

## ВСТУП

У ряді виробництв хімічної, нафтової і інших галузей промисловості в результаті різних технологічних процесів отримують суміші рідин, які необхідно розділити на складові частини.

Для розділення сумішей рідин і зріджених газових сумішей в промисловості застосовують способи простої перегонки (дистиляції), перегонки під вакуумом і з водяною парою, молекулярної перегонки і ректифікації. Ректифікацію широко використовують в промисловості для повного розділення сумішей летких рідин, частково або цілком розчинних одна в іншій.

Суть процесу ректифікації зводиться до виділення з суміші двох або в загальному випадку декількох рідин з різними температурами кипіння однієї або декількох рідин в більш менш чистому вигляді. Це досягається нагріванням і випаровуванням такої суміші з подальшим багатократним тепло- і масообміном між рідкою і паровою фазами; в результаті частина легколетучого компоненту переходить з рідкої фази в парову, а частина менш леткого компонента—з парової фази в рідку.

Процес ректифікації може протікати при атмосферному тиску, а також при тиску вище і нижче атмосферного. Під вакуумом ректифікацію проводять, коли розділенню підлягають висококиплячі рідкі суміші. Підвищений тиск застосовується для розділення сумішей, що знаходяться в газоподібному стані при нижчому тиску. Ступінь розділення суміші рідин на компоненти, і чистота отримуваних дистиляту і кубового залишку залежать від того, наскільки розвинена поверхня фазового контакту, а отже, від кількості зрошуючої рідини (флегми) і конструкції колони ректифікації.

У промисловості застосовують ковпачкові, ситчасті і насадкові колони. Вони розрізняються в основному конструкцією внутрішнього устрою апарату, призначення якого — забезпечення взаємодії рідини і пари.

## 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД

### 1.1 Перегонка рідини

Способи перегонки: проста перегонка, періодична ректифікація в колонних апаратах і непереривна ректифікація.

Проста перегонка. При простій перегонці відбувається одноразовий випар рідкої суміші при кип'яченні в нижній частині колони, за традицією званої кубом. Пара, що утворюється, збагачена легколетучим компонентом, прямує в змійовиковий конденсатор, де перетворюється на рідину, звану дистилятом. Проста перегонка - процес періодичний, і дистилят, що утворюється, у зв'язку з виснаженням киплячої суміші поступово зменшує свою концентрацію. Якщо кілька разів повторити процес простої перегонки для отриманої суміші, можна отримати невелику кількість висококонцентрованого дистиляту. Проте цей дуже простий у виконанні процес відрізняється тривалістю і неекономічністю. Підвищити концентрацію дистиляту при простій перегонці можна, застосовуючи дефлегмацію. Так називають процес часткового конденсації пари, що виходить з куба, в проміжному конденсаторі, званому дефлегматором. У дефлегматорі конденсується переважно пара висококиплячого компонента, а конденсат, що утворюється, - флегма - з низьким вмістом легколетучого компонента повертається для подальшого розподілу в куб. Процес простої перегонки контролюють по температурі кипіння суміші в кубі. Коли ця температура досягає величини, відповідної максимально допустимому залишковому вмісту легколетучого компонента в кубовому залишку, процес припиняють.

Ректифікація. Високої мірі розподілу рідкої суміші на компоненти можна добитися при багатократній перегонці - ректифікації.

Ректифікація один із способів розподілу рідких сумішей, заснований на різному розподілі компонентів суміші між рідкою і паровою фазами. При ректифікації потоки пари і рідини, переміщаючись в протилежних напрямках

(протитечією), багаторазово контактують один з одним в спеціальних апаратах (колонах ректифікації), причому частина пари (чи рідини), що виходить з апарату, повертається назад після конденсації (для пари) або випару (для рідини). Такий протитечійний рух контактуючих потоків супроводжується процесами теплообміну і масообміну, які на кожній стадії контакту протікають до стану рівноваги; при цьому висхідні потоки пари безперервно збагачуються більше леткими компонентами, а стікаюча рідина - менш леткими. При витраті тієї ж кількості тепла, що і при дистиляції, ректифікація дозволяє досягти більшого витягання і збагачення по потрібному компоненту або групі компонентів. Ректифікація широко застосовується як в промисловому, так і в препаративному і лабораторному масштабах, часто в комплексі з іншими процесами розподілу, такими, як абсорбція, екстракція і кристалізація.

Згідно законам Рауля і закону Дальтона, в умовах термодинамічної рівноваги концентрація якого-небудь і-го компонента в парі в  $K_i$  разів відрізняється від концентрації його в рідині, причому коефіцієнт розподілу

$$K_i = p_i^*/p$$

де  $p_i^*$  - пружність насиченої пари і-го компонента;  $p$  - загальний тиск.

Відношення коефіцієнта розподілу будь-яких двох компонентів  $K_i$  і  $K_j$  називається відносною летючістю і позначається  $a_{ij}$ . Чим більше відрізняється  $a_{ij}$  від одиниці, тим легше виконати розподіл цих компонентів за допомогою ректифікації. У ряді випадків вдається збільшити  $a_{ij}$  в результаті введення в суміш нового компонента (званого розділяючим агентом), який утворює з деякими компонентами системи азеотропну суміш, що розділяється. З цією ж метою вводять розчинник, киплячий при значно вищій температурі, ніж компоненти початкової суміші. Відповідні процеси ректифікації називаються азеотропними або екстрактними. Величина  $a_{ij}$  залежить від тиску: як правило, при пониженні тиску  $a_{ij}$  зростає. Ректифікація при знижених тисках - вакуумна - особливо підходить для розподілу термічно нестійких речовин.

## 1.2 Апаратурне оформлення процесів ректифікації

Процес ректифікації здійснюють в установці, що включає колону ректифікації, дефлегматор, холодильник-конденсатор, підігрівач початкової суміші, збірник дистиляту і кубового залишку. Дефлегматор, холодильник-конденсатор і підігрівач є звичайними теплообмінниками. Основним апаратом установки є ректифікаційна колона, в якій пара рідини, що переганяється, піднімається знизу, а назустріч парі зверху стікає рідина, що подається у верхню частину апарату у вигляді флегми. В більшості випадків кінцевими продуктами є дистилят (сконденсована в дефлегматорі пара легколетучого компоненту, що виходять з верхньої частини колони) і кубовий залишок (менш леткий компонент в рідкому вигляді, витікаючий з нижньої частини колони).

### Конструкції ректифікаційних колон

По конструкції колони ректифікації підрозділяються на колони з насипною насадкою, тарілчасті і роторні. Основним типом колонних апаратів великої продуктивності вважаються ректифікаційні колони з барботажними тарілками, а при необхідності найменшого перепаду тиску на один теоретичний ступінь розподілу або при роботі в корозійному середовищі - колони з насадкою.

За способом проведення ректифікацію розділяють на періодичну і безперервну.

При безперервній - суміш, що розділяється, безперервно подається в середню частину колони, дистилят відбирається з дефлегматора, а збіднений легколетучим компонентом залишок відводиться з куба колони, флегма поступає на зрошування у верхню частину колони.

При періодичній ректифікації в нижню частину (куб) колони, забезпечену нагрівальним пристроєм, завантажують початкову суміш; пара, що утворюється, піднімається верх і конденсується в дефлегматорі (холодильнику), частина конденсату (флегми) повертається на зрошування у верхню частину колони, а рідина, що залишилася, відбирається.

Тарілки класифікують по числу потоків, типам і конструкції контактних елементів, характеру взаємодії фаз в зоні контакту, організації переливання рідини. По числу потоків тарілки виконують одно-, двох- і багатопотоковими і тарілки з каскадним розташуванням полотна.

За типом контактних елементів тарілки розділяються на тарілки ковпачкові, з S-подібними елементами, клапанні, ситчасті, решітчасті, лускаті, язичкові та ін.

Ковпачкові тарілки складні і металоємні в порівнянні з тарілками інших видів. Деякі їх показники поступаються сучаснішим типам тарілок, але вони добре освоєні. Газ барботує через шар рідини, розпилюючись на дрібні бульбашки, які утворюють шар піни з великою питомою поверхнею над рідиною, що знаходиться на тарілці. Кожна тарілка має множину круглих або прямокутних отворів, в які вварені патрубки визначеної висоти. Патрубки накривають ковпачками, що мають круглий або шестигранний переріз. Між верхнім зрізом патрубка і ковпачком є проміжок для проходу пари або газів, що поступають з-під тарілки. Нижня частина ковпачків при роботі колони знаходиться в рідині. Нижня кромка ковпачка має зубчики і прорізи.

Рівень рідини на тарілці підтримується спеціальними зливними перегородками, нижня частина яких доходить до тарілки, що пролягає нижче. Завдяки цьому утворюється гідравлічний затвор, і гази (пара) проходять тільки через патрубки під ковпачками і барботують через шар рідини, а не йдуть через зливні труби або сегменти.

Кожна тарілка має бути строго горизонтальною; положення ковпачків має бути відрегульоване так, щоб гази або пара зустрічали на своєму шляху шар рідини однакової висоти. Якщо в якій-небудь частині тарілки висота шару рідини виявиться меншою, то уся пара, або переважаюча частина її, проходитиме в цій частині тарілки. Тут із-за підвищеної швидкості пари ковпачки працюватимуть погано, рідина відтіснятиметься парою, контакт між фазами погіршується і ефективність процесу нижується.

Ситчаста тарілка являє собою плоский перфорований лист із зливними пристроями з круглими або щілиновидними отворами діаметром (шириною) 3-4мм.

Різновидом ситчастих тарілок є решітчасті провальні тарілки, в яких відсутні патрубкі переливань і рідина стікає в отвори в решітках назустріч парі.

У решітчастих провальних тарілках відсутні зливні перегородки. Рідина і газу (пара) протитечією проходять через одні і ті ж отвори (щілини шириною 3-4 мм), тому рівень на усій площі однаковий. Рекомендуєма висота шару рідини на тарілці 30 мм.

Пропускна спроможність решітчастих тарілок вища, ніж ковпачкових. При малих швидкостях газового (парового) потоку ефективність контакту між фазами сильно знижується.

Різновид решітчастих тарілок - трубчасті або трубчато-решітчасті тарілки, складені з труб так, що між ними залишаються щілини, через які рухаються протитечією газу і рідина.

Клапанні тарілки є цілісними дисками або зібраними з декількох секцій, в яких є довгасті щілини або круглі отвори. Щілини прикриваються пластинчастими клапанами, а отвори - круглими. На відміну від тарілок, що працюють в статичному режимі, т. є. при незмінній відстані між конструктивними елементами, клапанні тарілки працюють в динамічному режимі.

Тарілки S - подібних елементів призначені для створення кращого контакту між парою і рідиною і тому повинні мати розвинену поверхню контакту.

На тарілках цього типу жолоба і ковпачки утворюються при зборці S - подібних елементів з однаковим поперечним перерізом. Зборку проводять так, щоб ковпачкова частина елемента покривала жолобчасту частину сусіднього, утворюючи замок для гідравлічного затвора при роботі тарілки. Ковпачкова

частина елемента по кінцях закрита заглушками, які запобігають проскакуванню пари і рідини через торці.

Колони з насадкою набули широкого поширення в хімічній промисловості завдяки простоті їх пристрою, дешевизні виготовлення і малому гідравлічному опору при плівковому режимі роботи. У масообмінних апаратах з насадкою рідина тонкою плівкою покриває насадку і стікає по ній, при цьому поверхня контакту з газоподібною фазою визначається поверхнею насадки, властивостями рідини і гідродинамічним режимом.

Недоліком роботи колони з насадкою є нерівномірність розподілу пари і рідини по поперечному перерізу, що призводить до неоднакової ефективності різних її частин і низької ефективності роботи усієї колони в цілому. Значне збільшення ефективності апарату досягається застосуванням насадки, частково зануреної в рідину, газ при цьому у вигляді бульбашок барботується через шар рідини.

Насадки завантажують в апарати навалом на опорні решітки (нерегулярні насадки), укладають в певному порядку або монтують в жорстку структуру (регулярні насадки). Виготовляють насадки з дерева, металу, скла, кераміки, пластмас. Елементи нерегулярних насадок виконують у вигляді кілець, спіралей, роликів, куль, сивів і т. д. Найбільш поширені кільця Рашига, розміри яких зазвичай складають 50мм. Для підвищення змочуваності насадки і пропускної спроможності апарату стінки кілець іноді забезпечують подовжніми або поперечними канавками або прорізами.

### 1.3 Конструкції теплообмінного обладнання

Апарати, призначені для проведення теплообмінних процесів, називають теплообмінними. Їх застосовують для робочих середовищ із різним агрегатним станом у широкому діапазоні тисків, температур та фізико-хімічних властивостей.

Теплообмінні апарати класифікуються за такими основними ознаками:

– за конструкцією – апарати з поверхнею теплообміну, виготовлюваною з труб (кожухотрубчасті, “труба в трубі”, зрошувальні, повітряного охолодження, занурювальні змішувальні); апарати, поверхня теплообміну яких виконується з листового прокату (пластинчасті, спіральні) та апарати, що виготовляються з неметалевих матеріалів;

– за призначенням – теплообмінники, холодильники, конденсатори та випарники;

– за взаємним напрямом робочих середовищ – прямотечийні, протитечійні та змішаного току.

Кожухотрубчасті теплообмінні апарати класифікуються наступним чином:

– за призначенням – теплообмінники (Т), холодильники (Х), конденсатори (К) та випарники (И);

– за конструкцією – апарати з нерухомими трубними решітками (тип Н), температурним компенсатором на кожусі (тип К), з розширником на кожусі (з нерухомими трубними решітками і температурним компенсатором на кожусі), з плаваючою головкою (тип П), U-подібними трубами (тип У) та для підвищених тисків і температур (тип ПК);

– за розташуванням у просторі – вертикальні (В) і горизонтальні (Г);

– за числом ходів у трубному просторі – одноходові та багатходові;

– за компонованням – одинарні та здвоєні;

– за матеріальним виконанням – основні вузли і деталі з вуглецевої, низьколегованої, корозійностійкої сталі, латуні та титану.

