,67 \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + 88)} = 2,49 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho''_y = \frac{65,41 \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + 111)} = 2,08 \text{ кг/м}^3.$$

Середні густини рідини знаходяться за правилом адитивності [8]:

– у верхній частині колони:

$$\rho'_x = x'_{cp} \cdot \rho'_{ллк} + (1 - x'_{cp}) \cdot \rho'_{тлк}; \quad (2.24)$$

– у нижній частині колони:

$$\rho''_x = x''_{cp} \cdot \rho''_{ллк} + (1 - x''_{cp}) \cdot \rho''_{тлк}, \quad (2.25)$$

де $\rho'_{ллк}$, $\rho''_{ллк}$, $\rho'_{тлк}$, $\rho''_{тлк}$ – густини рідини легколеткого і важколеткого компонентів при температурах t'_x , t''_x .

$$\rho'_x = 0,595 \cdot 815 + (1 - 0,595) \cdot 980 = 882 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho''_x = 0,1375 \cdot 790 + (1 - 0,1375) \cdot 950 = 928 \text{ кг/м}^3.$$

2.2 Конструктивні розрахунки

Граничну і робочу швидкості парів у верхній і нижній частинах колони знаходимо за формулами [14]:

$$\omega' = (0,75 \dots 0,9) \cdot \omega_{пр}, \quad (2.28)$$

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		22

де ω_{np} – швидкість пари, що відповідає точці захлинання.

$$\omega_{np} = c \cdot \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_n}{\rho_n}}, \quad (2.29)$$

де c – коефіцієнт, який обирається у залежності від конструкції тарілок і відстані між ними.

При відстані між тарілками $H = 0,4$ м коефіцієнт $c = 0,04$ [4].

У такому випадку, гранична швидкість парів:

– для верхньої частини колони

$$\omega'_{np} = 0,04 \cdot \sqrt{\frac{882 - 2,49}{2,49}} = 0,75 \text{ м/с};$$

– для нижньої частини колони

$$\omega''_{np} = 0,04 \cdot \sqrt{\frac{928 - 2,08}{2,08}} = 0,84 \text{ м/с}.$$

Робоча швидкість парів:

– для верхньої частини колони

$$\omega' = 0,75 \cdot 0,75 = 0,56 \text{ м/с};$$

– для нижньої частини колони

$$\omega'' = 0,75 \cdot 0,84 = 0,63 \text{ м/с}.$$

Відношення масових витрат рідкої і парової фаз становить [8]:

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		23

– у верхній частині колони

$$\left(\frac{L}{G}\right)' = \frac{G_R}{G_V} = \frac{R}{R+1}; \quad (2.30)$$

– у нижній частині колони

$$\left(\frac{L}{G}\right)'' = \frac{G_R + G_F}{G_V} = \frac{R+F}{R+1}; \quad (2.31)$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)' = \frac{1,17}{1,17+1} = 0,539;$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)'' = \frac{1,17+4,07}{1,17+1} = 2,415.$$

Об'ємна витрата парів дорівнює:

– у верхній частині колони

$$V' = \frac{G_V}{\rho_y'}; \quad (2.32)$$

– у нижній частині колони

$$V'' = \frac{G_V}{\rho_y''}; \quad (2.33)$$

$$V' = \frac{6679}{3600 \cdot 2,49} = 0,745 \text{ м}^3/\text{с};$$

$$V'' = \frac{6679}{3600 \cdot 2,08} = 0,892 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Діаметр колони розраховується за формулою [12]:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega}}; \quad (2.34)$$

– для верхньої частини колони

$$D' = \sqrt{\frac{0,745}{0,785 \cdot 0,56}} = 1,3 \text{ м};$$

– для нижньої частини колони

$$D'' = \sqrt{\frac{0,892}{0,785 \cdot 0,63}} = 1,343 \text{ м}.$$

Приймаємо стандартизований діаметр колони $D_k = 1400 \text{ мм}$.

Визначаємо дійсні робочі швидкості пари в колоні:

$$w_e = 0,56 \cdot \left(\frac{1,3}{1,4}\right)^2 = 0,48 \text{ м/с};$$

$$w_n = 0,63 \cdot \left(\frac{1,343}{1,4}\right)^2 = 0,58 \text{ м/с}.$$

У результаті побудови, так званих сходинок, між робочою і рівноважною лініями – число теоретичних тарілок становить: в концентраційній частині колони 6 шт.; у відгінній частині колони 2,5 шт.

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		25

Число дійсних тарілок можна визначити за допомогою, так званого, середнього ККД тарілки [9]:

$$N_D = N_m / \eta, \quad (2.35)$$

де η – ККД контактної пристрою (тарілки).

За даними [5] ККД ситчатих тарілок знаходиться у межах 0,38...0,4.

Для подальших розрахунків задаємося усередненим значенням $\eta = 0,38$.

У такому разі, число практичних тарілок становить:

– у верхній частині колони

$$N_D = 6 / 0,38 = 15,8 \approx 16 \text{ шт.};$$

– у нижній частині колони

$$N_D = 2,5 / 0,38 = 6,6 \approx 7 \text{ шт.}$$

Висота тарільчастої частини колони розраховується за рівнянням [14]:

$$H_T = (N_D - 1) \cdot H, \quad (2.37)$$

де N_D – загальне число тарілок;

H – відстань між тарілками, м.

$$H_T = (16 + 7 - 1) \cdot 0,4 = 8,8 \text{ м.}$$

Діаметр патрубка визначається за формулою [14]:

$$d = \sqrt{\frac{G}{\rho \cdot 3600 \cdot 0,785 \cdot \omega}}, \quad (2.38)$$

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		26

де ω – швидкість пари або рідини, м/с.

Швидкість пари приймається в межах 10–15 м/с, швидкість рідини 0,5–2 м/с [14].

Діаметр патрубку для входу парової суміші дорівнює:

$$d_{\text{сум}} = \sqrt{\frac{1,855}{2,08 \cdot 0,785 \cdot 15}} = 0,275 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр патрубка $d_{\text{сум}} = 300$ мм.

Діаметр патрубка для виходу парів з верху колони:

$$d_V = \sqrt{\frac{1,885}{2,49 \cdot 0,785 \cdot 15}} = 0,254 \text{ м.}$$

Також приймаємо діаметр патрубка $d_V = 300$ мм.

Діаметр патрубка для входу флегми:

$$d_R = \sqrt{\frac{1,00}{882 \cdot 0,785 \cdot 0,5}} = 0,05 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр патрубка $d_R = 50$ мм.

Діаметр патрубка для входу вихідної суміші:

$$d_F = \sqrt{\frac{10500}{3600 \cdot 925 \cdot 0,785 \cdot 0,5}} = 0,09 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр патрубка $d_F = 100$ мм.

Діаметр патрубка для виходу кубового залишку:

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

$$d_w = \sqrt{\frac{2,062}{928 \cdot 0,785 \cdot 0,5}} = 0,075 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр патрубку $d_w = 75$ мм.

2.3 Гідравлічний опір апарата

Відгонна частина колони є більш навантаженою за рідиною. Таким чином, гідравлічний розрахунок виконуємо для ситчастої тарілки, яка розташована у нижній частині колони. Гідравлічний розрахунок проводимо у відповідності до методики [13].

Гідравлічний опір ситчастої тарілки:

$$\Delta p = \Delta p_{\text{сyx}} + \Delta p_{\sigma} + \Delta p_{\text{np}}, \quad (2.39)$$

де $\Delta p_{\text{сyx}}$ – гідравлічний опір сухої тарілки, Па;

Δp_{σ} – опір, обумовлений силами поверхневого натягу, Па;

Δp_{np} – опір парорідинного шару, Па.

Гідравлічний опір сухої тарілки становить [13]:

$$\Delta p_{\text{сyx}} = \xi \cdot \frac{\rho_n \cdot \omega_{\text{отв}}^2}{2}, \quad (2.40)$$

де $\xi = 1,82$ – коефіцієнт опору незрошуваних ситчастих тарілок з вільним перетином 5–10 % [13];

$\omega_{\text{отв}}$ – швидкість пари в отворах тарілки, м/с.