До сучасних теплообмінних апаратів пред'являються такі основні вимоги:

– конструкція апарату має бути технологічною, надійною протягом передбаченого технічною документацією терміну служби, забезпечувати безпеку при виготовленні, монтажі і експлуатації, передбачати можливість огляду (у тому числі внутрішньої поверхні), очищення, промивання, продування і ремонту, а також забезпечувати можливість термообробки, передбаченої кресленням;



– застосування конкретного типорозміру апарата повинне забезпечувати передачу потрібної кількості тепла від одного середовища до іншого з отриманням необхідних кінцевих температур кожного робочого середовища при заданому рівні гідравлічних опорів.

Кожухотрубчасті теплообмінні апарати з нерухомими трубними решітками є найпростішими за конструкцією, достатньо зручними при експлуатації та ремонті (можлива механічна очистка внутрішньої поверхні та заміна пошкоджених труб). Проте їх застосування обмежується порівняно невеликою різницею температур кожуха та теплообмінних труб (до 30-60 °С), а також неможливістю механічної очистки зовнішньої поверхні труб.

Кожухотрубчасті теплообмінні апарати з температурним (лінзовим) компенсатором на кожусі застосовуються при більш високих різницях температур, але при цьому знижується умовний тиск у міжтрубному просторі та декілька ускладнюється конструкція апарата.

Кожухотрубчасті теплообмінні апарати з розширником на кожусі є модифікацією апаратів з нерухомими трубними решітками та температурним компенсатором на кожусі.

Зберігаючи всі переваги апаратів з нерухомими трубними решітками, вони разом з тим забезпечують підвищення теплової ефективності порівняно з ними за рахунок:

– збільшення поверхні теплообміну завдяки більш повному заповненню міжтрубного простору трубами внаслідок введення розширників в районі штуцерів та застосування труб із завуженими кінцями в рядах біля подовжніх перегородок у розподільній камері;

– збільшення коефіцієнта теплопередачі завдяки спрямуванню спеціальними кільцевими відбійниками середовища міжтрубного простору на трубну решітку. В цьому випадку виключаються застійні зони, і в теплообміні бере участь вся поверхня.

Кожухотрубчасті теплообмінні апарати з плаваючою головкою (тип П) застосовуються при практично необмеженій різниці температур труб і кожуха а також в тому випадку, якщо необхідна чистка зовнішньої (при розміщенні теплообмінних труб по вершинам квадратів) та внутрішньої поверхонь труб. В цих апаратах можлива також заміна пошкоджених труб. Разом з тим апарати типу П відрізняються більш складною конструкцією від апаратів типів Н і К.

Кожухотрубчасті теплообмінні апарати з U-подібними трубами застосовуються при більшій різниці температур труб і кожуха ніж апарати з температурним компенсатором на кожусі та при відсутності необхідності механічної очистки зовнішньої і внутрішньої поверхонь труб. В цих апаратах практично неможлива заміна пошкоджених труб. Разом з тим апарати типу ТУ відрізняються більш простою конструкцією порівняно з апаратами типу ТП.

## 2 ОПИС ТЕХНОЛОГІЧНОЇ СХЕМИ ТА КОНСТРУКЦІЇ КОЛОНИ І ПІДГРІВАЧА

### 2.1 Технологічна схема

Початкову суміш з ємкості Є1 відцентровим насосом Н2 подають в підігрівач П, де вона підігрівается до температури кипіння. Нагріта суміш поступає на розділення в ректифікаційну колону КР на розподільну тарілку, де склад рідини дорівнює складу початкової суміші  $x_F$ . Стікаючи вниз по колоні, рідина взаємодіє з паром, що піднімається вгору, яка утворюється при кипінні кубової рідини в кип'ятильнику К. Начальний склад пари приблизно дорівнює складу кубового залишку  $x_W$ , тобто збіднений легко летким компонентом.

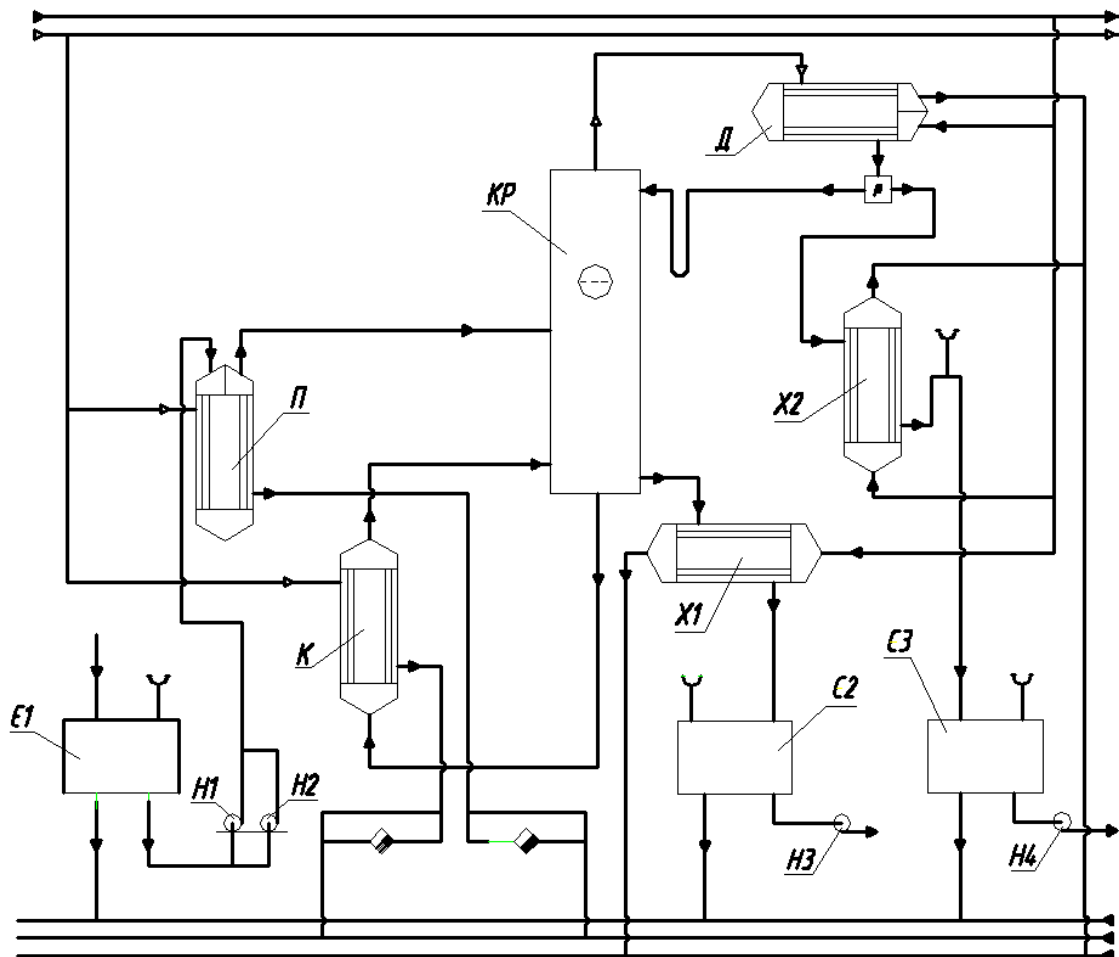


Рисунок 2.1 - Схема безперервно діючої ректифікаційної установки

Для повнішого збагачення верхню частину колони зрошують відповідно до заданого флегмового числа рідиною (флегмою) складу  $x_p$ , що отримується в

дефлегматоре Д шляхом конденсації пари, що виходить з колони. Частина конденсату виводиться з дефлегматора у вигляді готового продукту розділення – дистилляту, який охолоджується в холодильнику Х2 і прямує в ємність Є3.

З кубової частини колони безперервно виводиться кубова рідина – продукт збагачений труднолетучим компонентом, який охолоджується в холодильнику Х1 і прямує в ємність Є2.

Таким чином, в ректифікаційній колоні відбувається безперервний нерівноважний процес розділення початкової бінарної суміші на дистиллят і кубовий залишок.

## 2.2 Опис конструкції колони з ситчастими тарілками

По конструкції колони ректифікаційні підрозділяються на колони з насадкою, тарілчасті і роторні.

На малюнку 2.2 зображена ректифікаційна колону з ситчастими тарілками. Вона являє собою суцільнозварний циліндричний апарат з корпусом 1 і еліптичними днищами 2. У сепараційній частині колони розташований відбійник для зменшення віднесення крапель рідини. Тарілки 3 кріпляться на опорних кільцях, приварених до корпусу, а також на поперечних і подовжніх балках. Тарілки розбірні і доступні для огляду, монтажу і демонтажу. Через кожні шість тарілок на корпусі розміщені люки 5 діаметром 500 мм, через які відбувається збирання і розбирання тарілок, а також огляд внутрішньої поверхні апарату, його чищення і ремонт. Кришки люків оснащені поворотними прибудовами 6. Колону встановлена на циліндричну опору 4 з опорним кільцем для кріплення апарату на фундаменті. На корпусі і днищах є необхідні штуцери для приєднання трубопроводів входу і виходу потоків, а також для контрольно-вимірювальних приладів (манометрів, термометрів, вимірників рівня та ін.), для запобіжних клапанів та ін. Також на колоні розташовані пристрої для стропування цапфи 7, пристосування для вивіряння 8.

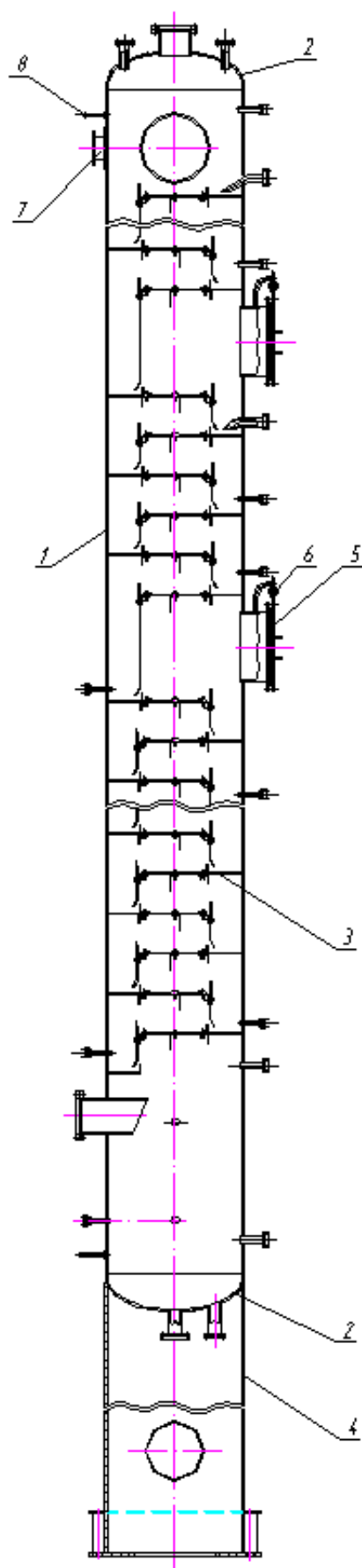


Рисунок 2.2 - Суцільнозварний колонний апарат з ситчастими тарілками

Процес ректифікації здійснюється в результаті контакту потоків пари і рідини. При цьому неодмінною умовою є переміщення потоків пари і рідини назустріч один одному по висоті ректифікаційної колони. Рушійною силою тепло- і масообміну між парою і рідиною в апараті являється різниця температур по висоті апарату.

В працюючій колоні ректифікації через кожен тарілку проходять чотири потоки: 1) рідина - флегма, що стікає з вищерозміщеної тарілки; 2) пара, що поступає з тарілки, що пролягає нижче; 3) рідина - флегма, що йде на тарілку, що пролягає нижче; 4) пара, що піднімається на вищерозміщену тарілку.

Пара і рідина, що поступають на тарілку, не знаходяться в стані рівноваги, проте, вступаючи в зіткнення, прагнуть до цього стану Рідкий потік з вищерозміщеної тарілки поступає в зону вищої температури, і тому з нього випаровується деяка кількість низькокиплячого компонента, внаслідок чого концентрація останнього в рідині зменшується.

З іншого боку, паровий потік, що поступає з тарілки, що пролягає нижче, потрапляє в зону нижчої температури і частина висококиплячого продукту з цього потоку конденсується, переходячи в рідину. Концентрація висококиплячого компонента в парі таким чином знижується, а низькокиплячого - підвищується. Фракційний склад пари і рідини по висоті колони безперервно змінюється.

Призначення тарілок – збільшення міжфазної поверхні і поліпшення контакту між рідиною і парою. Тарілки забезпечуються пристроєм для переливання рідини. У тарілчастих колонах кінетична енергія пари використовується для подолання гідравлічного опору контактних пристроїв і для створення динамічної дисперсної системи пара - рідина з великою міжфазною поверхнею.

Масо- і теплообмін між парою і рідиною в основному проходять на деякій відстані від дна тарілки в шарі піни і бризок. Тиск і швидкість пари, що проходить через отвори тарілки, мають бути достатніми для подолання тиску

шару рідини на тарілці і створення опору її протіканню через отвори. Ситчасті тарілки необхідно встановлювати строго горизонтально для забезпечення проходження пари через усі отвори тарілки, а також щоб уникнути стікання рідини через них.

### 2.3 Опис конструкції підігрівача

Теплообмінник – це апарат, в якому здійснюється теплообмін між двома теплоносіями, що мають різні температури. За принципом дії теплообмінники підрозділяються на рекуператори і регенератори. У рекуператорах рухомі теплоносії розділені стінкою. До цього типу відносяться більшість теплообмінників різних конструкцій. У регенеративних теплообмінниках гарячий і холодний теплоносії контактують з однією і тією ж поверхнею по черзі. Теплота накопичується в стінці при контакті з гарячим теплоносієм і віддається при контакті з холодним. Підігрівач – двоходовий кожухотрубчастий теплообмінний апарат з температурним компенсатором на кожусі вертикальний (рис. 2.3) складається з трубного пучка 1, розподільної камери 2 і кришки 3, які з'єднуються між собою за допомогою фланців. Через штуцер А в розподільній камері в трубний простір підводиться вихідна суміш, проходить по трубах, опускаючись вниз, підігрівається, повертається догори і виводиться через штуцер Б. В міжтрубний простір протитоком подається пара, якою підігрівається вихідна суміш.

Підігрівач обладнаний лінзовим компенсатором, призначеним для зниження температурних напружин, яка виникає в трубах і кожусі в робочих умовах. Підігрівач встановлюється на опорних лапах.

Теплообмінні труби закріплені в трубні решітки, які приварені до корпусу. Труби в решітках кріпляться розвальцьовуванням або зваркою з розвальцьовуванням залежно від матеріалу труб і тиску в апараті. Кришки приєднуються до трубних решіток на болтах або шпильках. У багатогодовому

теплообміннику в корпусі і кришках встановлені перегородки для підвищення швидкості теплоносіїв.

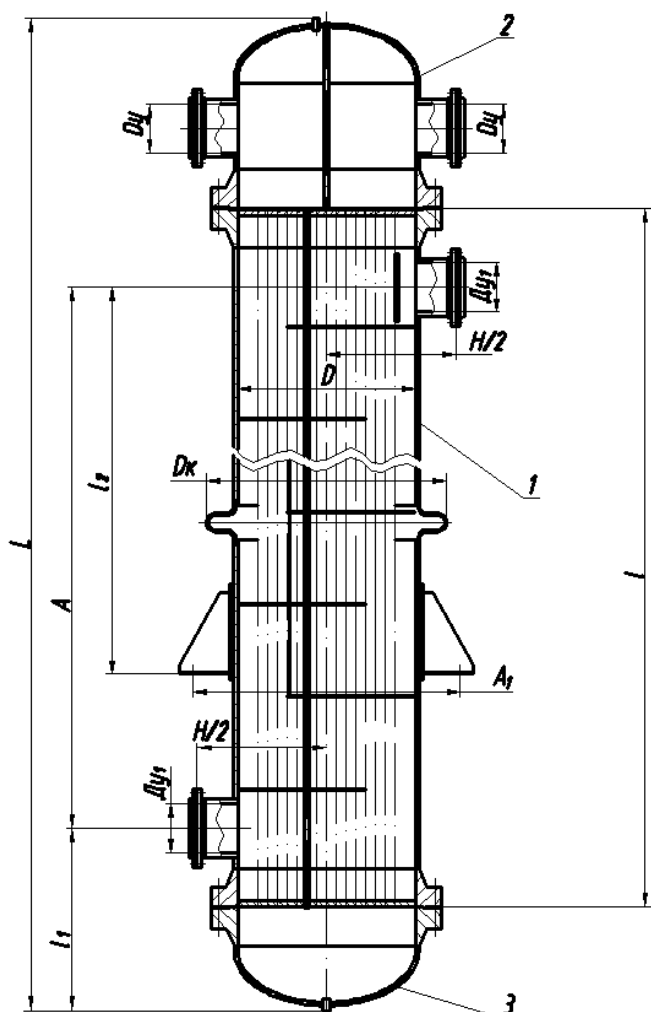


Рисунок 2.3 – Кожухотрубчастий теплообмінний апарат з температурним компенсатором на кожусі вертикальний двоходовий по трубах



### 3 ВИБІР ОСНОВНИХ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Специфічні умови експлуатації хімічного обладнання, що характеризуються широким діапазоном тиску і температур при агресивній дії середовища, визначають наступні вимоги до конструкційних матеріалів:

- висока хімічна і корозійна стійкість матеріалів в агресивному середовищі при робочих температурах;
- висока механічна міцність при заданому робочому тиску, температурі і додаткових навантаженнях, що виникають при гідравлічному випробуванні і експлуатації апаратів;
- хороше зварювання матеріалів із забезпеченням високих механічних властивостей зварних з'єднань;
- низька вартість і недефіцитність матеріалів.

Вибір матеріалів визначається робочим тиском, температурою стінки апарату, хімічним складом і характером середовища. Необхідно також враховувати технологічні властивості матеріалу.

Хімічні середовища в тій чи іншій мірі завжди викликають корозію матеріалу апарату, тому для виготовлення їх застосовуються різні метали і сплави. Найбільше застосування знаходять сталі. Завдяки здатності змінювати свої властивості залежно від складу, можливості термічної і механічної обробки сталі з низьким вмістом вуглецю добре штампуються, але погано обробляються різанням. Додатки інших металів - легуючих елементів - покращують якість сталей і додають їм особливі властивості (наприклад, хром покращує механічні властивості, зносостійкість і корозійну стійкість; нікель підвищує міцність, пластичність; кремній збільшує жаростійкість).

При конструюванні необхідно враховувати економічну доцільність застосування вибраного матеріалу, тобто його витрату і вартість відповідно до вимог, що пред'являються до апаратів.

У підігрівачі, що проектується, по міжтрубному простору рухається насичена пара, тому згідно з [16] для виготовлення обичайки, трубних решіток, фланців та перегородок застосовуємо сталь 12X18H10T за ГОСТ 5632, для теплообмінних труб та патрубків - сталь 12X18H10T за ГОСТ 9941.

По трубному простору підігрівача рухається вихідна суміш. Тому згідно з [16] для виготовлення розподільної камери та кришки застосовуємо сталь Ст3сп за ГОСТ 380. Матеріал труб для виготовлення патрубків розподільної камери та кришки - сталь 10 за ГОСТ 8732.

Матеріал кріпильних виробів (болтів) по рекомендаціях [22] для фланців штуцерів з вуглецевої сталі - сталь 40 ГОСТ 1050, для гайок - сталь 20 ГОСТ 1050. Матеріал болтів та гайок для фланців штуцерів з нержавіючої сталі - сталь 20X13 ГОСТ 5632. Матеріал опори і цапф для стропування – сталь ст3сп по ГОСТ 380. Матеріал прокладок - паронит ПОН за ГОСТ 481.

## 4 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ РОЗМІРІВ КОЛОНИ ТА ПІДГРІВАЧА

## Початкові дані

Продуктивність по вихідній суміші	5,5 т/год;
Концентрація НКК (бензолу):	
у вхідній суміші	$\alpha_F = 40\%$ (іаїї .),
в дистилляті	$\alpha_D = 97,5\%$ (іаїї .),
в кубовому залишку	$\alpha_W = 2\%$ (іаїї .).
Температура:	
охладжуючої води	10 °С,
дистилляту після холодильника	21 °С,
кубового залишку після холодильника	21 °С,
вхідної суміші	17 °С.
Тиск насиченої водяної пари	4,5 кгс/см <sup>2</sup>
Коефіцієнт надлишку флегми	1,8
Колона працює під атмосферним тиском.	

## 4.1 Визначення продуктивності по дистилляту і кубовому залишку

Продуктивність колони по дистилляту визначаємо за формулою:

$$G_p = G_F \cdot \frac{\alpha_F - \alpha_W}{\alpha_D - \alpha_W} = 5500 \cdot \frac{0,4 - 0,02}{0,975 - 0,02} = 2188,5 \text{ т/год} = 0,61 \text{ т/с}$$

Продуктивність колони по кубовому залишку визначаємо з рівняння:

$$G_W = G_F - G_p$$

$$G_W = 5500 - 2188,5 = 3311,5 \text{ т/год} = 0,92 \text{ т/с}$$

Перевірка:

$$G_F \cdot \alpha_F = G_p \cdot \alpha_D + G_W \cdot \alpha_W$$

$$5500 \cdot 0,4 = 2188,5 \cdot 0,975 + 3311,5 \cdot 0,02$$

$$2200 = 2133,78 + 66,22$$

$$2200 = 2200$$

#### 4.2 Визначення мінімального і дійсного флегмового числа

Перераховуємо масові концентрації в мольні за формулою:

$$X = \frac{\frac{\alpha}{M_A}}{\frac{\alpha}{M_A} + \frac{1-\alpha}{M_A}}$$

де  $X$  – концентрація низкокип'ячого компонента А в бінарній суміші, мол. частки;

$\alpha$  – вміст низкокип'ячого компонента А в бінарній суміші, мас. частки;

$\dot{M}_A, \dot{M}_B$  – молярна маса компонента А і В (відповідно).

Молярні маси: бензол – 78 кг/кмоль.

Толуол – 92 кг/кмоль.

Тоді концентрація вхідної суміші:

$$X_F = \frac{\frac{\alpha_F}{M_A}}{\frac{\alpha_F}{M_A} + \frac{1-\alpha_F}{M_A}} = \frac{\frac{0,4}{78}}{\frac{0,4}{78} + \frac{1-0,4}{92}} = 0,44;$$

дистиляту:

$$X_P = \frac{\frac{\alpha_P}{M_A}}{\frac{\alpha_P}{M_A} + \frac{1-\alpha_P}{M_A}} = \frac{\frac{0,975}{78}}{\frac{0,975}{78} + \frac{1-0,975}{92}} = 0,979;$$

кубового залишку:

$$X_W = \frac{\frac{\alpha_W}{M_A}}{\frac{\alpha_W}{M_A} + \frac{1-\alpha_W}{M_A}} = \frac{\frac{0,02}{78}}{\frac{0,02}{78} + \frac{1-0,02}{92}} = 0,024.$$

Мінімальне флегмове число визначаємо графо-аналітичним способом. Для цього на підставі досвідчених даних, в координатах у-х будуємо криву рівноваги для суміші бензол-толуол при атмосферному тиску (рис.4.1) і криву температур кипіння і конденсації (рис.4.2)

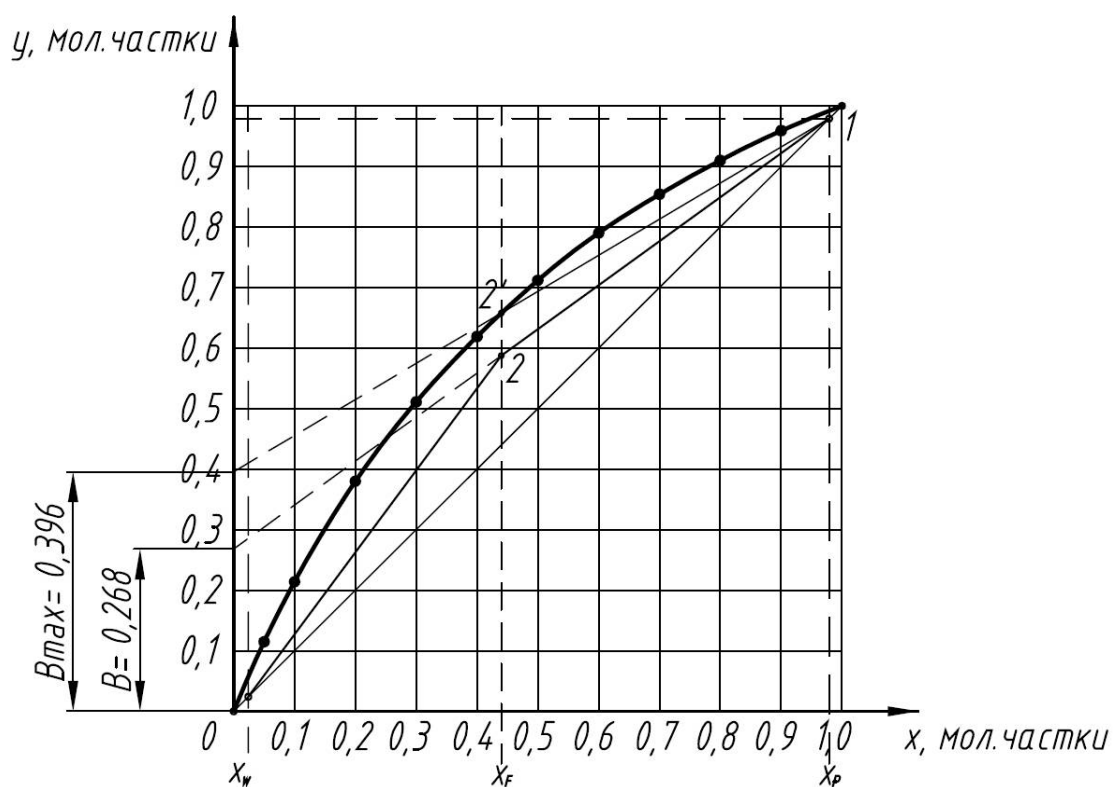


Рисунок 4.1 – До визначення мінімального флегмового числа

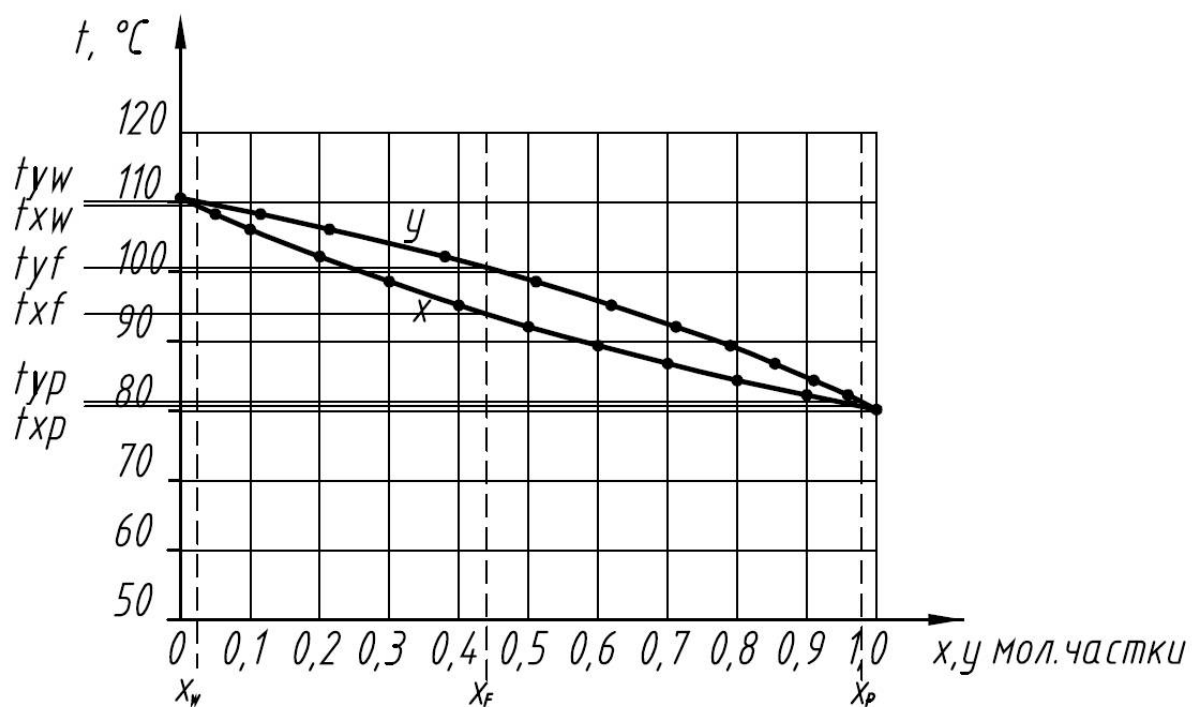


Рисунок 4.2 – Ізобара температур кипіння і конденсації

Таблиця 4.1–Рівноважні дані для суміші бензол–толуол

Вміст компонента А, мол. %		Температура кипіння, t, °С
в рідині (x)	в парі (y)	
0	0	110,6
5	11,5	108,3
10	21,4	106,1
20	38	102,2
30	51,1	98,6
0	61,9	95,2
50	71,2	92,1
60	79	89,4
70	85,4	86,8
80	91	84,4
90	95,9	82,3
100	100	80,2