Швидкість пари в отворах тарілки:

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		28

$$\omega_{отв} = \frac{w}{F}, \quad (2.41)$$

де w – дійсна робоча швидкість парів, м/с;
 $F = 5,54 \%$ – вільний перетин тарілки [13].

$$\omega_{отв} = \frac{0,58}{0,0554} = 10,5 \text{ м/с};$$

$$\Delta p_{сyx} = 1,82 \cdot \frac{2,08 \cdot 10,5^2}{2} = 209 \text{ Па.}$$

Опір, обумовлений силами поверхневого натягу:

$$\Delta p_{\sigma} = \frac{4 \cdot \sigma}{d_0}, \quad (2.42)$$

де $\sigma = 18,7 \cdot 10^{-3}$ Н/м – поверхневий натяг рідини при середній температурі в нижній частині колони;
 $d_0 = 0,004$ м – діаметр отворів тарілки.

$$\Delta p_{\sigma} = \frac{4 \cdot 18,7 \cdot 10^{-3}}{0,004} = 18,7 \text{ Па.}$$

Опір парорідинного шару на тарілці:

$$\Delta p_{np} = 1,3 \cdot h_{np} \cdot \rho_{np} \cdot g \cdot k, \quad (2.43)$$

де h_{np} – висота парорідинного шару, м;

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		29

$k \approx 0,5$ – коефіцієнт відношення густини парорідинного шару (піни) до густини рідини [13].

$$h_{np} = h_n + \Delta h, \quad (2.44)$$

де h_n – висота зливної перегородки, м;

Δh – висота шару над зливною перегородкою, м.

$$\Delta h = \left(\frac{V_p}{1,85 \cdot \Pi \cdot k} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (2.45)$$

де V_p – об'ємна витрата рідини, м³/с,

Π – периметр зливної перегородки, м;

$$\Delta h = \left(\frac{3,15 \cdot 10^{-3}}{1,85 \cdot 0,88 \cdot 0,5} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,025 \text{ м};$$

$$h_{np} = 0,05 + 0,025 = 0,075 \text{ м};$$

$$\Delta p_{np} = 1,3 \cdot 0,075 \cdot 928 \cdot 9,81 \cdot 0,5 = 444 \text{ Па};$$

$$\Delta p = 209 + 18,7 + 444 = 671,7 \text{ Па}.$$

Далі перевіряємо умову нормальної роботи тарілок:

$$H_m > 1,8 \cdot \frac{\Delta p}{\rho_p \cdot g}; \quad (2.46)$$

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		30

$$H_m > 1,8 \cdot \frac{671,7}{928 \cdot 9,81} > 0,133 \text{ м};$$

$$0,4 \text{ м} > 0,133 \text{ м}.$$

Отже, відстань між тарілками вибрана правильно.

Загальний гідравлічний опір ректифікаційної колони становить:

$$\Delta p_k = N_d \cdot \Delta p; \quad (2.47)$$

$$\Delta p_k = 23 \cdot 671,7 = 15449 \text{ Па}.$$

Далі перевіримо рівномірність роботи отворів тарілки:

$$w_o = 0,67 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \rho_p \cdot h_{np}}{\xi \cdot \rho_n}}; \quad (2.48)$$

$$w_o = 0,67 \cdot \sqrt{\frac{9,81 \cdot 928 \cdot 0,075}{1,82 \cdot 2,08}} = 9,0 \text{ м/с};$$

$$10,5 \text{ м/с} > 9,0 \text{ м/с},$$

а це значить, що ситчаті тарілки працюватимуть усіма отворами.

2.4 Вибір допоміжного обладнання

Розрахунок і вибір насосу H для подачі бінарної суміші у колону (див. рис. 1.1) [12]. Для всмоктуючого і напірного трубопроводів приймаємо однакову швидкість руху рідини, яка дорівнює $w = 2 \text{ м/с}$.

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

Діаметр трубопроводу визначаємо за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (2.49)$$

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

$$V = \frac{10500}{3600 \cdot 925} = 3,15 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с};$$

$$d = \sqrt{\frac{3,15 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 2}} = 0,045 \text{ м}.$$

Приймаємо стандартизований діаметр трубопроводу 50 мм.

Визначаємо критерій Рейнольдса для рідини у трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_p}{\mu}; \quad (2.50)$$

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 0,032 \cdot 920}{3,5 \cdot 10^{-4}} = 168229.$$

Отже, режим руху турбулентний. Абсолютну шорсткість трубопроводу приймаємо $\Delta = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ [12].

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

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

Для зони, що є автономною по відношенню до Re:

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}; \quad (2.51)$$

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

Визначаємо суму коефіцієнтів місцевих опорів окремо для всмоктуючої та напірної ліній [12].

Для всмоктуючої лінії:

- 1) вхід у трубу (приймаємо з гострими краями) $\xi_1 = 0,5$;
- 2) 2 коліна з кутом 90° $\xi_2 = 2 \cdot 1,1 = 2,2$.

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

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

Для напірної лінії:

- 1) вентиль прямоочний $\xi_1 = 0,65$;
- 2) 3 коліна з кутом 90° $\xi_2 = 3 \cdot 1,1 = 3,3$;
- 3) 1 кожухотрубний теплообмінник $\xi_3 = 3,05$;
- 4) вихід з труби $\xi_4 = 1$.

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4;$$

$$\Sigma \xi = 0,65 + 3,3 + 3,05 + 1 = 8.$$

Втрату напору у всмоктуючій лінії знаходимо за рівнянням:

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		33

$$h_{П.ВС.} = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (2.52)$$

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

$$h_{П.ВС.} = \left(0,028 \cdot \frac{3}{0,050} + 2,7 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 0,90 \text{ м.}$$

Втрата напору в напірній лінії:

$$h_{П.НАП.} = \left(0,028 \cdot \frac{6}{0,050} + 8 \right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 2,32 \text{ м.}$$

Загальні втрати напору:

$$h_{П} = h_{П.ВС.} + h_{П.НАП.}; \quad (2.53)$$

$$h_{П} = 0,90 + 2,32 = 3,22 \text{ м.}$$

Повний напір насосу знаходимо за рівнянням:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_p \cdot g} + H_G + h_{П}, \quad (2.54)$$

де $(P_2 - P_1)$ – різниця тисків у апараті та в ємності, із якої подається суміш, МПа.

H_G – геометрична висота піднімання рідини, м.

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		34

У нашому випадку, враховуючи, що тиск у колоні атмосферний, $(P_2 - P_1) = 0$:

$$H = 4,5 + 3,22 = 7,72 \text{ м.}$$

Корисну потужність насоса визначаємо за рівнянням:

$$N_{II} = \rho_p \cdot g \cdot V \cdot H; \quad (2.55)$$

$$N_{II} = 925 \cdot 9,81 \cdot 3,15 \cdot 10^{-3} \cdot 7,72 = 221 \text{ Вт.}$$

Потужність, яку повинен розвинути електродвигун насоса на вихідному валу при встановленому режимі роботи [12]:

$$N = \frac{N_{II}}{\eta_{пер} \cdot \eta_n}, \quad (2.56)$$

де $\eta_n = 0,6$ – коефіцієнти корисної дії насоса;

$\eta_{пер} = 1$ – коефіцієнти корисної дії передачі від електродвигуна до насоса.

$$N = \frac{221}{1 \cdot 0,6} = 368 \text{ Вт.}$$

Вибираємо відцентровий насос марки НМШ 8-16/29-5 із наступними параметрами: об'ємна подача насоса 16 м³/год.; напір насоса становить 29 м; потужність, яку споживає насос 7,5 кВт; частота обертів 1400 об/хв.

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		35

Розрахунок і вибір ємності E_I для зберігання бінарної суміші (див. рис. 1.1) [7]. Ємність для зберігання вихідної суміші розраховуємо, виходячи з 6–8 годинного резерву робочого часу, а також з урахуванням коефіцієнту заповнення $\psi = 0,8 \dots 0,85$. Приймаємо $\psi = 0,8$.

Розрахунковий об'єм ємності:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}; \quad (2.57)$$

$$V_{EP} = \frac{10500 \cdot 6}{0,8 \cdot 925} = 85,1 \text{ м}^3.$$

Для зберігання вихідної суміші встановлюємо дві окремі ємності.

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

$$H = \frac{V_{EP}}{2 \cdot 0,785 \cdot D^2}; \quad (2.58)$$

$$H = \frac{85,1}{2 \cdot 0,785 \cdot 3,6^2} = 4,18 \text{ м.}$$

Приймаємо висоту ємності 4,2 м.

3 РОЗРАХУНКИ АПАРАТА НА МІЦНІСТЬ ТА ГЕРМЕТИЧНІСТЬ

3.1 Визначення товщини стінки циліндричної обичайки

Для подальших розрахунків приймаємо робочу температуру стінки $t=105^{\circ}\text{C}$ та робочий тиск в апараті $P = 0,1$ МПа.

Розрахункова схема обичайки корпусу, навантаженого внутрішнім тиском, наведена на рис. 3.1.

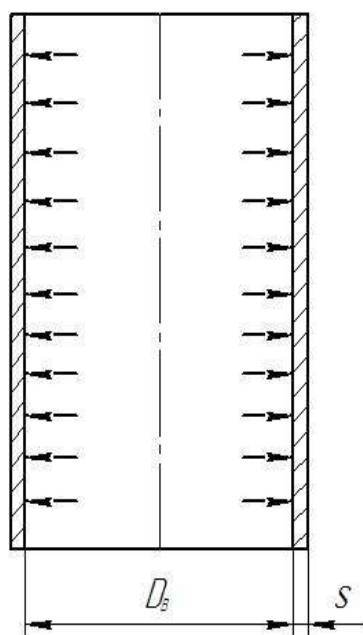


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема обичайки корпусу

Розрахунковий тиск для апаратів з робочим надлишковим тиском $P > 0,07$ МПа відповідно до рекомендацій наведених у [14] складе:

$$P_p = 1,1 \cdot p = 1,1 \cdot 0,1 = 0,11 \text{ МПа.} \quad (3.1)$$

Приймаємо стандартне значення $0,25$ МПа.

Пробний при гідравлічному випробуванні тиск згідно [14] складе:

$$P_{np} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot P_p \cdot [\sigma]_{20} / [\sigma] \\ P_p + 0,3 \end{array} \right\}, \quad (3.2)$$

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

де $[\sigma]_{20}=160$ МПа; $[\sigma]=152$ МПа. – допустимі напруження для матеріалу корпусу при температурі 20°C і розрахунковій температурі відповідно [14].

$$P_{np} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,5 \cdot 0,25 \cdot 140 / 132 \\ 0,25 + 0,3 \end{array} \right\} = \max \left\{ \begin{array}{l} 0,43 \\ 0,55 \end{array} \right\} = 0,55 \text{ МПа.}$$

Розрахункове значення для модуля поздовжньої пружності для матеріалу корпусу [14]: $E_{20}=2 \cdot 10^5$ МПа; $E=2 \cdot 10^5$ МПа.

Коефіцієнт міцності зварного шва складе $\phi = 0,9$ [14].

Товщина стінки циліндричної обичайки, навантаженої внутрішнім надлишковим тиском:

$$S_y = \frac{P_{np} \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \phi_p - P_{np}}; \quad (3.3)$$

$$S_y = \frac{0,55 \cdot 1,4}{2 \cdot 152 \cdot 0,9 - 0,55} = 2,82 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Виконавча товщина стінки:

$$S \geq S_y + C, \quad (3.4)$$

де C – загальне значення прибавки, яка складається зі складових:

$$C=C_1+C_2+C_3, \quad (3.5)$$

C_1 – прибавка на корозію і ерозію, при проникності $\Pi = 0,1$ мм/рік та терміні служби колони $\tau = 15$ років складе:

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

$$C_1 = \Pi \cdot \tau = 0,1 \cdot 15 = 1,5 \text{ мм};$$

C_2 – прибавка на мінусове значення граничного відхилення по товщині листа, мм;

C_3 – технологічна прибавка, яка враховується у залежності від прийнятої технології виготовлення і не включає в себе округлення розрахункової товщини елемента до номінальної товщини за стандартом, мм.

Прибавки C_2 і C_3 враховуються лише в тому випадку, коли їх сума перевищує 5 % від розрахункової товщини обичайки.

Таким чином, отримаємо:

$$C = 1,5 + 0 + 0 = 1,5 \text{ мм};$$

$$S = 2,82 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 4,32 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Приймаємо $S = 5 \text{ мм}$.

3.2 Визначення товщини стінки еліптичного днища апарата

Розрахункова схема еліптичного днища представлена на рис. 3.2.

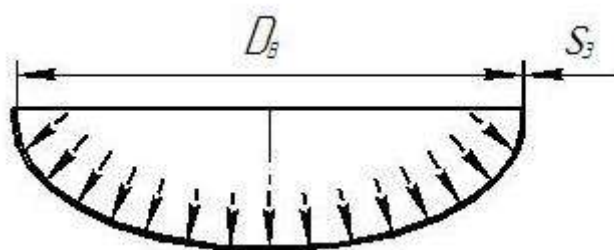


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема еліптичного днища апарата

Номінальна товщина стінки днища (кришки), навантажених внутрішнім надлишковим тиском:

$$S_e = \frac{P_p \cdot R}{2[\sigma] \cdot \phi - 0,5 \cdot P_p}, \quad (3.6)$$

де R – радіус кривизни в вершині днища; для еліптичних днищ $R = D$.

$$S_e = \frac{0,55 \cdot 1,4}{2 \cdot 152 \cdot 0,9 - 0,5 \cdot 0,55} = 2,82 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Загальне значення прибавки до товщини стінки днища (кришки) складе:

$$C = 1,5 + 0 + 0 = 1,5 \text{ мм;}$$

$$S = 2,82 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3} = 4,32 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Також приймаємо $S = 5 \text{ мм}$.

3.3 Розрахунок опори апарата

Визначимо навантаження порожнього апарату на опору за рівнянням [14]:

$$Q_{an} = M_{an} \cdot g, \quad (3.7)$$

де M_{an} – маса порожнього апарату;

$$M_{an} = M_k + M_{дн} + M_{кр} + M_t + M_{фл}, \quad (3.8)$$

де $M_k, M_{дн}, M_{кр}, M_t, M_{фл}$ – відповідно маси корпусу, днища, кришки, тарілок, фланців і арматури, кг.

Маса корпусу ректифікаційної колони дорівнює:

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
						40
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

$$M_{\kappa} = H \cdot \pi \cdot D \cdot s \cdot \rho, \quad (3.9)$$

де $\rho = 7900 \text{ кг/м}^3$ – щільність сталі 12Х18Н10Т.

$$M_{\kappa} = 11,5 \cdot 3,14 \cdot 1,4 \cdot 0,005 \cdot 7900 = 1997 \text{ кг.}$$

Маса днища та кришки апарата:

$$M_{\text{дн}} = M_{\text{кр}} = F \cdot s \cdot \rho, \quad (3.10)$$

де $F = 1,38 \text{ м}^2$ – площа внутрішньої поверхні еліптичного днища;

$$M_{\text{дн}} = M_{\text{кр}} = 1,52 \cdot 0,005 \cdot 7900 = 60 \text{ кг.}$$

Маса ситчастих тарілок:

$$M_m = N \cdot m_m, \quad (3.11)$$

де $m_m = 72 \text{ кг}$ – маса однієї ситчатої тарілки.

$$M_m = 23 \cdot 72 = 1656 \text{ кг.}$$

Прийmemo масу фланців і арматури рівною $M_{\text{фл}} = 1000 \text{ кг}$.

Таким чином, маса порожнього апарату дорівнює:

$$M_{\text{ан}} = 1997 + 2 \cdot 60 + 1656 + 1000 = 4773 \text{ кг;}$$

$$Q_{\text{ан}} = 4773 \cdot 9,81 = 46823 \text{ Н.}$$

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

Навантаження апарату на опору під час гідравлічних випробувань:

$$Q_{an}^e = (M_{an} + M_g) \cdot g, \quad (3.12)$$

де M_g – маса води, яка заливається в колону, кг.

$$M_g = V \cdot \rho_g, \quad (3.13)$$

де V – внутрішній об'єм циліндричної колони, м³.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H; \quad (3.14)$$

$$V = \frac{3,14 \cdot 1,4^2}{4} \cdot 11,5 = 17,69 \text{ м}^3;$$

$$M_g = 17,69 \cdot 1000 = 17690 \text{ кг};$$

$$Q_{an}^e = (4773 + 17690) \cdot 9,81 = 220362 \text{ Н}.$$

Таким чином, за [9] вибираємо юбочну опору третього типу виконання:
3-1400-1140-5-700.

3.4 Розрахунок на вітрове навантаження

Ректифікаційну колону розраховують як консольну балку, навантажену рівномірно розподіленим вітровим навантаженням, що діє на корпус колони, і зосередженими силами, які є рівнодійними сил вітрового натиску на окремі елементи конструкції (сходинок, площадки, теплообмінники тощо) [14].

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

Момент від розподіленого навантаження обчислюється як рівнодіюча, прикладена до середини апарату:

$$M = \beta \cdot c \cdot q \cdot D \cdot H, \quad (3.15)$$

де β – коефіцієнт збільшення швидкісного напору вітру за рахунок динамічного впливу, викликаного поривами вітру;

c – аеродинамічний коефіцієнт обтікання (для циліндричних апаратів $c = 0,6$);

q – значення вітрового напору на висоті, що відповідає середині розрахункової ділянки, $\text{H}/\text{м}^2$ [14];

D – зовнішній діаметр колони, м;

H – висота розрахункової ділянки (у нашому випадку висота апарату), м.