На діаграмі у-х з точки 1 ( $x_p=y_p$ ) через точку 2' ( $x_F, y_F^*$ ) проводимо пряму лінію до перетину з віссю у. Відрізок, відсікаємий на осі у, позначимо через  $B_{\max}=0,396$ . За величиною цього відрізка знаходимо мінімальне флегмове число:

$$R_{\min} = \frac{x_p}{B_{\max}} - 1 = \frac{0,979}{0,396} - 1 = 1,472$$

Дійсне флегмове число, використовуючи рівняння:

$$R = K_R \cdot R_{\min}$$

$$R = 1,8 \cdot 1,472 = 2,65$$

На діаграмі у-х наносимо лінії робочих концентрацій (робочі лінії) для оптимального флегмового числа  $R = 2,6$  (рис. 4.1): для цього на осі у відкладаємо відрізок  $B = \frac{x_p}{R+1} = \frac{0,979}{2,65+1} = 0,268$ , кінець якого з'єднуємо прямою з точкою 1 ( $x_p = y_p$ ); точку перетину цієї прямої з вертикальною лінією,

проведеної з абсциси  $x_F$ , позначимо точкою 2 ( $x_F, y_F$ ) і, нарешті, крапку 2 з'єднуємо з точкою 3 ( $x_W=y_W$ ). Лінії 1-2 і 2-3 є робочими лініями для верхньої та нижньої частин колони, відповідно.

### 4.3 Визначення середніх значень параметрів по колоні, фізико-хімічних і термодинамічних констант фаз

#### Рідка фаза

Середня мольна концентрація в нижній частині колони:

$$X_{cp}^i = \frac{X_W + X_F}{2} = \frac{0,024 + 0,44}{2} = 0,232$$

Середня мольна концентрація у верхній частині колони:

$$X_{cp}^a = \frac{X_F + X_P}{2} = \frac{0,44 + 0,979}{2} = 0,71$$

Середня мольна концентрація по колоні:

$$X_{cp} = \frac{X_{cp}^i + X_{cp}^a}{2} = \frac{0,232 + 0,71}{2} = 0,471$$

Середня масова концентрація по колоні:

$$\alpha_{cp} = \frac{x_{cp} \cdot M_A}{x_{cp} \cdot M_A + (1 - x_{cp}) \cdot M_B}$$

$$\alpha_{cp} = \frac{0,471 \cdot 78}{0,471 \cdot 78 + (1 - 0,471) \cdot 92} = 0,43$$

Середня температура в нижній частині колони:

$$t_{\delta cp}^i = \frac{t_{XW} + t_{XF}}{2} = \frac{109,5 + 93,91}{2} = 101,71 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Середня температура у верхній частині колони:

$$t_{\delta cp}^a = \frac{t_{XF} + t_{XD}}{2} = \frac{93,91 + 80,65}{2} = 87,28 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Середня температура по колоні:

$$t_{X\delta} = \frac{t_{\delta cp}^i + t_{\delta cp}^a}{2} = \frac{101,71 + 87,28}{2} = 94,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Значення  $t_{XW}$ ,  $t_{XF}$ ,  $t_{XP}$  взяті з діаграми  $t-x, y$  (рис.4.1).

Середня мольна маса:

$$M_{x \text{ cp}} = M_A \cdot X_{\text{н0}} + M_B \cdot (1 - X_{\text{н0}})$$

$$M_{x \text{ cp}} = 78 \cdot 0,471 + 92 \cdot (1 - 0,471) = 85,41 \text{ г/моль}$$

Середня щільність визначається за формулою:

$$\rho_{x \text{ cp}} = \frac{\rho_A \cdot \rho_B}{\rho_B \cdot \alpha_{\text{cp}} + \rho_A \cdot (1 - \alpha_{\text{cp}})}$$

де  $\rho_A$  і  $\rho_B$  – щільність компонентів А (бензол) і В (толуол) при температурі  $t_{x \text{ cp}}$ .

$$\rho_A = 799,05 \text{ кг/м}^3 \text{ при } t_{x \text{ cp}} = 94,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\rho_B = 793,5 \text{ кг/м}^3.$$

$$\rho_{x \text{ cp}} = \frac{799,05 \cdot 793,5}{793,5 \cdot 0,43 + 799,05 \cdot (1 - 0,43)} = 795,88 \text{ г/л}^3$$

Середню в'язкість розраховуємо за формулою:

$$\lg \mu_{x \text{ cp}} = X_{\text{н0}} \cdot \lg \mu_A + (1 - X_{\text{н0}}) \cdot \lg \mu_B$$

де  $\mu_A$  і  $\mu_B$  – динамічні коефіцієнти в'язкості компонентів А (бензол) і В (толуол), Па·с.

$$\mu_A = 0,276 \text{ мПа·с при } t_{\text{cp}} = 94,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\mu_B = 0,284 \text{ мПа·с.}$$

$$\lg \mu_{x \text{ cp}} = 0,471 \cdot \lg 0,276 + (1 - 0,471) \cdot \lg 0,284 = -0,553$$

$$\mu_{x \text{ cp}} = 0,28 \text{ Па·с} \cdot \tilde{n} = 0,28 \cdot 10^{-3} \text{ Па·с} \cdot \tilde{n}$$

Середній поверхневий натяг визначаємо за рівнянням:

$$\sigma_{x \text{ cp}} = \sigma_A \cdot X_{\text{н0}} + \sigma_B (1 - X_{\text{н0}})$$

де  $\sigma_A$  і  $\sigma_B$  – поверхневі натяги компонентів А (бензол) і В (толуол), Н/м.

$$\sigma_A = 19,49 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м при } t_{x \text{ cp}} = 94,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\sigma_B = 19,98 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м.}$$

$$\sigma_{x \text{ cp}} = 19,49 \cdot 10^{-3} \cdot 0,471 + 19,98 \cdot 10^{-3} (1 - 0,471) = 19,75 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$$

Коефіцієнт дифузії при середній температурі визначаємо за формулою:

$$D_{x(t)} = D_{x(20)} \cdot [1 + b \cdot (t - 20)]$$



де  $D_{x(20)}$  – коефіцієнт дифузії при  $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\text{м}^2/\text{с}$ ;

$$b = \frac{0,2\sqrt{\mu}}{\sqrt[3]{\rho}} \quad \text{тут } \mu \text{ [МПа}\cdot\text{с]} \text{ и } \rho \text{ [кг/м}^3\text{]} - \text{в'язкість і щільність розчинника (толуол) при } t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}; t = t_{x \text{ ср.}}$$

Коефіцієнт дифузії при  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  розраховуємо по емпіричному рівнянню:

$$D_{x(20)} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{A \cdot B \cdot \sqrt{\mu} (V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}$$

де  $V_A$  і  $V_B$  – мольні об'єми компонентів А і В,  $\text{см}^3/\text{моль}$ ;

А, В – коефіцієнти, що залежать від властивостей компонентів,  $A=1$ ;  $B=1$

$$b = \frac{0,2\sqrt{\mu}}{\sqrt[3]{\rho}} = \frac{0,2\sqrt{0,586}}{\sqrt[3]{866}} = 0,016$$

Мольні об'єми компонентів:

$$V_A = 14,8 \cdot 6 + 3,7 \cdot 6 = 111 \text{ см}^3/\text{моль}$$

$$V_{\hat{A}} = 14,8 \cdot 7 + 3,7 \cdot 8 = 133,2 \text{ см}^3/\text{моль}$$

$$D_{x(20)} = \frac{1 \cdot 10^{-6}}{1 \cdot 1 \cdot \sqrt{0,586} (111^{1/3} + 133,2^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{78} + \frac{1}{92}} = 2,03 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$$

$$D_{x(t)} = 2,03 \cdot 10^{-8} [1 + 0,016 \cdot (94,5 - 20)] = 4,45 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2/\text{с}$$

### Парова фаза

Середня мольна концентрація в нижній частині колони:

$$\hat{O}_{\text{ср}}^i = \frac{\hat{O}_W + \hat{O}_F}{2} = \frac{0,024 + 0,588}{2} = 0,306.$$

Середня мольна концентрація у верхній частині колони:

$$\hat{O}_{\text{ср}}^{\hat{a}} = \frac{\hat{O}_F + \hat{O}_P}{2} = \frac{0,588 + 0,979}{2} = 0,784.$$

Середня мольна концентрація по колоні:

$$\hat{O}_{\text{ср}} = \frac{\hat{O}_{\text{ср}}^i + \hat{O}_{\text{ср}}^{\hat{a}}}{2} = \frac{0,306 + 0,784}{2} = 0,545.$$

Середня температура в нижній частині колони:

$$t_{\hat{O}_{\text{ср}}}^i = 104 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Середня температура у верхній частині колони:

$$t_{\text{ó cp}}^{\text{â}} = 89,62 \text{ }^{\circ}\text{Ñ}$$

Температури  $t_{y \text{ cp}}^{\text{H}}$ ,  $t_{y \text{ cp}}^{\text{B}}$ , знайдені з діаграми  $t-x, y$  (рис. 4.1).

Середня температура по колоні:

$$t_{\text{ó ñð}} = \frac{t_{\text{ó cp}}^{\text{i}} + t_{\text{ó cp}}^{\text{â}}}{2} = \frac{104 + 89,62}{2} = 96,81 \text{ }^{\circ}\text{Ñ}$$

Середня мольна маса:

$$M_{y \text{ ñð}} = M_{\text{A}} \cdot y_{\text{ ñð}} + M_{\text{B}} \cdot (1 - y_{\text{ ñð}})$$

$$M_{y \text{ ñð}} = 78 \cdot 0,545 + 92 \cdot (1 - 0,545) = 84,37 \text{ } \text{ã/} \hat{\text{e}}\text{ï}\hat{\text{e}}\text{ü}$$

Середня щільність:

$$\rho_{y \text{ cp}} = \frac{M_{y \text{ cp}}}{22,4} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T}$$

де  $T = 273 + t_{y \text{ cp}}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$P = 1 \text{ кгс/см}^2$  (тиск в колоні атмосферний).

$$\rho_{\text{ó cp}} = \frac{84,37}{22,4} \cdot \frac{1}{1,033} \cdot \frac{273}{(273 + 96,81)} = 2,69 \text{ } \hat{\text{ã}}/\hat{\text{e}}\text{ï}\hat{\text{e}}\text{ü}^3$$

Середня в'язкість:

$$\frac{\dot{I}_{\text{ó ñð}}}{\mu_{\text{ó ñð}}} = \frac{\dot{O}_{\text{ ñð}} \cdot \dot{I}_{\text{ A}}}{\mu_{\text{ó A}}} + \frac{(1 - \dot{O}_{\text{ ñð}}) \cdot \dot{I}_{\text{ A}}}{\mu_{\text{ó A}}}$$

де  $\mu_{yA}$  і  $\mu_{yB}$  – динамічний коефіцієнт в'язкості пари компонента А і В.

$$\mu_{yA} = 0,27 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с при } t_{y \text{ cp}} = 96,81 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\mu_{yB} = 0,279 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с.}$$

$$\frac{84,37}{\mu_{\text{ó ñð}}} = \frac{0,545 \cdot 78}{0,27 \cdot 10^{-5}} + \frac{(1 - 0,545) \cdot 92}{0,279 \cdot 10^{-5}}$$

$$\mu_{\text{ó cp}} = 2,74 \cdot 10^{-6} \text{ ïà} \cdot \hat{\text{ñ}}$$

Коефіцієнт дифузії для парової фази визначаємо за рівнянням:

$$D_y = \frac{4,3 \cdot 10^{-7} \cdot T^{3/2}}{P \cdot (V_A^{1/3} + V_B^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B}}$$

де  $P$  – тиск,  $\text{кгс/см}^2$  (тиск в колоні атмосферний);

$$T = 273 + t_{y \text{ cp}}, \text{ }^{\circ}\text{C.}$$

$$D_{\delta} = \frac{4,3 \cdot 10^{-7} \cdot 369,81^{3/2}}{1 \cdot (111^{1/3} + 133,2^{1/3})^2} \cdot \sqrt{\frac{1}{78} + \frac{1}{92}} = 4,79 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$$

#### 4.4 Визначення діаметра колони

Діаметр колони визначаємо за рівнянням

$$D = \sqrt{\frac{V_y}{0,785 \cdot W}}$$

Витрата, що проходить по колоні пари, може бути визначений:

$$V_{\delta} = \frac{G_{\delta}}{\rho_{\delta \text{ ср}}} = \frac{G_p \cdot (R+1)}{\rho_{\delta \text{ ср}}}$$

$$V_{\delta} = \frac{2188,5 \cdot (2,65 + 1)}{3600 \cdot 2,69} = 0,825 \text{ м}^3/\text{с}$$

Попередньо приймаємо відстань між тарілками  $h=500$  мм. Використовуємо раніше знайдені  $\rho_{\delta \text{ нд}} = 795,88 \text{ кг/м}^3$  і  $\rho_{\delta \text{ нд}} = 2,69 \text{ кг/м}^3$ . Для ситчатих тарілок за графіком знаходимо  $\tilde{N} = 0,075$ .