Коефіцієнт збільшення швидкісного напору вітру [14]:

$$\beta = 1 + \zeta \cdot m, \quad (3.16)$$

де ζ – коефіцієнт динамічності, який знаходять за графіком залежно від періоду власних коливань апарату [14];

m – коефіцієнт пульсації швидкісного напору вітру; приймають за графіком залежно від висоти колони [14].

$$\beta = 1 + 1,5 \cdot 0,9 = 2,35;$$

$$M = 2,35 \cdot 0,6 \cdot 3,5 \cdot 1,41 \cdot 11,5 = 80 \text{ МПа.}$$

Умова міцності на навітряній стороні апарату:

$$P \leq [\sigma] \cdot \varphi; \quad 80 \leq 152 \cdot 1 = 152 \text{ МПа} \text{ – умову виконано.}$$

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

4 МОНТАЖ ТА РЕМОНТ АПАРАТА

4.1 Монтаж апарата [15, 16]

При монтажі повністю зібраного апарата спочатку апарат збирається із блоків, а потім приварюється опора. Частини апарата, що стикуються, підтягують один до одного трубоукладачами або тракторами. Для збігу стиків по всьому периметру до кромки однією зі стикуючих частин приварюють вісім і більше напрямних планок, які після прихватки стику обрізають.

Стиковку роблять за заводськими контрольними рисками, нанесеними на корпусах. Відхилення розмірів ділянок, що стикуються, повинні бути в межах допустимих норм: зміщення кромки в кільцевих швах не повинно перевищувати 10 % товщини листа апарата, а у разі двошарової сталі повинно бути не більше товщини шару.

У зварюваних стиках ретельно контролюють зазори, які повинні бути в межах 2–4 мм незалежно від товщини листів обичайок. Кромки зварювальних частин ретельно очищають металевими щітками. Прихватку, як і повне зварювання, виконують електродами, передбаченими проектом. Стики, що виконані з двошарової сталі, прихоплюють на основному шарі. Технологія зварювання (спосіб і режим зварювання, порядок накладення швів і термооброблення) наводиться в проектній документації заводу-виготовлювача.

Ділянка території, де проводиться зварювання, повинна бути захищена від атмосферних опадів та вітру для запобігання забруднення шва. Бажано зварювання виконувати на роликовому стенді, на рамі якого встановлюють один або два зварювальних автомати. Для зварювання внутрішнього шва один автомат розміщують всередині апарату. Після завершення зварювання остаточно перевіряють всі розміри зібраного апарату, які повинні бути в межах допусків. Корпуси відповідальних колонних апаратів повинні відповідати таким вимогам: відхилення довжини не повинно перевищувати 0,3 % від проектного; кривизна циліндра на ділянці 1 м повинна бути не більше 2 мм, а для апаратів вище 10 м – не більше 3 мм.

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

Масообмінна тарілка – контактний пристрій в колонній апаратурі, поверхня контакту фаз в яких утворюється в процесі руху взаємодіючих потоків по поверхні тарілки. Спосіб монтажу ректифікаційних тарілок залежить від їх конструкції і технологічного призначення. Їх можна збирати при вертикальному (робочому) і горизонтальному положенні колони. Другий спосіб дозволяє скоротити загальну тривалість монтажних робіт, але пов'язаний із застосуванням пристосувань великої вантажопідйомності для підйому апарата (рис. 4.1).

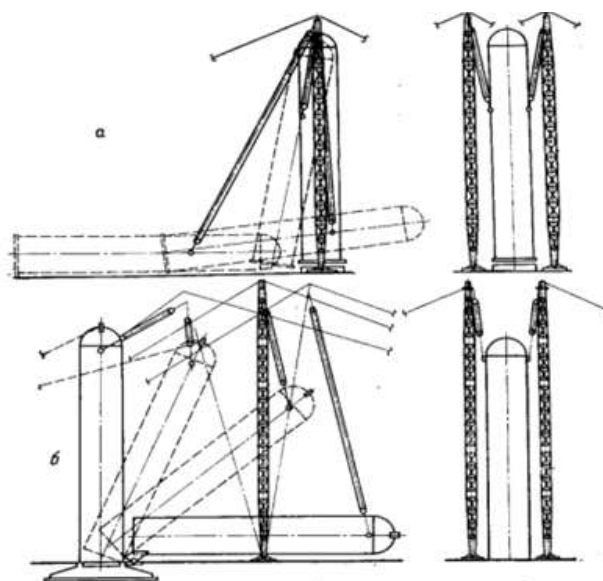


Рисунок 15 – Способи підйому колонного апарата:

а – способом ковзання опорної частини; б – поворотом навколо шарніра

При горизонтальному положенні апарата тарілки встановлюють строго вертикально; їх положення перевіряють по схилу, що накладають на декількох точках, і по заздалегідь нанесеним на внутрішніх стінках апарату мітках, для чого апарат доводиться повертати навколо осі на 90° .

Значно легше забезпечити строго горизонтальне положення тарілок в уже установленому, вивіреному і закріпленому на фундаменті корпусі апарата. У цьому випадку достатньої точності добиваються або за допомогою рівня, або заливаючи на поверхню тарілки воду.

Збірку тарілок починають з приварки до внутрішньої стінки корпусу колони опорних (несучих) елементів і нероз'ємних деталей (карманів, зливів, дисків, глухих сегментів). Зварювання проводять у відповідності до технічних умов, і з огляду на те, що при роботі колони важко визначити окремі дефекти зварювання. Після складання всіх елементів кожна тарілка перевіряється на барботаж. Для цього закриваються всі люки, розташовані нижче контрольованої тарілки, тарілка заливається водою, щоб надмірна кількість води зливалася через зливні пристрої. Злив по всьому периметру повинен бути однаковим, тому передбачається можливість його регулювання. Товщина шару води на всіх ділянках тарілки повинна бути також однаковою. Після заповнення гідро затворів за допомогою компресора нагнітається повітря. Рівномірність барботажа контролюється візуально.

4.2 Ремонт апарата [16, 17]

Перед початком ремонту працівники технологічного цеху (оператори) виконують підготовчі роботи. Потім до роботи приступає ремонтний персонал виконавця ремонтних робіт (слюсарі-ремонтники). Як правило, при ремонті колонних апаратів із внутрішніми пристроями тарільчатого типу передбачаються наступні роботи:

- приймання колони в ремонт за актом представником ремонтної організації (майстром ремонтно-механічної бригади).
- перед тим, як безпосередньо приступити до ремонту, необхідно отримати інструктаж з охорони праці, техніки безпеки, газобезпеки, пожежної безпеки і оформити наряд допуску на проведення газонебезпечних робіт всередині колонного апарата.
- керівник ремонтного підрозділу (майстер РМЦ) повинен ознайомитися з результатами підготовчих робіт до ремонту колони або в цілому установки, зазначених в наряді допуску.

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

- отримати дозвіл особи, відповідальної за організацію безпечного проведення газонебезпечних робіт в цеху (начальника або заступника начальника цеху) і приступити до виконання ремонтних робіт.
- відкриття люків-лазів проводять, починаючи із верхнього, а далі послідовно зверху вниз. Забороняється одночасно відкривати верхній і нижній люки-лази, щоб уникнути підсосу повітря в колону і займання пароповітряної суміші.
- працівниками технологічного цеху проводиться відбір проб повітря з усіх люків колони. Результати аналізів на вміст вибухонебезпечних і вибухопожежонебезпечних речовин, і на вміст кисню записуються в наряді допуску.
- перед початком ремонту перевіряють температуру повітряного середовища всередині колони, яка не повинна перевищувати 30°C. Під час очистки і розбирання тарілок в колоні працює по двоє людей в кожному люку: один всередині колони у шланговому протигазі з рятувальним поясом і сигнально рятувальною мотузкою; другий спостерігаючий дублер: зовні, поруч із люком, зі шланговим протигазом.

Очищення стінок міжтарілчастого простору, опорних конструкцій тарілок, зливних карманів і стінок кубової частини колони роблять за допомогою металевих скребків і щіток, а також за допомогою механізованих пристосувань і інструментів. Відкладення і бруд видаляють з колони дерев'яними лопатами через люк-лаз і спускають їх в цеберку зі спеціальними жолобами.

Тарілки розбирають в кожному люку послідовно, починаючи з верхньої. Повне розбирання усіх тарілок роблять по секціях (сегментах). Спуск секцій тарілок проводиться за допомогою кран-укосини.

Чистку тарілок проводять на зовнішньому майданчику в захисних окулярах за допомогою металевих скребків і щіток.

Одночасно проводять продування секцій парою і відбраковування дефектних деталей тарілок шляхом обстукування молотком вагою до 1 кг.

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

Після очищення проводять заміну частини ковпачків. Деталі ковпачків виготовляються заново і збираються. Найбільш відповідальною операцією є приварка шпильки до корпусу ковпачка, оскільки якщо ці деталі не будуть на одній осі – правильне встановлення ковпачка є неможливим. Співвісність деталей забезпечується спеціальною оправкою, яка дозволяє також змінювати висоту шпильки шляхом її часткового розгинання при затягуванні гайки.

При ремонті корпусу колони керуються стандартами, відповідно до яких розробляється технологія усунення дефектів корпусу і його покриття. Ремонт опорних конструкцій тарілок, зливних карманів вогневими методами із використанням ручного дугового електрозварювання (РДЕЗ) і газозварювання проводять після оформлення дозволу на проведення вогневих робіт усередині апарата, дозволу на проведення газонебезпечних робіт і наряду-допуску на проведення робіт підвищеної небезпеки на кожну робочу зону, при позитивних аналізах повітряного середовища всередині колони.

Найбільш зношені ділянки корпусу колони вирізають, а на їх місце встановлюються нову ділянку, заздалегідь звальцьовану по радіусу колони. Тип зварювання – встик. Вирізання великих ділянок корпусу може призвести до ослаблення перетину і порушення стійкості. Тому до вирізання дефектної ділянки її зміцнюють стійками, що встановлюються всередині або зовні. Число та перетин стійок, розміри опорних лап розраховують, виходячи з умови рівності їх опорів опору вирізаного перетину. За допомогою таких стійок можна замінити весь пошкоджений пояс колони декількома частинами.

Зборку тарілок проводять аналогічно розбиранню, у зворотному порядку, знизу-вгору. При складанні тарілок контролюють горизонтальність установки тарілок за шаблоном або за допомогою лінійки і рівня. Відхилення від горизонтальності має бути в допустимих межах, визначених індивідуально для кожного типу тарілок.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Параметри, що визначають пожежну небезпеку горючих газів, рідин та твердих речовин. Поняття про процеси горіння та вибуху.

Важливе значення для визначення рівня пожежної безпеки і вибору засобів та заходів профілактики і гасіння пожежі мають пожежовибухонебезпечні властивості речовин і матеріалів.

Пожежовибухонебезпека речовин та матеріалів – це сукупність властивостей, які характеризують їх схильність до виникнення й поширення горіння, особливості горіння і здатність піддаватись гасінню загорянь. За цими показниками виділяють три групи горючості матеріалів і речовин: негорючі, важкогорючі та горючі [18].

Оцінка пожежовибухонебезпечності речовин та матеріалів полягає у визначенні ряду показників, характеристика яких залежить також від їх агрегатного стану (відповідно до ГОСТ 12.1.044 – 89) [19].

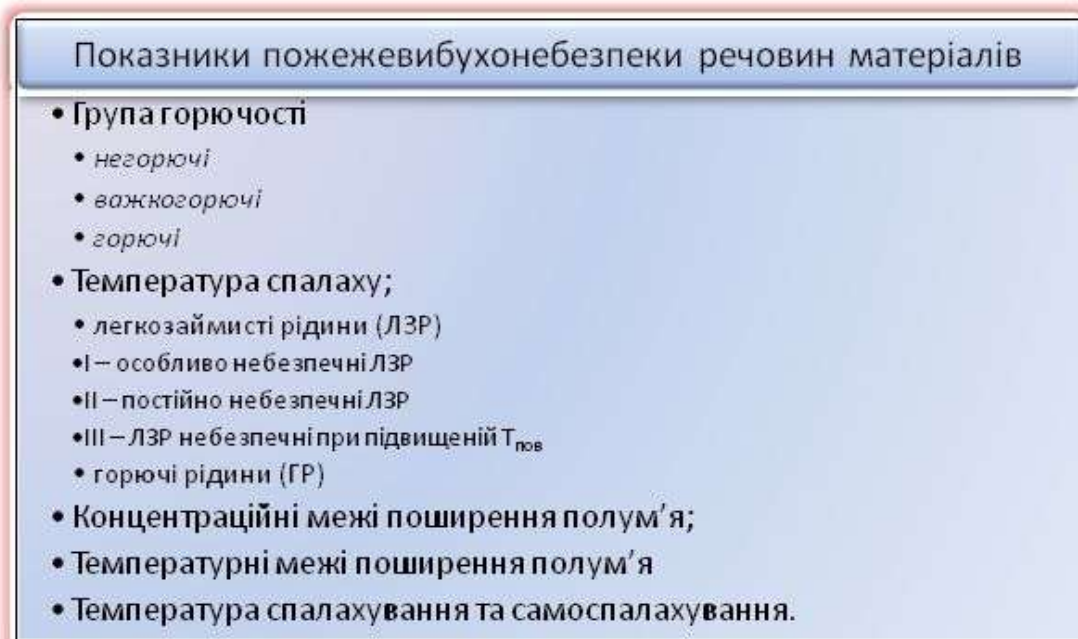


Рисунок 5.1 – Показники пожежовибухонебезпеки речовин і матеріалів

Негорючі (неспалимі) – речовини та матеріали, нездатні до горіння чи обуглювання у повітрі під впливом вогню або високої температури. Це матеріали мінерального походження та виготовлені на їх основі матеріали - червона цегла, силікатна цегла, бетон, камінь, азбест, мінеральна вата, азбестовий цемент та інші матеріали, а також більшість металів. При цьому негорючі речовини можуть бути пожежонебезпечними, наприклад, речовини, що виділяють горючі продукти при взаємодії з водою.

Важкогорючі (важко спалимі) – речовини та матеріали, що здатні спалахувати, тліти чи обуглюватись у повітрі від джерела запалювання, але нездатні самостійно горіти чи обуглюватись після його видалення (матеріали, що містять спалимі та неспалимі компоненти, наприклад, деревина при глибокому просочуванні антипіренами, фіброліт і т. ін.) [18];

Горючі, які здатні самозайматись, а також займатись від джерела запалювання і самостійно горіти після його вилучення (органічні сполуки, наприклад, гази (метан, етилен, ацетилен), рідини (спирти, ефіри, ацетон, бензин, гас), тверді речовини (дерево, пластмаси, каучук)).

Температура спалаху $t_{сп}$ – найнижча температура горючої речовини, при якій над її поверхнею утворюються пари або гази, здатні спалахнути від джерела запалювання, але швидкість їх утворення ще не достатня для стійкого горіння.

За температурою спалаху розрізняють:

- легкозаймісті рідини (ЛЗР), рідини, $t_{сп} 61^{\circ}\text{C}$ у закритому тиглі або $t_{сп} 66^{\circ}\text{C}$ у відкритому тиглі (бензен, ацетон, етиловий спирт);
- горючі рідини (ГР) – рідини, $t_{сп} > 61^{\circ}\text{C}$ у закритому тиглі або $t_{сп} > 66^{\circ}\text{C}$ у відкритому тиглі (мінеральні мастила, мазут).

ЛЗР в свою чергу поділяються на три розряди:

I – особливо небезпечні ЛЗР з температурою спалаху $t_{сп} -18^{\circ}\text{C}$ в закритому тиглі; $t_{сп} -13^{\circ}\text{C}$ у відкритому тиглі;

II – постійно небезпечні ЛЗР: $-18^{\circ}\text{C} < t_{сп} < +23^{\circ}\text{C}$ у закритому тиглі, $-13^{\circ}\text{C} < t_{сп} < +27^{\circ}\text{C}$ у відкритому тиглі;

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		50

III – ЛЗР небезпечні при підвищеній температурі повітря: $23^{\circ}\text{C} < t_{\text{сп}} < 61^{\circ}\text{C}$ в закритому тиглі, $27^{\circ}\text{C} < t_{\text{сп}} < 66^{\circ}\text{C}$ у відкритому тиглі.

За відсутності даних про температуру спалаху її можна наближено розрахувати, користуючись правилом Орманді і Гревена:

$$T_{\text{сп}} = T_{\text{кип}} \cdot 0,736. \quad (5.1)$$

Температура спалахування (t_c) – найнижча температура речовини, при якій вона виділяє горючі гази і пари з такою швидкістю, що після їх запалювання виникає стійке горіння. Між температурою спалаху і температурою спалахування завжди зберігається співвідношення: $t_{\text{сп}} < t_c$.

Температура самозаймання ($t_{\text{сз}}$) – найнижча температура речовини, при якій відбувається різке збільшення швидкості екзотермічних реакцій, що призводить до виникнення полум'янистого горіння. За температурою самоспалахування вибухонебезпечні суміші газів і пари рідини поділяються на шість температурних класів:

- 1 – $t_{\text{сз}} > 450^{\circ}\text{C}$;
- 2 – $t_{\text{сз}} 300 \dots 450^{\circ}\text{C}$;
- 3 – $t_{\text{сз}} 200 \dots 300^{\circ}\text{C}$;
- 4 – $t_{\text{сз}} 135 \dots 200^{\circ}\text{C}$;
- 5 – $t_{\text{сз}} 100 \dots 135^{\circ}\text{C}$;
- 6 – $t_{\text{сз}} 80 \dots 100^{\circ}\text{C}$.

Температура самонагрівання ($t_{\text{сн}}$) – найнижча температура речовини, при якій самочинний процес її нагрівання не призводить до тління або полум'янистого горіння.

Дані про $t_{\text{сн}}$ використовують при виборі безпечних умов нагрівання речовини, розробці заходів щодо забезпечення пожежебезпеки технологічних процесів відповідно до вимог ГОСТ 12.1.004-91.