Швидкість пари в колоні:

$$W = 1,0 \text{ м/с}$$

Тоді діаметр колони:

$$D = \sqrt{\frac{0,825}{0,785 \cdot 1,0}} = 1,025 \text{ м}$$

Приймаємо стандартне значення діаметра колони  $D=1,2$  м і уточнюємо швидкість пари в колоні:

$$W = \frac{V_y}{0,785 \cdot D^2}$$

$$W = \frac{0,825}{0,785 \cdot 1,2^2} = 0,73 \text{ м/с}$$

#### 4.5 Визначення висоти колони

За рівнянням знаходимо коефіцієнт масовіддачі в рідкій фазі:

$$\beta_{xf} = \frac{38000 \cdot \rho_{x \text{ ср}} \cdot D_{x(t)}}{M_{x \text{ ср}} \cdot h} \cdot (Pr')^{0,62}$$

$$Pr' = \frac{\mu_{x\text{cp}}}{D_{x(t)} \cdot \rho_{x\text{cp}}} = \frac{0,28 \cdot 10^{-3}}{4,45 \cdot 10^{-8} \cdot 795,88} = 7,91$$

$$\beta_{xf} = \frac{38000 \cdot 795,88 \cdot 4,45 \cdot 10^{-8}}{85,41 \cdot 1} \cdot (7,91)^{0,62} = 0,057 \frac{\text{Вт/м}^2 \cdot \text{н} \cdot \text{м} / \text{м}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{н} \cdot \text{м} / \text{м}^2}$$

Коефіцієнт масовіддачі в паровій фазі знаходимо за рівнянням:

$$\beta_{yf} = \frac{D_y}{22,4} \cdot (0,79 \cdot Re_y + 11000)$$

$$Re_y = \frac{W \cdot h \cdot \rho_{y\text{cp}}}{\mu_{y\text{cp}}}$$

$$Re_y = \frac{0,73 \cdot 1 \cdot 2,69}{2,74 \cdot 10^{-6}} = 716679$$

$$\beta_{yf} = \frac{4,79 \cdot 10^{-6}}{22,4} \cdot (0,79 \cdot 716679 + 11000) = 0,123 \frac{\text{Вт/м}^2 \cdot \text{н} \cdot \text{м} / \text{м}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{н} \cdot \text{м} / \text{м}^2}$$

Загальний коефіцієнт масопередачі  $K_{yf}$  знаходимо з рівняння:

$$\frac{1}{K_{yf}} = \frac{1}{\beta_{yf}} + \frac{m}{\beta_{xf}},$$

де  $m = \frac{y^* - y}{x - x^*}$  – тангенс кута нахилу лінії рівноваги;

$y^*, x^*$  – рівноважні концентрації.

Так як величина  $m$  є змінною по висоті колони, знаходимо її значення для різних концентрацій, використовуючи діаграму (рис. 4.1).

В межах від  $X_w$  до  $X_p$  вибираємо ряд значень  $X$ , для кожного значення  $X$  визначаємо по діаграмі (рис. 4.1) величини  $y^*-y$ ,  $x-x^*$  як різниця між рівноважною і робочою лінією, а потім по цим значенням визначаємо величину  $m$ . Результати зводимо в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Визначення коефіцієнта масопередачі

x	0,024	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,979
$y^*-y$	0,0328	0,087	0,118	0,113	0,086	0,081	0,086	0,078	0,061	0,037	0,013
$x-x^*$	0,014	0,037	0,061	0,079	0,088	0,085	0,076	0,109	0,118	0,089	0,032
m	2,34	2,35	1,93	1,43	0,98	0,95	1,13	0,72	0,52	0,42	0,41
$K_{yf} \cdot 10^3$	20,33	20,26	23,82	30,1	39,49	40,33	35,77	48,17	57,96	64,52	65,26

Для побудови кінетичної кривої скористаємося формулою:

$$y^* - y_K = (y^* - y_H) \cdot e^{-\frac{K_{yf} \cdot f_m}{G_y}}$$

Значення різниці  $(y^* - y_H)$  це значення  $AC = (y^* - y)$  для кожного вибраного значення  $x$  в межах від  $x_w$  до  $x_p$ .

Робоча площа тарілки може бути знайдена з Додатка В, таблиця В.1.:

$$F_p = 1,010 \text{ і } ^2$$

Мольна витрата пари по колоні:

$$G_{\delta} = \frac{G_p \cdot (R + 1)}{M_{\delta \text{ ср}}}$$

$$G_{\delta} = \frac{2188,5 \cdot (2,65 + 1)}{3600 \cdot 84,37} = 0,026 \text{ моль / с}$$

Таблиця 4.3 – До побудови кінетичної кривої

x	0,024	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,979
$\frac{K_{yf} \cdot F_p}{G_y}$	0,79	0,79	0,93	1,17	1,53	1,57	1,39	1,87	2,25	2,51	2,54
$\overline{AC}$ , мм	3,28	8,7	11,76	11,31	8,56	8,03	8,6	7,8	6,1	3,74	1,3
$\overline{BC} = \frac{\overline{AC}}{e^{\frac{K_{yf} \cdot F_p}{G_y}}}$ , мм	1,49	3,96	4,65	3,52	1,86	1,68	2,15	1,21	0,65	0,31	0,1

За даними таблиці 4.3 будуємо кінетичну криву. Точки  $A_1, A_2, A_3 \dots A_{10}$  лежать на робочих лініях, точки  $C_1, C_2, C_3 \dots C_{10}$  – на рівноважній кривій. Обчислені відрізки  $V_1 C_1, V_2 C_2, V_3 C_3 \dots V_{10} C_{10}$  відкладаються від відповідних точок вниз. Кінетична крива починається на початку координат, що проходить через точки  $V_1, V_2, V_3 \dots V_{10}$  і закінчується в правому верхньому куті діаграми  $y-x$  (рис. 4.3).

Число дійсних тарілок, яке забезпечує задану чіткість поділу, визначається шляхом побудови "сходинок" між робочими і кінетичною лінією. Число ступенів в межах концентрацій  $X_w \div X_p$  дорівнює числу дійсних тарілок.

В результаті побудови (рис. 4.3) отримуємо число дійсних тарілок  $n=18$ , тарілка живлення 11-я знизу.

Висоту колони визначаємо за рівнянням:

$$H = (n - 1) \cdot h + \dot{I}_{\text{нар}} + \dot{I}_{\text{єоá}}$$

$$H = (18 - 1) \cdot 0,5 + 0,8 + 2,0 = 11,3 \text{ м}$$

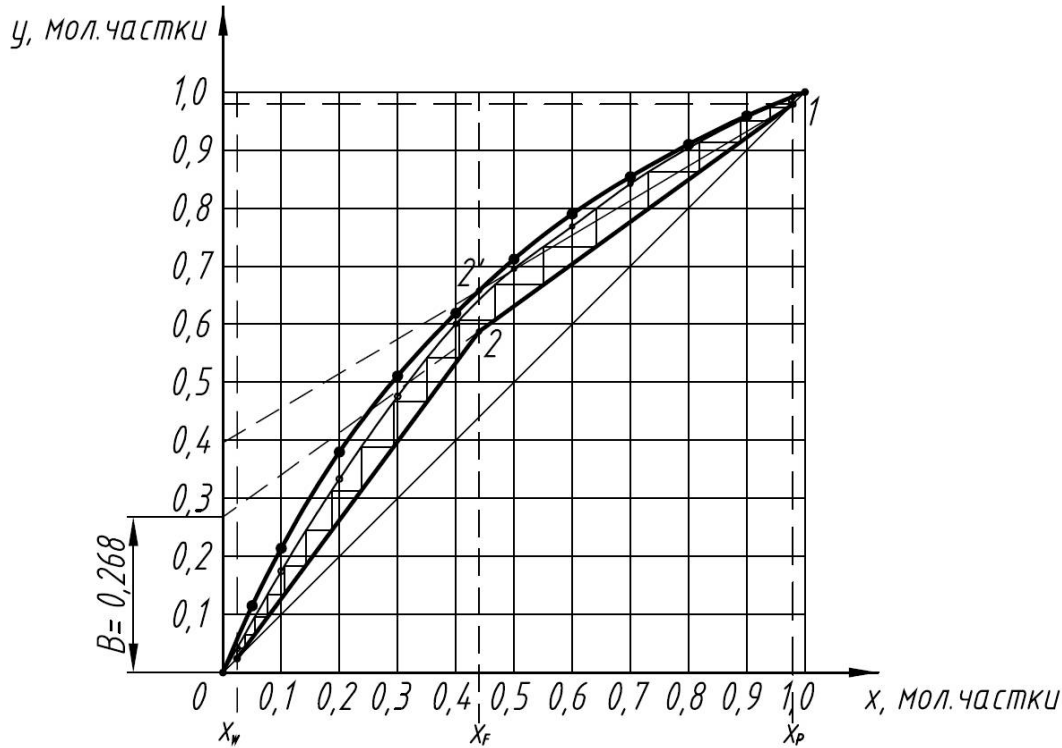


Рисунок 4.3 – Побудова кінетичної кривої і визначення числа дійсних тарілок

#### 4.6 Визначення гідравлічного опору колони

Гідравлічний опір ректифікаційної колони визначаємо за рівнянням:

$$\Delta P_k = n \cdot \Delta P_0$$

Для ситчастої тарілки приймаємо: діаметр отворів  $d_0=5$  мм, висота переливу  $h_{\text{пер}}=30$  мм, вільний перетин тарілки  $F_0=0,08$  (8%).

Гідравлічний опір ситчатої тарілки визначимо за рівнянням:

$$\Delta P_{\text{нóх}} = \zeta \frac{W_0^2 \cdot \rho_{\text{ycp}}}{2}$$

$$\Delta P_{\text{нóх}} = 1,82 \cdot \frac{9,13^2 \cdot 2,69}{2} = 204 \text{ Па}$$

Швидкість пари в отворах:

$$W_0 = W/F_0$$

$$W_0 = 0,73/0,08 = 9,13 \text{ і /ñ}$$

$$\Delta P_\sigma = \frac{4\sigma}{1,3d_0 + 0,08d_0^2} = \frac{4 \cdot 19,75 \cdot 10^{-3}}{1,3 \cdot 0,005 + 0,08 \cdot 0,005^2} = 12,15 \text{ ĩà}$$

Для визначення статичного тиску рідини на тарілці визначаємо витрату рідкої фази в нижній частині колони за формулою:

$$L = G_p \cdot R + G_F$$

$$L = 2188,5 \cdot 2,65 + 5500 = 11299 \text{ ĩà/÷}$$

або в об'ємному вираженні 14,2 м<sup>3</sup>/год. (розділивши на  $\rho_{x_{\text{нò}}} = 795,88 \text{ ĩà/і}^3$ )

Для колони  $D = 1,2$  м, довжина зливного борту  $l_{\text{сл}} = \Pi = 0,722$  м, тоді інтенсивність потоку  $\frac{L}{l_{\text{нє}}} = \frac{14,2}{0,722} = 19,7 \frac{\text{і}^3}{\text{÷} \cdot \text{і}}$ .

Так як  $\frac{L}{l_{\text{нє}}} = 19,7 > 5 \frac{\text{і}^3}{\text{÷} \cdot \text{і}}$ , то  $m = 10000$

Тоді за рівнянням:

$$\Delta P_{\text{нò}} = 1,3 \left[ \hat{E} \cdot h_{\text{нò}} + \sqrt[3]{\hat{E} \left( \frac{L}{m \cdot l_{\text{нє}}} \right)^2} \right] \cdot \rho_{x_{\text{сп}}} \cdot g$$

$$\Delta P_{\text{нò}} = 1,3 \left[ 0,5 \cdot 0,03 + \sqrt[3]{0,5 \left( \frac{14,2}{10000 \cdot 0,722} \right)^2} \right] \cdot 795,88 \cdot 9,81 = 279 \text{ ĩà} .$$

Гідравлічний опір однієї тарілки:

$$\Delta \mathcal{D}_0 = \Delta P_{\text{нò}} + \Delta \mathcal{D}_\sigma + \Delta \mathcal{D}_{\text{нò}}$$

$$\Delta \mathcal{D}_0 = 204 + 12,15 + 279 = 495,15 \text{ ĩà}$$

Гідравлічний опір колони:

$$\Delta \mathcal{D}_k = n \cdot \Delta P_0$$

$$\Delta \mathcal{D}_k = 18 \cdot 495,15 = 8912,7 \text{ ĩà}$$

Раніше прийняту відстань між тарілками  $h=0,5$  м перевіряємо за співвідношенням:

$$h > 1,8 \cdot \Delta P_0 / \rho_{x_{\text{сп}}} \cdot g ,$$

$$h = 0,5 \text{ і} > 1,8 \cdot \frac{495,15}{795,88 \cdot 9,81} = 0,11 \text{ і} - \text{ умова виконується.}$$

#### 4.7 Визначення діаметра штуцерів

Діаметр штуцера визначаємо за рівнянням.

Штуцер подачі флегми:

$$d = \sqrt{\frac{V_{\delta}}{0,785 \cdot W_{\delta}}},$$

$$V_{\delta} = \frac{G_{\delta}}{\rho_A} = \frac{G_{\delta} \cdot R}{\rho_A}$$

$$V_{\delta} = \frac{2188,5 \cdot 2,65}{3600 \cdot 814,3} = 1,98 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

Так як швидкість потоку приймаємо орієнтовно, то можна прийняти щільність флегми, як щільність бензола:  $\rho_A = 814,3 \text{ кг/м}^3$  при  $t_{\text{хр}} = 80,65 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Приймаємо  $W_{\phi} = 0,5 \text{ м/с}$ , тоді

$$d = \sqrt{\frac{1,98 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,5}} = 0,071 \text{ м}$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера  $\text{Ø}76 \times 4 \text{ мм}$ .

Штуцер подачі вхідної суміші:

$$d = \sqrt{\frac{V_F}{0,785 \cdot W_F}},$$

$$V_F = \frac{G_F}{\rho_F}; \quad \rho_F = \frac{\rho_A \cdot \rho_B}{\rho_B \cdot \alpha_F + (1 - \alpha_F) \cdot \rho_A}$$

при  $t_{\text{XF}} = 93,91 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$$\rho_F = \frac{799,7 \cdot 794,09}{794,09 \cdot 0,4 + (1 - 0,4) \cdot 799,7} = 796,3 \text{ кг/м}^3$$

$$V_F = \frac{5500}{3600 \cdot 796,3} = 1,92 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

Приймаємо  $W_F = 0,8 \text{ м/с}$ , тоді:

$$d = \sqrt{\frac{1,92 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,8}} = 0,055 \text{ м}$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера  $\text{Ø}57 \times 3 \text{ мм}$ .



Штуцер виходу кубового залишку:

$$d = \sqrt{\frac{V_w}{0,785 \cdot W_w}}$$

$$V_w = \frac{G_w}{\rho_w} = \frac{3311,5}{3600 \cdot 777,55} = 1,18 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

$\rho_A = 777,55 \text{ кг/м}^3$  – щільність толуолу при  $t_{xw} = 109,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Приймаємо  $W_w = 0,3 \text{ м/с}$ , тоді

$$d = \sqrt{\frac{1,18 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,3}} = 0,071 \text{ м}$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера  $\text{Ø}89 \times 4 \text{ мм}$ .

Штуцер виходу кубової рідини (подається на кип'ятильник):

$$d = \sqrt{\frac{V_{\text{е.е}}}{0,785 \cdot W_{\text{е.е}}}},$$

$$V_{\text{е.е}} = \frac{G_F + G_{\text{О}} - G_w}{\rho_A}$$

$$V_{\text{е.е}} = \frac{5500 + 2188,5 \cdot 2,65 - 3311,5}{3600 \cdot 777,55} = 2,85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$$

Приймаємо  $W_{\text{к.ж}} = 0,3 \text{ м/с}$ , тоді:

$$d = \sqrt{\frac{2,85 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 0,3}} = 0,11 \text{ м}$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера  $\text{Ø}133 \times 4 \text{ мм}$ .

Штуцер виходу пари з колони:

$$d = \sqrt{\frac{V_o}{0,785 \cdot W_o}}$$

$V_y = 0,825 \text{ м}^3/\text{с}$  (див. розділ 3.4).

Приймаємо  $W_y = 15 \text{ м/с}$ , тоді

$$d = \sqrt{\frac{0,825}{0,785 \cdot 15}} = 0,265 \text{ м}$$

Стандартний розмір труби для виготовлення штуцера  $\text{Ø}273 \times 7 \text{ мм}$ , [6, с. 17].

## 4.8 Теплові розрахунки

### 4.8.1 Підігрівач вхідної суміші

Рівняння теплового балансу для підігрівача:

$$Q = 1,05 \cdot G_F \cdot C_F' \cdot (t_{XF} - t_{i\ddot{a}\ddot{z}}) = G_{\ddot{a}\ddot{I}} \cdot r,$$

де  $t_{XF}$  – температура кипіння вхідної суміші;

$t_{i\ddot{a}\ddot{z}}$  – початкова температура (задана).

Теплові втрати прийняті в розмірі 5% від корисно витраченої теплоти.

Питома теплоємність вхідної суміші:

$$C_F' = \ddot{\alpha}_F \cdot C_A + (1 - \ddot{\alpha}_F) \cdot C_B,$$

де  $\tilde{N}_A, \tilde{N}_B$  – питомі теплоємності бензолу і толуолу при середній температурі.

$$t_{XF}^{cp} = \frac{t_{XF} + t_{i\ddot{a}\ddot{z}}}{2}$$

$$t_{XF}^{cp} = \frac{93,91 + 17}{2} = 55,45 \text{ } ^\circ\tilde{N}$$

$$C_A = 0,455 \frac{\text{êêâë}}{\text{êã} \cdot ^\circ\tilde{N}}$$

$$C_B = 0,446 \frac{\text{êêâë}}{\text{êã} \cdot ^\circ\tilde{N}}$$

$$C_F' = 0,4 \cdot 0,455 + (1 - 0,4) \cdot 0,446 = 0,449 \frac{\text{êêâë}}{\text{êã} \cdot ^\circ\tilde{N}} = 1883,82 \frac{\text{Åæ}}{\text{êã} \cdot \hat{E}}$$

$$Q = 1,05 \cdot \frac{5500}{3600} \cdot 1883,82 \cdot (93,91 - 17) = 232419 \text{ } \hat{\Delta}$$

Витрата гріючої пари:

$$G_{\ddot{a}\ddot{I}} = \frac{Q}{r}$$

$$G_{\ddot{a}\ddot{I}} = \frac{232419}{2129 \cdot 10^3} = 0,109 \text{ } \text{êã}/\tilde{n}$$

$$r = 2129 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ при } P = 4,5 \text{ кгс/см}^2$$

Середня різниця температур

$$\begin{array}{l} 147 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \longrightarrow \quad 147 \text{ }^{\circ}\text{C} \\ 17 \text{ }^{\circ}\text{C} \quad \longrightarrow \quad 93,91 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{array}$$

Температура насиченої водяної пари при  $P=4,5 \text{ кгс/см}^2$  становить  $147 \text{ }^{\circ}\text{C}$  [1, с.550].

Більша різниця температур:

$$\Delta t_{\dot{a}} = 147 - 17 = 130 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Менша різниця температур:

$$\Delta t_i = 147 - 93,91 = 53,09 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Так як  $\frac{\Delta t_{\dot{a}}}{\Delta t_i} = \frac{130}{53,09} = 2,45 > 2$ , тоді середню різницю температур визначаємо за

рівнянням:

$$\Delta t_{\text{н\ddot{o}}} = \frac{\Delta t_{\dot{a}} - \Delta t_i}{\ln \frac{\Delta t_{\dot{a}}}{\Delta t_i}}$$

$$\Delta t_{\text{н\ddot{o}}} = \frac{130 - 53,09}{\ln \frac{130}{53,09}} = 85,88 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Коефіцієнт теплопередачі приймаємо орієнтовно рівним  $250 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$  [6, с. 47].

Поверхня теплообміну підігрівача вхідної суміші:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{н\ddot{o}}}}$$

$$F = \frac{232419}{250 \cdot 85,88} = 10,82 \text{ м}^2$$

Приймаємо двоходовий кожухотрубчастий теплообмінник з наступними характеристиками [6, с. 51]:

- діаметр кожуха 325 мм;
- труба 20x2 мм;
- кількість труб в теплообміннику 90 шт;
- довжина труб 2,0 м;
- поверхня теплообміну  $11,0 \text{ м}^2$ .

#### 4.8.2 Дефлегматор (конденсатор)

Витрата теплоти, що віддається охолодній воді при конденсації парів в дефлегматорі, визначається з рівняння теплового балансу дефлегматора:

$$Q_{\bar{A}} = G_p \cdot (R + 1) \cdot r_p = G_B \cdot C_B \cdot (t_K - t_i)$$

$$\text{тут } r_p = \dot{\alpha}_D \cdot r_A + (1 - \dot{\alpha}_D) \cdot r_B$$

Питомі теплоти пароутворення бензолу  $r_A$  і толуолу  $r_B$  при  $t_{xp}=80,65$  °C:

$$r_A = 393,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}; r_B = 378,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \quad [1, \text{с.542}];$$

$$r_p = 0,975 \cdot 393,4 + (1 - 0,975) \cdot 378,4 = 393 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$Q_{\bar{A}} = \frac{2188,5}{3600} \cdot (2,65 + 1) \cdot 393 \cdot 10^3 = 8,72 \cdot 10^5 \text{ Вт}$$

Приймаємо температуру охолодної води на виході з дефлегматора 25 °C, тоді витрата охолодної води:

$$G_{\bar{A}} = \frac{Q_{\bar{A}}}{\tilde{N}_{\bar{A}} \cdot (t_e - t_i)}$$

$$G_{\bar{A}} = \frac{8,72 \cdot 10^5}{4190 \cdot (25 - 10)} = 13,87 \text{ м}^3/\text{год}$$

Середня різниця температур при протиточній схемі руху теплоносіїв:

$$80,65 \text{ °C} \longrightarrow 80,65 \text{ °C}$$

$$25 \text{ °C} \longleftarrow 10 \text{ °C}$$

Більша різниця температур:

$$\Delta t_{\bar{a}} = 80,65 - 10 = 70,65 \text{ °C}$$

Менша різниця температур:

$$\Delta t_i = 80,65 - 25 = 55,65 \text{ °C}$$

Так як  $\frac{\Delta t_{\bar{a}}}{\Delta t_i} = \frac{70,65}{55,65} = 1,27 < 2$ , то

$$\Delta t_{\bar{n}\bar{o}} = \frac{\Delta t_{\bar{a}} + \Delta t_i}{2}$$

$$\Delta t_{\bar{n}\bar{o}} = \frac{70,65 + 55,65}{2} = 63,15 \text{ °C}$$

Приймаємо орієнтовно коефіцієнт теплопередачі  $K=500 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  [6, с. 47].

Поверхня теплообміну дефлегматора:

$$F = \frac{Q_{\dot{A}}}{K \cdot \Delta t_{\text{н\ddot{o}}}}$$

$$F = \frac{8,72 \cdot 10^5}{500 \cdot 63,15} = 27,62 \text{ м}^2$$

Приймаємо двоходовий кожухотрубчастий теплообмінник з наступними характеристиками [6, с. 51]:

- діаметр кожуха 400 мм;
- труба 25x2 мм;
- кількість труб в теплообміннику 100 шт;
- довжина труб 4 м;
- поверхня теплообміну 31 м<sup>2</sup>.

#### 4.8.3 Холодильники дистилляту і кубового залишку

Витрата теплоти, що віддається остудній воді у водяному холодильнику дистилляту, визначається з рівняння теплового балансу:

$$Q = G_p \cdot C_p' \cdot (t_{Xp} - t_{p\text{ в\ddot{i}i}}) = G_B \cdot C_B \cdot (t_K - t_i)$$

де  $C_p'$  – теплоємність дистилляту при його середній температурі  $(t_{Xp} + t_{p\text{ к\ddot{i}н}})/2$ ;

$t_{\text{ в\ddot{i}i}}$  – кінцева температура дистилляту після холодильника, °С (за умовою завдання).

$$C_p' = \alpha_D \cdot \tilde{N}_A + (1 - \alpha_D) \cdot \tilde{N}_{\dot{A}}$$

$$C_{\dot{A}} = 0,449 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{}^\circ\text{С}}$$

$$C_A = 0,441 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{}^\circ\text{С}} \text{ при середній температурі:}$$

$$t_{\text{н\ddot{o}}} = \frac{t_{Xp} + t_{p\text{ в\ddot{i}i}}}{2}$$

$$t_{\text{н\ddot{o}}} = \frac{80,65 + 21}{2} = 50,83 \text{ }^\circ\text{С} [1, \text{ с. 562}]$$

$$C_p' = 0,979 \cdot 0,449 + (1 - 0,975) \cdot 0,441 = 0,451 \frac{\text{кг} \cdot \text{°С}}{\text{л} \cdot \text{°С}} = 1889,69 \frac{\text{кДж}}{\text{л} \cdot \text{°С}}$$

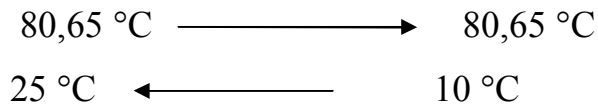
$$Q = \frac{2188,5}{3600} \cdot 1889,69 \cdot (80,65 - 21) = 68524 \text{ Вт}$$

Витрата остигнутої води при нагріванні її на 15 °С в холодильнику товарного дистилляту:

$$G_A = \frac{Q}{\tilde{N}_A \cdot (t_e - t_i)}$$

$$G_A = \frac{68524}{4190 \cdot (25 - 10)} = 1,09 \text{ л/с}$$

Середня різниця температур при протиточній схемі руху теплоносіїв:



Більша різниця температур:

$$\Delta t_a = 80,65 - 10 = 70,65 \text{ °С}$$

Менша різниця температур:

$$\Delta t_i = 80,65 - 25 = 55,65 \text{ °С}$$

Так як  $\frac{\Delta t_a}{\Delta t_i} = \frac{70,65}{55,65} = 1,27 < 2$ , то середню різницю температур визначаємо

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_a + \Delta t_i}{2}$$

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{70,65 + 55,65}{2} = 63,15 \text{ °С}$$

При орієнтовному значенні  $K = 400 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{°С}$  поверхня теплообміну холодильника товарного дистилляту складе:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{ср}}}$$

$$F = \frac{68524}{400 \cdot 63,15} = 2,71 \text{ м}^2$$

Приймаємо одноходовий кожухотрубчастий теплообмінник з наступними характеристиками [6, с. 51]:

діаметр кожуха 273 мм;

- труба 25x2 мм;
- кількість труб в теплообміннику 37 шт;
- довжина труб 1 м;
- поверхня теплообміну 3,0 м<sup>2</sup>.

Витрата теплоти, що віддається остиглій воді у водяному холодильнику кубового залишку, визначається з рівняння теплового балансу:

$$Q = G_w \cdot C_w' \cdot (t_{xw} - t_{w\text{кін}}) = G_B \cdot C_B \cdot (t_K - t_i)$$

де  $C_w$  – теплоємність кубового залишку при його середній температурі  $(t_{xw} + t_{w\text{кін}})/2$ ;

$t_{w\text{кін}}$  – кінцева температура кубового залишку після холодильника, °С (за умовою завдання).

$$C_w' = \alpha_w \cdot \tilde{N}_A + (1 - \alpha_w) \cdot \tilde{N}_A$$

$$C_A = 0,466 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$$

$$C_A = 0,457 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}, \text{ при середній температурі } t_{\text{ср}} = \frac{t_{xw} + t_{w\text{кін}}}{2} = \frac{109,5 + 21}{2} = 65,25 ^\circ\text{С};$$

[1, с. 562]; таблиця Б.7 Додатка.

$$C_w' = 0,02 \cdot 0,466 + (1 - 0,02) \cdot 0,457 = 0,457 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}} = 1914,83 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$$

$$Q = \frac{3311,5}{3600} \cdot 1914,83 \cdot (109,5 - 21) = 155882 \text{ Дж}$$

Витрата остиглій води при нагріванні її на 15 °С в холодильнику кубового залишку:

$$G_A = \frac{Q}{\tilde{N}_A \cdot (t_e - t_i)} = \frac{155882}{4190 \cdot (25 - 10)} = 2,48 \text{ м}^3/\text{год}$$

Середня різниця температур при протиточній схеми руху теплоносіїв:

$$\begin{array}{ccc} 109,5 ^\circ\text{С} & \longrightarrow & 21 ^\circ\text{С} \\ 25 ^\circ\text{С} & \longleftarrow & 10 ^\circ\text{С} \end{array}$$

Більша різниця температур:

$$\Delta t_a = 109,5 - 25 = 84,5 ^\circ\text{С}$$

Менша різниця температур:

$$\Delta t_i = 21 - 10 = 11 \text{ }^\circ\text{C}$$

Так як  $\frac{\Delta t_a}{\Delta t_i} = \frac{84,5}{11} = 7,68 > 2$ , то середню різницю температур визначаємо

$$\Delta t_{\text{нб}} = \frac{\Delta t_a - \Delta t_i}{\ln(\Delta t_a / \Delta t_i)}$$

$$\Delta t_{\text{нб}} = \frac{84,5 - 11}{\ln(84,5 / 11)} = 36,05 \text{ }^\circ\text{C}$$

При орієнтовному значенні  $K=400 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$  [6, с. 47], поверхня теплообміну холодильника кубового залишку складе:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{нб}}} = \frac{155882}{400 \cdot 36,05} = 10,81 \text{ м}^2$$

Приймаємо двоходовий кожухотрубчастий теплообмінник з наступними характеристиками [6, с. 51]:

- діаметр кожуха 325 мм;
- труба 20x2 мм;
- кількість труб в теплообміннику 90 шт;
- довжина труб 2 м;
- поверхня теплообміну 11 м<sup>2</sup>.