Безпечна температура довготривалого нагрівання речовини – температура, яка не перевищує 90% $t_{\text{сн}}$.

Нижня (НКМ) та верхня (ВКМ) концентраційні межі поширення полум'я – це мінімальна та максимальна об'ємна (масова) частка горючої речовини у суміші з даним окислювачем (повітрям), при яких можливе спалахування суміші від джерела запалювання з наступним поширенням полум'я по суміші на будь-яку відстань від джерела запалювання.

НКМ і ВКМ виражаються в об'ємних відсотках (об.%) і є характеристиками газів і горючих рідин (табл. 5.1).

Таблиця 5.1 – Концентраційні та температурні межі поширення полум'я деяких речовин

Речовина	НКМ, об. %	ВКМ, об. %	НТМ, °С	ВТМ, °С
Водень	4	75	–	–
Окис вуглецю	12,5	74	–	–
Ацетон	2	13	-20	0
Бензен	1,4	7,7	-14	13
Толуол	1,3	6,7	0	30

Пожеже- та вибухонебезпечні властивості пилу характеризуються нижньою концентраційною межею займання (НКМЗ), вираженого у г/м³.

Залежно від НКМ аерозолі твердих речовин розподіляються так:

- особливо вибухонебезпечні – НКМ < 15 г/м³;
- вибухонебезпечні – НКМ = 15...65 г/м³;
- пожеженебезпечні – НКМ > 65 г/м³.

НКМ для пилу алюмінію дорівнює 10 г/м³, Mg – 25 г/м³, торф'яного пилу – 17,6 г/м³, залізного порошку – 100 г/м³, сірки – 2,3 г/м³.

Вибухонебезпека горючих газів, парів та пилу тим більша, чим меншою є НКМ і чим більший діапазон між НКМ та ВКМ, тобто чим більшою є область спалахування (вибуховості).

Нижня (НТМ) та верхня (ВТМ) температурні межі поширення полум'я – мінімальна та максимальна температури речовини, за яких її насичені пари утворюють у повітрі концентрації рівні відповідно НКМ та ВКМ (табл. 5.1).

Існують і інші показники для оцінки пожежної та вибухової небезпеки речовин та матеріалів, які визначаються за стандартними методиками:

- максимальний тиск вибуху – це найбільший тиск, що виникає внаслідок вибуху найбільш пожежовибухонебезпечної газо-, паро- або пилоповітряної суміші в замкнутому об'ємі при початковому тиску 0,1 МПа. $P_{\max} = 0,66$ МПа для А1, $P_{\max} = 8,93$ МПа для ацетону;
- мінімальна енергія запалювання – це найменше значення енергії іскри електричного розряду в мДж, що здатна запалити найбільш вибухонебезпечну суміш газів, пари рідини або пилу з повітрям. Звичайно енергія іскри електричного розряду дорівнює 2,5...7,5 мДж. $W_{\min} = 0,25$ мДж для алюмінію (А1), $W_{\min} = 80$ мДж для стануму (Sn), $W_{\min} = 15$ мДж для пилу полістиролу [19].

Горіння – це фізико-хімічний процес взаємодії горючої речовини з киснем повітря, унаслідок чого виділяється тепло й випромінюється світло.

Основою процесу горіння є комплекс екзотермічних окислювально-відновлювальних реакцій горючої речовини з окислювачем.

За звичайних умов горіння являє собою процес окислення або з'єднання горючої речовини з киснем повітря. Однак деякі речовини (стиснений ацетилен, хлористий азот, озон) можуть вибухати і без кисню з утворенням тепла й полум'я. Отже, горіння може бути результатом не тільки реакції з'єднання, а й реакції розпаду речовин. Водень і деякі метали можуть горіти в атмосфері хлору, мідь – у парах сірки, магній – у діоксиді вуглецю. Найбільш небезпечним є горіння, що виникає при окисленні горючої речовини киснем повітря.

Процес горіння потребує поєднання трьох компонентів: речовини, що здатна горіти; джерела вогню з необхідним запасом енергії горіння й певної кількості окислювача.

Окислювачем є кисень. Найбільш бурхливо відбуваються процеси горіння в чистому кисні. Однак окислювачем можуть бути кисневмісні речовини, такі як марганцевокислий калій KMn_2O_4 , селітра KNO_3 , $NaNO_3$, азотна кислота HNO_3 та ін.

При зменшенні концентрації кисню в повітрі інтенсивність горіння різко знижується, а при вмісті його в повітрі до 14 % для більшості речовин припиняється.

Найбільш розповсюдженими джерелами вогню є

- іскри, що з'являються в несправному електрообладнанні, при ударах металевих частин, зварюванні;
- теплота, що виникає внаслідок тертя;
- технологічні нагрівальні апарати й пристрої;
- апарати вогневої дії;
- теплота адіабатичного стиснення;
- іскрові розряди статичного струму;
- нагрівання електричних контактів;
- хімічні реакції, що відбуваються з виділенням теплоти та ін.

Температура нагрівання горючої речовини від цих джерел різна. Так, іскра, що виникає від удару металевих частин, може мати температуру до 1900°C, полум'я сірника – близько 800°C, ведучий барабан стрічкового конвеєра при пробуксовці – до 600°C, при електричних розрядах температура сягає 10000°C.

Горючі речовини можуть перебувати в трьох агрегатних станах: рідкому, твердому та газоподібному. **Тверді горючі речовини** залежно від їхнього складу й будови в процесі нагрівання поведуться по-різному. Деякі з них (наприклад, нафталін, сірка, каучук) плавляться й випаровуються, інші (деревина, торф, кам'яне вугілля, папір) розкладаються та утворюють газоподібні продукти й твердий залишок.

Рідкі горючі речовини в процесі нагрівання випаровуються, а деякі можуть і окислюватися.

Отже, більшість горючих речовин незалежно від первісного агрегатного стану внаслідок нагрівання перетворюються на **газоподібні продукти**, які,

стикаючись з повітрям, утворюють горючу суміш. Горючі суміші можуть також виникати і в результаті розпилення твердих та рідких речовин.

Якщо речовина утворила з повітрям горючу суміш, вона вважається готовою до горіння. Горюча суміш становить велику пожежну небезпеку, бо не потребує потужного й тривалодіючого джерела запалювання – вона швидко займається навіть від малопотужної іскри. Важливою якісною характеристикою горючої суміші є процентне співвідношення горючої речовини й кисню в повітрі.

Горючі суміші залежно від співвідношення пального та окислювача поділяються на такі види:

- бідні, що мають у достатній кількості окислювач і невелику кількість горючої речовини;
- багаті, що мають надлишок горючої речовини.

Якісні показники горючої суміші визначаються хімічною структурою горючої речовини і її здатністю змішуватися з киснем повітря.

Процес горіння може бути повним і неповним. При надмірній кількості кисню в повітрі горіння буде повним. При повному згорянні утворюються продукти, які не можуть більше горіти, – вуглекислий або сірчаний газ, пара води, азоту. При недостатній кількості кисню горіння буде неповним. Неповне згорання супроводжується утворенням продуктів неповного окислення, які є вибухонебезпечними й токсичними речовинами, – оксиди вуглецю, альдегіди та ін. Так, при неповному згорянні деревини утворюються оксид вуглецю, пари метилового спирту, ацетону та оцтової кислоти, які при зміні умов горіння можуть самі спалахувати або, у відповідних концентраціях, чинити отруйну дію на організм людини.

Залежно від швидкості хімічної реакції та утворення горючої суміші горіння може відбуватися у вигляді **тління** (швидкість до декількох см/с), **власне горіння** (швидкість до декількох м/с), **вибуху** (швидкість до декількох сотень м/с) і **детонацій** (швидкість до декількох тисяч м/с).

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

Швидкість горіння залежить від кількісних і якісних показників горючої суміші та імпульсу запалювання, які в процесі горіння можуть змінюватися або залишатися постійними. Так, наприклад, при збільшенні дисперсності твердої горючої речовини або її здатності виділяти горючі гази й пару стрімко зростає і швидкість горіння. Крім того, горіння речовини може відбуватися інтенсивніше при збільшенні її питомої поверхні.

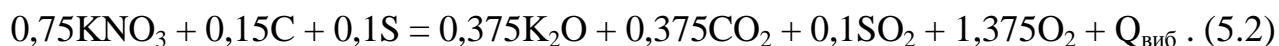
Залежно від швидкості розповсюдження полум'я горіння класифікується як *дефлаграційне*, що відбувається з дозвуковими швидкостями, або як *детонаційне*, що має надзвукові швидкості. Однак такий поділ процесів горіння є досить умовним.

Нормальною швидкістю горіння називається швидкість переміщення полум'я по нерухомій суміші вздовж нормалі до її поверхні. При дефлаграційному горінні ця швидкість, як правило, становить від декількох сантиметрів до декількох метрів на секунду. Наприклад, нормальна швидкість горіння метану (10,5 %) з повітрям становить 37 см/с.