#### 4.8.4 Кип'ятильник (випарник)

Кількість теплоти  $Q_K$ , яке треба подати в куб колони, визначається з рівняння теплового балансу колони:

$$Q_{\text{в}} = Q_{\text{а}} + G_{\text{д}} \cdot C_{\text{д}} \cdot t_{\text{хр}} + G_{\text{в}} \cdot C_{\text{в}} \cdot t_{\text{хв}} - G_{\text{ф}} \cdot C_{\text{ф}} \cdot t_{\text{хф}} + Q_{\text{нб}}$$

Теплові втрати приймаємо 3% від корисно витраченої теплоти. Питомі теплоємності взяті відповідно при  $t_{\text{хр}}=80,65 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{хф}}=93,91 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{хв}}=109,5 \text{ }^\circ\text{C}$ .

$$C_{\text{д}} = \alpha_{\text{д}} \cdot \tilde{N}_{\text{а}} + (1 - \alpha_{\text{д}}) \cdot \tilde{N}_{\text{а}} = 0,975 \cdot 0,483 + (1 - 0,975) \cdot 0,473 = 0,483 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{}^\circ\text{C}} = 2023,77 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{}^\circ\text{C}}$$

$$C_{\text{ф}} = \alpha_{\text{ф}} \cdot \tilde{N}_{\text{а}} + (1 - \alpha_{\text{ф}}) \cdot \tilde{N}_{\text{а}} = 0,4 \cdot 0,499 + (1 - 0,4) \cdot 0,488 = 0,492 \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{}^\circ\text{C}} = 2061,48 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{}^\circ\text{C}}$$



$$C_w = \alpha_w \cdot \tilde{N}_A + (1 - \alpha_w) \cdot \tilde{N}_A = 0,02 \cdot 0,513 + (1 - 0,02) \cdot 0,499 = 0,499 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}} = 2090,81 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3 \cdot \text{s}}$$

$$Q_{\dot{e}} = 1,03 \cdot (8,72 \cdot 10^5 + \frac{2188,5}{3600} \cdot 2023,77 \cdot 80,65 + \frac{3311,5}{3600} \cdot 2090,81 \cdot 109,5 - \frac{5500}{3600} \cdot 2061,48 \cdot 93,91) = 9,13 \cdot 10^5 \text{ W}$$

Витрата гріючої пари при  $P = 4,5 \text{ кгс/см}^2$ :

$$G_{a.i} = \frac{Q_{\dot{e}}}{r} = \frac{9,13 \cdot 10^5}{2129 \cdot 10^3} = 0,429 \text{ t/h}$$

Середня різниця температур дорівнює різниці між температурою насиченої пари при  $P=4,5 \text{ кгс/см}^2$  і температурою кипіння кубового залишку:

$$\Delta t_{\text{нб}} = 147 - 109,5 = 37,5 \text{ }^\circ\text{C}$$

При орієнтовно прийнятому коефіцієнті теплопередачі  $K = 2000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{K}$ , [6, с.47] поверхня кип'ятильника складе:

$$F = \frac{Q_{\dot{e}}}{K \cdot \Delta t_{\text{нб}}} = \frac{9,13 \cdot 10^5}{2000 \cdot 37,5} = 12,17 \text{ м}^2$$

Приймаємо одноходовий кожухотрубчастий теплообмінник з наступними характеристиками [6, с. 51]:

- діаметр кожуха 325 мм;
- труба 20x2 мм;
- кількість труб в теплообміннику 100 шт;
- довжина труб 2,0 м;
- поверхня теплообміну 12,5 м<sup>2</sup>.

## 5 РОЗРАХУНКИ НА МІЦНІСТЬ ЕЛЕМЕНТІВ ПІДГРІВАЧА

### 5.1 Початкові дані:

Наружний діаметр кожуха $D$ , мм	325
Довжина теплообмінних труб $l$ , мм	2000
Зовнішній діаметр теплообмінної труби $d_o$ , мм	20
Товщина стінки труби $S_o$ , мм	2
Число ходів по трубах	2
Розрахунковий тиск в трубному просторі, МПа	1,6
Розрахунковий тиск в міжтрубному просторі, МПа	1,6
Розрахункова температура труб, °C	100
Розрахункова температура кожуха, °C	160
Матеріал кожуха	Ст3сп
Матеріал розподільної камери	12X18H10T
Матеріал теплообмінних труб	12X18H10T
Матеріал трубної решітки	12X18H10T
Матеріал перегородок	Ст3сп
Матеріал прокладок розподільної камери	пароніт
Група теплообмінника	1

### 5.2 Визначення розрахункових параметрів

#### 5.2.1 Розрахункова температура

Розрахункову температуру розподільної камери  $t_{\text{eai}}$ , °C, визначаємо за формулою:

$$t_{\text{eai}} = 2 \cdot t_o - t_e \quad (5.1)$$

$$t_{\text{eai}} = 2 \cdot 100 - 160 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Розрахункову температуру ізольованих фланців визначаємо за формулою:

$$t_o = t_{\text{eai}} \text{ ,} \quad (5.2)$$

Розрахункову температуру ізольованих апаратних фланців і фланців штуцерів розподільної камери теплообмінника приймаємо рівній температурі розподільної камери:

$$t_{\delta} = t_{\text{eai}} = 40 \text{ }^{\circ}\text{Ñ}.$$

Розрахункову температуру ізольованих фланців штуцерів міжтрубного простору приймаємо рівній температурі середовища міжтрубного простору (кожуха):

$$t_{\delta} = t_{\text{e}} = 160 \text{ }^{\circ}\text{Ñ}.$$

Розрахункову температуру болтів для ізольованих фланцевих з'єднань визначаємо за формулою:

$$t_{\text{a}} = 0,97 \cdot t_{\text{eai}} \quad (5.3)$$

Розрахункова температура болтів корпусних фланцевих з'єднань і фланців штуцерів розподільної камери:

$$t_{\text{a}} = 0,97 \cdot t_{\text{eai}}$$

$$t_{\text{a}} = 0,97 \cdot 40 = 39 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Розрахункова температура болтів фланцевих з'єднань штуцерів міжтрубного простору:

$$t_{\text{a}} = 0,97 \cdot t_{\text{e}}$$

$$t_{\text{a}} = 0,97 \cdot 160 = 155 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

### 5.2.2 Допустимі напружини

Допустимі напружини при розрахунковій температурі  $[\sigma]$  і при температурі  $20^{\circ}\text{C}$   $[\sigma]_{20}$ , МПа, для елементів апарату приведені в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Допустимі напружини деталей теплообмінника

Елементи апарата	Матеріал	Допустимі напружини, МПа		Відношення допустимих напружин, $[\sigma]_{20}/[\sigma]$
		при температурі 20 °С $[\sigma]_{20}$	при розрахунковій температурі $[\sigma]$	
Кожух	Ст3сп	154	144,4	1,066
Розподільна камера	12X18Н10Т	184	181,5	1,0138
Теплообмінні труби	12X18Н10Т	184	166,4	1,106
Трубна решітка	12X18Н10Т	184	166,4	1,106
Перегородки	Ст3сп	154	144,4	1,066
Фланці розподільної камери	12X18Н10Т	184	181,5	1,0138
Фланці кожуха	Ст3сп	154	144,4	1,066
Болти кріплення фланців штуцерів міжтрубного простору	Сталь 40	130	122,4	1,062
Болти і гайки кріплення апаратних фланців і штуцерів трубного простору	20X13	195	191,7	1,017
Примітка. Допустимі напружини при температурі 20°С і розрахунковій температурі визначені методом лінійної інтерполяції за [21].				

### 5.2.3 Коефіцієнти міцності зварних швів

Трубний простір теплообмінника по розрахунковому тиску, температурі і характеру робочого середовища відноситься до 1 групи апаратів [21], для якої довжина контрольованих швів складає 100% від їх спільної довжини. Для стикових швів з двостороннім суцільним проваром, виконаних автоматичною зваркою, коефіцієнт міцності зварних швів трубного простору приймаємо рівним

$$\varphi_p = 1$$

### 5.2.4 Робочий, розрахунковий і пробний тиск

Умовний тиск в теплообміннику згідно завданню в трубному просторі  $P_{\text{тр}}=1,6\text{МПа}$ , у міжтрубному просторі  $P_{\text{к}}=1,6\text{МПа}$ .

Розрахунковий тиск визначаємо за формулою

$$P = \max \{ |P_{\text{д}}|; |P_{\text{к}}|; |P_{\text{д}} - P_{\text{к}}| \}, \quad (5.4)$$

де  $P_{\text{д}}$  - розрахунковий тиск в трубному просторі, МПа;

$P_{\text{к}}$  - розрахунковий тиск в міжтрубному просторі, МПа.

$$P = \max \{ 1,6; 1,6; |1,6 - 1,6| \} = 1,6 \text{ МПа}$$

Під пробним тиском в апараті слід приймати тиск, при якому проводиться випробування апарату на міцність і герметичність. Випробування сталевих зварних апаратів повинно проводитися пробним тиском, який визначається за формулою

$$P_{\text{пр}} = 1,25 \cdot P \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]}, \quad (5.5)$$

де  $P$  – розрахунковий тиск в трубному і міжтрубному просторах відповідно,

$$P_{\text{т}}=1,6 \text{ МПа}, \quad P_{\text{к}}=1,6 \text{ МПа};$$

Відношення  $[\sigma]_{20}/[\sigma]$  приймаємо по тому з використовуваних матеріалів елементів кожної порожнини апарату, для якого воно є найменшим.

Для трубного простору при мінімальному відношенні допустимих напружин  $[\sigma]_{20}/[\sigma]=1,0$ , пробний тиск складає

$$P_{\text{пр д}} = 1,25 P_{\text{д}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,25 \cdot 1,6 \cdot \frac{184}{181,5} = 2,0 \text{ МПа} ;$$

Гідростатичний тиск при випробуванні трубного простору теплообмінника

$$P_{\text{а д}} = \rho_{\text{а}} \cdot g \cdot H_{\text{н}} \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,67 \cdot 10^{-6} = 0,026 \text{ МПа} ; \quad (5.6)$$

де  $H_{\text{с}}$  - висота стовпа води в трубному просторі,  $H_{\text{с}}=2,67\text{м}$ ;

Гідростатичний тиск при випробуванні

$$P_{\text{аа д}} = 0,026 \text{ МПа} \leq 0,05 P_{\text{пр д}} = 0,05 \cdot 2,0 = 0,1 \text{ МПа} ; \quad (5.7)$$

складає менше 5% від пробного, тому за розрахунковий тиск в умовах випробування приймаємо пробний тиск.

$$P_{\dot{a}\dot{o}} = P_{\dot{i}\dot{o}\dot{o}} = 2,0 \text{ МПа}$$

Умова

$$P_{\dot{a}\dot{o}} = 2,0 \text{ МПа} \leq 1,35 \cdot P_{\dot{o}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,35 \cdot 1,6 \cdot \frac{184}{181,5} = 2,2 \text{ МПа} \quad (5.8)$$

виконується, тому розрахунок елементів трубного простору в умовах гідравлічного випробування проводити не потрібно.

Для міжтрубного простору при відношенні допустимих напружин  $[\sigma]_{20} / [\sigma] = 1,066$  пробний тиск складає

$$P_{\dot{i}\dot{o}\dot{e}} = 1,25 P_{\dot{e}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,25 \cdot 1,6 \cdot 1,066 = 2,1 \text{ МПа} ;$$

Гідростатичний тиск при випробуванні міжтрубного простору

$$P_{\dot{a}\dot{a}\dot{e}} = \rho_{\dot{a}} \cdot g \cdot H_{\dot{e}} \cdot 10^{-6} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 10^{-6} = 0,02 \text{ МПа} \leq \\ \leq 0,05 P_{\dot{i}\dot{o}\dot{e}} = 0,05 \cdot 2,1 = 0,1 \text{ МПа}$$

складає менше 5% від пробного, тому за розрахунковий тиск в умовах випробування приймаємо пробний тиск

$$P_{\dot{e}\dot{e}} = P_{\dot{i}\dot{o}\dot{e}} = 2,1 \text{ МПа} ;$$

Умова

$$P_{\dot{a}\dot{e}} = 2,1 \text{ МПа} \leq 1,35 P_{\dot{e}} \cdot \frac{[\sigma]_{20}}{[\sigma]} = 1,35 \cdot 1,6 \cdot 1,062 = 2,3 \text{ МПа}$$

виконується, тому розрахунок елементів міжтрубного простору в умовах гідравлічного випробування проводити не потрібно.