Повільне рівномірне розповсюдження горіння стійке лише в тому випадку, коли воно не супроводжується підвищенням тиску. Якщо горіння відбувається в замкнутому просторі, то тоді за рахунок теплопровідності й високої температури незгорілий газ починає рухатися. Невпорядкований рух газів у суміші, що горить, викликає значне збільшення поверхні фронту полум'я, що призводить до *вибуху* [20].

Викликати вибух можуть фізичні процеси та хімічні перетворення. Тому прийнято розрізняти вибухи фізичні та хімічні (теплові). До фізичних відносяться вибухи, при яких не відбуваються хімічні реакції. Це вибухи посудин, що працюють під тиском, вибухи електродинамічні і термодинамічні. Хімічним вибухом ВР (вибухових речовин) називають хімічне перетворення, що самопоширюється з великою швидкістю і протікає з виділенням великої кількості тепла та утворенням газів. До хімічних вибухів відносяться вибухи конденсованих ВР, вибухи пальних газопароповітряних або пилоповітряних

сумішей. Прикладом є вибух димного пороху, при якому відбувається швидка хімічна реакція між селітрою, сіркою і вуглецем, що супроводжується виділенням великої кількості теплоти. Таку хімічну реакцію можна записати у вигляді формули:



Газоподібні продукти, що утворилися, нагріваються за рахунок теплоти реакції до високої температури (кілька тисяч градусів) і мають високий тиск (сильно стиснуті). При розширенні ці гази роблять механічну роботу, тобто в ході вибуху відбувається звільнення накопиченого в речовині або в системі великого запасу енергії. Таким чином, можна визначити чотири умови, при яких хімічна реакція буде протікати у формі вибуху:

- а) екзотермічність;
- б) утворення газів;
- в) велика швидкість;
- г) здатність до самопоширення.

Вибух – це процес швидкого виділення великої кількості енергії, викликаного раптовим фізичним або хімічним перетворенням речовини або суміші. Він може бути викликаний детонацією або фізичним розкладом речовин, а також під час хімічних перетворень, при швидкому згорянні газо-, паро- або пилоповітряних сумішей. Основною ознакою вибуху є миттєва зміна тиску, який залежить від температури та об'єму продуктів горіння.

У найбільш широкому значенні слова вибухом називають фізичне або хімічне перетворення речовини, що супроводжується у край швидким переходом його енергії в енергію стиску і руху вихідної речовини або продуктів його перетворення та навколишнього середовища.

При вибуху розрізняють дві стадії:

Перша стадія – перетворення того чи іншого виду енергії в енергію сильно стиснутих газів. У випадку вибуху димного пороху – це екзотермічна реакція, що протікає з дуже великою швидкістю і в якій утворюються сильно стиснуті гази та пари. При ядерному вибуху – це швидкопротікаючі ядерні або термоядерні реакції – реакції поділу або з'єднання атомних ядер, при яких звільняється велика кількість теплоти. Продукти реакції, оболонка атомної або водневої бомби і деяка кількість середовища навколо бомби миттєво перетворюються в нагріті до дуже високої температури гази, що знаходяться під високим тиском.

Друга стадія – миттєве розширення сильно стиснутих газів і парів. У процесі розширення потенційна енергія стиску звичайно переходить у механічну роботу. Ця робота приводить навколишнє середовище в рух, що може викликати руйнування конструкцій, якщо виниклі напруги перевищують їх межу міцності. Унаслідок швидкості, з якою реакція проходить по ВР, гази, що утворюються, навіть при відсутності міцної оболонки, набувають високого тиску і здатні, розповсюджуючись по навколишньому середовищу, породжувати в ньому ударні хвилі, здійснювати сильний удар, що руйнує і розкидає перепони. Таким чином, край швидкий прояв дії тиску, як правило, дуже великого, являє собою основну характерну ознаку вибуху.

Спостерігаються дві форми вибуху:

1. Гомогенний вибух має місце, коли відбувається одночасне і рівномірне нагрівання всієї системи вибухової речовини, у результаті чого по досягненні температури samozapalювання або вибуху виникає вибухове перетворення по всій масі речовини.

2. Вибух, що самопоширюється, має місце тоді, коли вибухове перетворення виникає в якій-небудь ділянці заряду ВР і потім поширюється по речовині. Він характеризується наявністю фронту перетворення, тобто вузької зони інтенсивної хімічної реакції, що відокремлює в кожен даний момент продукти реакції від вихідної речовини, що ще не прореагувала, і рухається з

визначеною швидкістю. Швидкість поширення вибухового перетворення визначається відстанню, на яке переміщається фронт реакції в одиницю часу.

Унаслідок вибуху звичайно утворюються вибухові хвилі.

Вибухові хвилі поширюються у вигляді ударних хвиль або хвиль стиску. На фронті ударних хвиль стрибкоподібно змінюється тиск, щільність, температура, швидкість руху часток середовища (рис. 5.2). Для хвиль стиску характерна поступова зміна цих параметрів. Під тиском мається на увазі надлишковий тиск, який виникає у середовищі при проходженні вибухової хвилі. Параметри хвиль (тиск, час дії, швидкість поширення і т. п.) залежать від:

- джерела енергії вибуху;
- навколишнього середовища (повітря, ґрунт, вода);
- інтенсивності протікання хімічної реакції (режиму горіння);
- інших факторів.

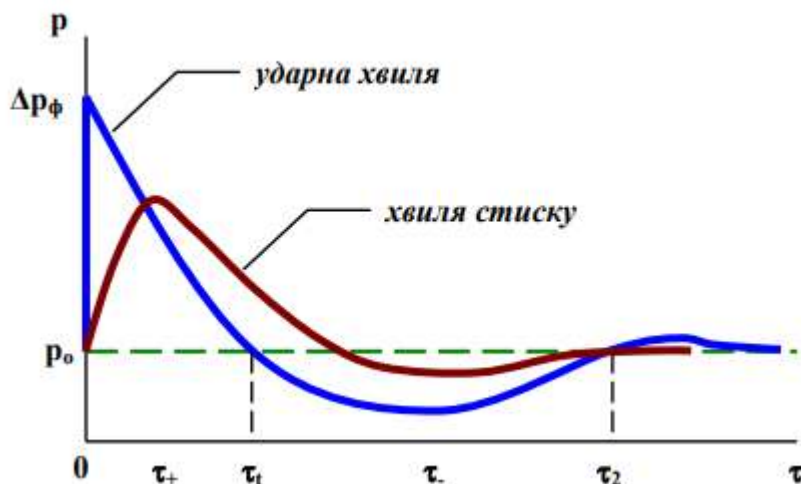


Рисунок 5.2 – Схема зміни тиску в часі у фіксованій на місці точці для ударної хвилі та хвилі стиску

Вибухові хвилі впливають на конструкції споруд як короточасні динамічні навантаження. В залежності від призначення споруди та причин вибуху короточасні динамічні навантаження можуть бути експлуатаційними та аварійними. При експлуатаційних навантаженнях у конструкціях не повинні

виникати деформації, що порушують нормальну експлуатацію споруди. При аварійних навантаженнях у деяких конструкціях споруди можуть виникати пластичні деформації і, навіть, руйнації.

У залежності від механізму передачі теплоти від шару до шару ВР розрізняють два види вибухового перетворення: детонацію і дефлаграцію (горіння). При дефлаграційному процесі (горінні) теплота, що виділяється в зоні реакції, передається шляхом теплопередачі від гарячих продуктів реакції до найближчого шару ВР, викликаючи в ньому, у свою чергу, інтенсивну хімічну реакцію. Процес повторюється й у наступних шарах ВР. У цьому випадку хімічне перетворення поширюється при атмосферному тиску з дозвуковою швидкістю. Швидкість поширення сильно залежить від тиску, при якому протікає процес.

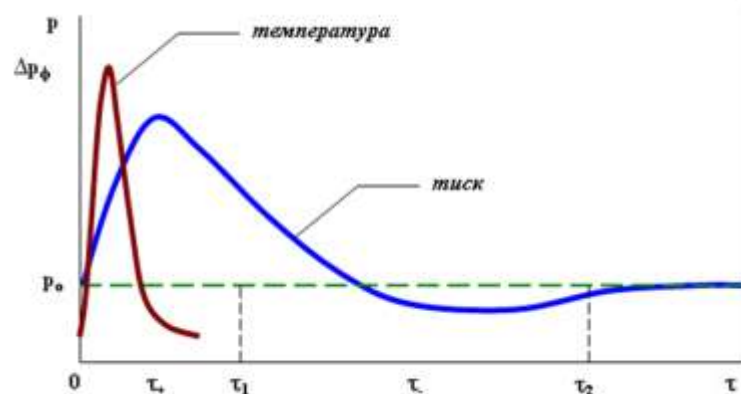


Рисунок 5.3 – Схема зміни тиску і температури в часі у фіксованій на місці точці при дефлаграційному вибуху

Фронт дефлаграційного горіння нагадує "проникний поршень", що створює при русі попереду себе хвилю стиску. Надмірний тиск ΔP_ϕ в хвилі стиску поступово збільшується від фронту хвилі до фронту полум'я. Хвиля стиску також утворює, так званий, швидкісний натиск – динамічне навантаження, що утворюється потоком повітря. Швидкісний натиск є основним руйнівним чинником для будівельних конструкцій. Максимальні значення надмірного тиску і швидкісного натиску досягаються перед фронтом

полум'я, позаду якого утворюється вогненна куля з високою температурою випромінювання (1800...2500°C).

Коли горіння відбувається в незамкнутому просторі, воно не супроводжується ані характерним звуковим ефектом, ані механічною роботою. У замкнутому ж просторі процес протікає енергійніше: швидко піднімається тиск, у зв'язку з чим збільшується швидкість горіння. При горінні в замкнутому об'ємі, наприклад у зарядній камері гармати або в шпурі, характерно більш-менш швидке, але не різке наростання тиску газів до значень декількох сотень МН/м² (декількох тисяч атмосфер).

При детонаційному процесі механізм поширення хімічного перетворення ВР обумовлений передачею енергії від шару до шару хвилею стиску, тобто ударною хвилею. У цьому випадку хімічне перетворення поширюється по речовині з надзвуковою швидкістю або швидкістю, близькою до швидкості звуку.

Детонація може виникнути при наявності деяких умов, при яких горіння вибухових речовин стає нестійким, швидкість його починає збільшуватися, а, починаючи з деякого її значення, змінюється режим вибухового перетворення – виникає ударна хвиля. Швидкість ударної хвилі продовжує наростати, але до деякого граничного значення. Таким чином, швидкість вибухового перетворення, що протікає по механізму детонації, безупинно зростає від мінімального до граничного, постійного значення.

Детонація характеризується різким стрибком тиску в місці вибухового перетворення до 30-40 млн. Н/м² (300-400 тис. кгс/см²) і дуже різкою дією на навколишнє середовище. У момент підходу ударної хвилі до перешкоди тиск стрибком підвищується від атмосферного P_0 до значення $P_0 + \Delta P_\phi$ у фронті хвилі, а потім поступово убуває (рис. 5.4). Після часу τ_t від моменту приходу ударної хвилі фаза стиснення переходить у фазу розрядки, але максимальна розрядка $\Delta P < 0,3\Delta P_\phi$. Одночасно з тиском у фазі стиснення виникає рух повітря у напрямі розповсюдження хвилі – швидкісний натиск, який рухається за фронтом ударної хвилі.

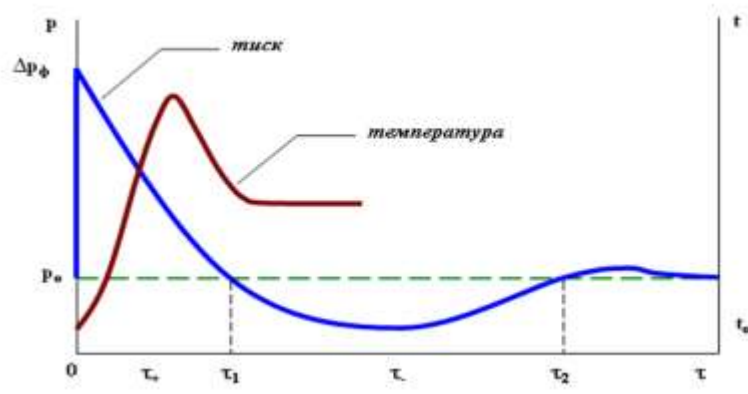


Рисунок 5.4 – Схема зміни тиску і температури в часі у фіксованій на місці точці при детонаційному вибуху

Безпосереднє ураження ударною хвилею виникає в результаті дії надлишкового тиску та швидкісного натиску повітря. Ступінь пошкодження будівель та споруд в залежності від їх конструктивних особливостей визначається або надлишковим тиском, або швидкісним натиском.

Наприклад, при невеликих розмірах об'єкту ударна хвиля майже миттєво охоплює його та надає сильного тиску (людиною миттєве підвищення тиску сприймається як різкий удар). У той же час швидкісний натиск утворює сильний лобовий тиск на об'єкт, який обумовлює його зсув у просторі та/або перекидання.

У фазі розрядки повітря рухається у зворотному напрямі. А на дальніх відстанях ударні хвилі від вибухів переходять в слабкі хвилі стиску.

Класифікація вибухових речовин (ВР) здійснюється за такими ознаками:

- 1) за агрегатним станом – гази, рідини і тверді речовини; 2) за складом – однорідні речовини і суміші; 3) за приналежністю до певного класу хімічних сполук; 4) за ступенем стійкості горіння.

Більшість вибухових речовин є твердими тілами (наприклад, тротил, ксиліл і т.п.). Менш поширені, але так само різноманітні рідкі вибухові речовини. Вибуховими речовинами можуть бути і гази, наприклад суміші повітря з парами бензину або горючими газами. Так суміш повітря з газом

метаном приводить до вибухів у шахтах, якщо в них не забезпечена правильна вентиляція. Нарешті, вибуховою системою може бути пилоповітряні горючі суміші, наприклад вугільний пил, пил борошна і т. п.

ВР, що належать до одного класу хімічних сполук, можуть значно розрізнятися по стійкості горіння, тобто по характеру вибухового перетворення, а отже й по можливостях їхнього застосування. По зазначених ознаках розрізняють три групи ВР:

Група I – ініціюючі (первинні) вибухові речовини (ІВР). Вони легко вибухають від простих видів зовнішнього впливу – полум'я, удару, тертя. Тому вони служать для збудження детонації бризантних ВР. Найважливішими представниками ІВР є гримуча ртуть, тетразен, азид свинцю та ін. Призначення ІВР – запалення порохових зарядів, сповільнювачів у дистанційних трубках і підривниках та інших об'єктів.

Група II – бризантні або подрібнювальні (вторинні) вибухові речовини (БВР). Характерним видом вибухового перетворення ВР цієї групи є детонація. У звичайних умовах БВР не здатні вибухати від підпалювання, тому для виникнення їх детонації застосовують ІВР. БВР застосовують головним чином для спорядження боєприпасів і для підривних робіт.

Група III – металні вибухові речовини (МВР) або порохи. Для речовин цієї групи характерним видом вибухового перетворення є горіння, що не переходить у детонацію. Для збудження горіння необхідна дія полум'я. Таким чином, вибух заряду ВР може бути збуджений вибухом іншого заряду. Заряд, що вибухає першим, називають ініціюючим зарядом. Заряд, що вибухає під впливом вибуху активного заряду, називають пасивним зарядом або зарядом, що ініціюється [21].

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Однорідні суміші [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://miyklas.com.ua/p/himija/7-klas/pochatkovi-khimichni-poniattia-39391/chisti-rechovini-i-sumishi-39129/re-7ec6f62d-c618-4cba-8412-d8140444f7ea>
2. Ректифікація. Вікіпедія [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Ректифікація>
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. 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.
5. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологии / И.Л. Иоффе. – Л. : Химия, 1991. – 352 с.
6. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 752 с.
7. 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.
8. Лазинский А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А. А. Лазинский, А. Р. Толчинский. – Л. : Машиностроение, 1970. – 752 с.
9. Лазинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник / А. А. Лазинский. – Л. : Машиностроение, 1981. – 382 с.
10. 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.

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		64

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. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Под ред. Дытнерского Ю. И. – М. : Химия, 1983. – 272 с.

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

14. 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.

15. Гайдамак К. М. Монтаж оборудования предприятий химической и нефтехимической промышленности / К. М. Гайдамак, Б. А. Тыркин. – М. : Высшая школа, 1974. – 286 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. Основи пожежної профілактики на виробничих об'єктах [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ztec.com.ua/ztec/e-lib/Охорона%20праці/Тема%2018%20Основи%20пожежної%20профілактики.pdf>

19. Шкідливі речовини в повітрі робочої зони, їх класифікація та нормування [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cpo.stu.cn.ua/Oksana/posibnik/590.html>

20. Кобилянська І. М. Основи охорони праці : Навчальний посібник / І. М. Кобилянська, О. В. Кобилянський, С. Л. Яблочников. – Вінниця : 2007. – 171 с.

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		65

21. Поняття про вибух. Вплив вибуху на будівлі та споруди.
Вибухозахист [Електронний ресурс]. – Режим доступу:
<http://ekhnuir.univer.kharkov.ua/bitstream/123456789/7629/2/МЕТОДИЧКА%2020ЦЗ.pdf>

					ПОХНВ.Р.00.00.00 ПЗ	Лист
<i>Зм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>		66