### 5.2.5 Додатки до розрахункової товщини конструктивних елементів

Сума додатків до розрахункової товщини трубних решіток  $C_p$ , мм, складає:

$$\check{N}_p = C_1 + C_2 + C_3, \quad (5.9)$$

де  $C_1$  – добавка для компенсації корозії і ерозії, мм;

$C_2$  – добавка для компенсації мінусового допуску, мм;

Добавка для компенсації корозії і ерозії  $C_1$  визначається за формулою

$$C_1 = P \cdot \tau + C_3, \quad (5.10)$$

де  $P$  – швидкість проникнення корозії,  $P=0,05$  мм/рік,

$\tau$  – термін служби апарата,  $\tau=20$  років,

$C_3$  – добавка для компенсації ерозії,  $C_3=0$ .

$$C_1 = 0,05 \cdot 20 + 0 = 1 \text{ мм},$$

Добавка  $C_2$  приймається по стандартах на прокат залежно від товщини листа за таблицею 6 [21],  $C_2=0,8$  мм.

Технологічна добавка  $C_3$  передбачає компенсацію стоншування стінки елемента апарату при технологічних операціях – витяжці, штампуванні, гнутті і т. д. Приймаємо  $C_3=0$ .

$$\text{Тоді } C = 1 + 0,8 + 0 = 1,8 \text{ мм.}$$

Для сталевих безшовних труб добавку для компенсації мінусового допуску приймаємо рівною 15% від товщини стінки труби.

Суму добавки до розрахункової товщини стінки визначаємо за формулою:

$$C_2 = 0,15 \cdot S_1 \quad (5.11)$$

$$C_2 = 0,15 \cdot 8 = 1,2 \text{ мм}$$

Технологічна добавка  $C_3$  передбачає компенсацію стоншування стінки елемента апарату при технологічних операціях – витяжці, штампуванні, гнутті і т. д. Приймаємо  $C_3=0$ .

$$\text{Тоді } C = 1 + 1,2 + 0 = 2,2 \text{ мм.}$$

Сума добавок до розрахункової товщини еліптичного днища

Добавка  $C_2$  приймається по стандартах на прокат залежно від товщини листа за таблицею 6 [21],  $C_2=0,5$  мм.

$$\text{Тоді } C = 1 + 0,5 + 0 = 1,5 \text{ мм.}$$

### 5.3 Розрахунок товщини стінки кожуха

#### 5.3.1 Розрахунок циліндричної обичайки кожуха

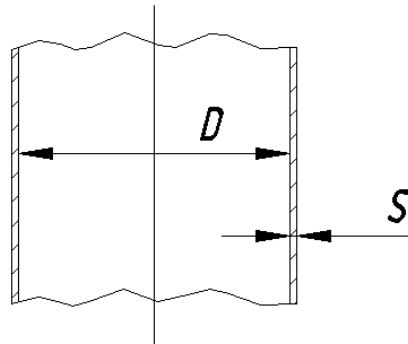


Рисунок 5.1 - Циліндрична обичайка

Розрахункова товщина стінки апарата визначається за формулою

$$S_p = \frac{P_k \cdot D}{2 \cdot [\sigma]_k \cdot \varphi_p - P_k}, \quad (5.12)$$

де  $P_k$  – розрахунковий внутрішній тиск в міжтрубному просторі теплообмінника,  $P=1,6$  МПа;

$D$  – внутрішній діаметр обичайки (кожуха),  $D=309$  мм;

$[\sigma]_k$  – допустима напружина для матеріалу обичайки кожуха при розрахунковій температурі,  $[\sigma]_k = 144,4$  МПа ;

$\varphi_p$  – коефіцієнт міцності подовжніх швів,  $\varphi_p=1$  (для труб).

$$S_p = \frac{1,6 \cdot 309}{2 \cdot 144,4 \cdot 1 - 1,6} = 1,7 \text{ мм}$$

Виконавча товщина стінки обичайки кожуха визначається за формулою

$$S \geq S_p + C, \quad (5.13)$$

$$S \geq 1,7 + 2,2 = 3,9 \text{ мм}$$

Виконавча товщина стінки обичайки кожуха приймається  $S=8$  мм.

Визначення допустимого надлишкового тиску

Для набутого значення  $S$  розраховуємо допустимий внутрішній надлишковий тиск за формулою

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_p \cdot (S - C)}{D + (S - C)}, \quad (5.14)$$



$$[\text{D}] = \frac{2 \cdot 144,4 \cdot 1,0 \cdot (8 - 2,2)}{309 + (8 - 2,2)} = 5,3 \text{ МПа}$$

При цьому повинна виконуватися умова

$$P_k \leq [P], \quad (5.15)$$

1,6 МПа < 5,3 МПа, умова виконується.

Перевірка умов застосування розрахункових формул

Розрахункові формули застосовуються при відношенні товщини стінки до діаметру

$$\frac{S - C}{D} \leq 0,1, \quad (5.16)$$

$$\frac{8 - 2,2}{309} = 0,02 < 0,1,$$

умова виконується, отже, формули застосовуються.

#### 5.4 Розрахунок розподільної камери

##### 5.4.1 Розрахунок товщини циліндричної обичайки камери

Розрахункова товщина стінки камери визначається за формулою (5.12)

$$S_p = \frac{P_k \cdot D}{2 \cdot [\sigma]_k \cdot \varphi_p - P_k},$$

де  $P_k$  – розрахунковий внутрішній тиск в міжтрубному просторі теплообмінника,  $P=1,6$  МПа;

$D$  – внутрішній діаметр обичайки (кожуха),  $D=309$  мм;

$[\sigma]_k$  – допустима напружина для матеріалу обичайки кожуха при розрахунковій температурі,  $[\sigma]_k = 181,5$  МПа ;

$\varphi_p$  – коефіцієнт міцності подовжніх швів,  $\varphi_p=1$ .

$$S_0 = \frac{1,6 \cdot 309}{2 \cdot 181,5 \cdot 1 - 1,6} = 1,4 \text{ мм}$$

Виконавча товщина стінки обичайки кожуха визначається за формулою (5.13)

$$S \geq 1,4 + 2,2 = 3,6 \text{ мм}$$

Виконавча товщина стінки обичайки кожуха теплообмінника приймається  $S=8$  мм.

Визначення допустимого надлишкового тиску

Для набутого значення  $S$  розраховуємо допустимий внутрішній надлишковий тиск за формулою (5.14)

$$[P] = \frac{2 \cdot 181,5 \cdot 1,0 \cdot (8 - 2,2)}{309 + (8 - 2,2)} = 6,7 \text{ МПа}$$

При цьому повинна виконуватися умова (5.15)

$$1,6 \text{ МПа} < 6,7 \text{ МПа}, \text{ умова виконується.}$$

Перевірка умов застосування розрахункових формул

Розрахункові формули застосовуються при відношенні товщини стінки до діаметру за формулою (5.16)

$$\frac{8 - 2,2}{309} = 0,02 < 0,1,$$

умова виконується, отже, формули застосовуються.

#### 5.4.2 Розрахунок товщини стінки днища камери

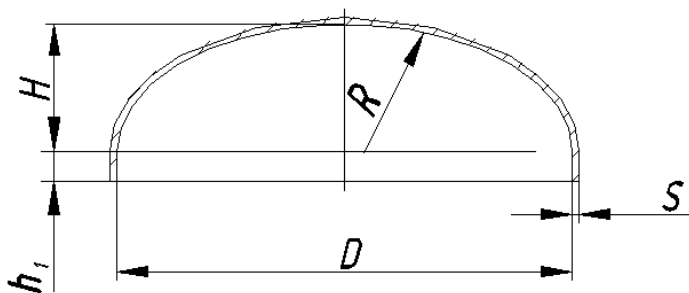


Рисунок 5.2 - Еліптичне днище

Розрахункова товщина стінки днища камери визначається за формулою

$$S_{1p} = \frac{P_r \cdot R}{2 \cdot [\sigma]_r \cdot \varphi_p - 0,5 \cdot P_r}, \quad (5.17)$$

де  $P_T$  – розрахунковий внутрішній надлишковий тиск в розподільній камері теплообмінника,  $P=1,6\text{МПа}$ ;

$R=D$  – для стандартних еліптичних днищ з  $H=0,25D$ ;

$\varphi_p$  - коефіцієнт міцності зварних швів,  $\varphi_p=1$ ,

$[\sigma]_r$  - допустима напружина для матеріалу днища при розрахунковій температурі,  $[\sigma]_b = 181,5 \text{ МПа}$  ;

$$S_{1\delta} = \frac{1,6 \cdot 309}{2 \cdot 181,5 \cdot 1 - 0,5 \cdot 1,6} = 1,4 \text{ мм}$$

Виконавча товщина стінки днища визначається за формулою (5.13)

$$S_1 \geq 1,4 + 1,5 = 2,9 \text{ мм}$$

Приймаємо товщину стінки днища камери  $S_1=4 \text{ мм}$ .

Визначення допустимого тиску

Для отриманого значення  $S_1$  розраховуємо допустимий внутрішній надлишковий тиск за формулою

$$[P] = \frac{2 \cdot [\sigma]_{p.k} \cdot \varphi_p \cdot (S_1 - C)}{R + 0,5 \cdot (S_1 - C)}, \quad (5.18)$$

$$[P] = \frac{2 \cdot 181,5 \cdot 1 \cdot (4 - 1,5)}{309 + 0,5 \cdot (4 - 1,5)} = 2,9 \text{ МПа}$$

При цьому повинна виконуватися умова (5.15)

$$1,6 \text{ МПа} < 2,9 \text{ МПа}, \text{ умова виконується.}$$

Перевірка умов застосування розрахункових формул

Розрахункові формули для еліптичних днищ застосовуються при виконанні умов

$$0,002 \leq \frac{S_1 - C}{D} \leq 0,1, \quad (5.19)$$

$$0,2 \leq \frac{H}{D} \leq 0,5, \quad (5.20)$$

де  $H$  – висота опуклої частини днища,  $H=77 \text{ мм}$ , [23].

$$0,002 \leq \frac{4-1,5}{309} = 0,008 \leq 0,1,$$

$$0,2 \leq \frac{77}{309} = 0,25 \leq 0,5, \quad \text{умови} \quad \text{виконуються,} \quad \text{отже,} \quad \text{формули}$$

застосовуються.

5.5 Розрахунок на міцність, жорсткість і стійкість елементів теплообмінних апаратів з компенсатором на кожусі

Прийнята товщина трубної решітки повинна забезпечувати можливість кріплення труб в решітці. Для решіток, у яких кріплення теплообмінних труб здійснюється розвальцюванням або зваренням з наступним розвальцюванням, прийнята товщина решітки повинна забезпечувати міцність та гарантований тиск герметизації вальцьованого з'єднання, а також нежолоблення решітки при розвальцюванні труб. Мінімальна товщина трубних решіток прийнята з цих міркувань:

$$S_p = 24\text{ї}$$

Виконавча товщина трубної решітки  $S_p$ , мм, має задовольняти умові міцності безтрубної зони

$$S_p \geq S_{pp} + C_p, \quad (5.21)$$

де  $S_{pp}$  – розрахункова товщина трубної решітки,

$C_p$  – сума добавок до розрахункової товщини решітки, мм.

Розрахункову товщину трубних решіток за умови міцності максимальної безтрубної зони визначаємо за формулою

$$S_{p0} = 0,5 D_a \sqrt{D/[\sigma]_0} \quad (5.22)$$

$$S_{p0} = 0,5 \cdot 35 \sqrt{1,6/174} = 1,7\text{ї}$$

де  $D_e$  – діаметр кола, вписаного в максимальну безтрубну зону  
визначається конструктивно

$$S_p \geq S_{pp} + C_p \quad 24 \geq 1,7 + 1,8 = 3,5\text{ї} \quad - \text{ умова виконується}$$

Розрахункову товщину трубної решітки в перерізу канавки під подовжню перегородку визначають за формулою

$$S_{i\delta} = S_{\delta\delta} \cdot \max \left\{ 1 - \sqrt{\frac{d_0}{b_i} \cdot \left( \frac{t_i}{t_\delta} - 1 \right)}; \sqrt{\varphi_\delta} \right\} \quad (5.23)$$

- де  $d_0$  – діаметр отвору в решітці під трубу, мм;  
 $b_n$  – ширина паза в трубній решітці під подовжню перегородку, мм;  
 $t_p$  – крок розташування отворів в решітці, мм;  
 $t_n$  – крок розташування отворів в зоні паза, мм;  
 $\varphi_p$  – коефіцієнт ослаблення трубної решітки.

Коефіцієнт ослаблення трубних решіток визначається за формулою:

$$\varphi_p = 1 - \frac{d_0}{t_p}$$

(5.24)

Розміри  $t_p$ ,  $t_n$  і  $d_0$  приймаються залежно від зовнішнього діаметру труби і класу точності з'єднання труба – трубна решітка по таблиці 1 [19].

Клас точності з'єднання труба - трубна решітка приймаємо 3.

$$\varphi_p = 1 - \frac{25,35}{32} = 0,208$$

$$\begin{aligned} S_{i\delta} &= 1,4 \cdot \max \left\{ 1 - \sqrt{\frac{25,35}{8} \cdot \left( \frac{55,4}{32} - 1 \right)}; \sqrt{0,208} \right\} = \\ &= 1,4 \cdot \max \{-0,52; 0,456\} = 0,6 \text{ и} \end{aligned}$$

Товщина трубної решітки в перерізу канавки під подовжню перегородку у розподільній камері має бути не менше

$$S_i \geq S_{i\delta} + C_\delta = 0,6 + 1,8 = 2,4 \text{ и}$$

По конструктивним міркуванням приймаємо товщину трубної решітки в перетині канавки під подовжню перегородку в розподільній камері

$$S_i = 24 \text{ и}$$

## 5.6 Розрахунок лінзового компенсатора

### 5.6.1 Умови застосування розрахункових формул

Розрахункові формули застосовні, якщо виконуються умови:

$$\frac{S_{\varepsilon}}{d_i} \leq 0,035; \quad 1,08 \leq \frac{D_{\varepsilon}}{d_i} \leq 3,00; \quad \frac{2r}{D_{\varepsilon} - d_i} \leq 0,4 \quad (5.25)$$

де  $S_{\varepsilon}=4\text{мм}$  - товщина стінки лінзового компенсатора;  
 $d_i=325\text{мм}$  - зовнішній діаметр западини хвилі компенсатора;  
 $D_{\varepsilon}=475\text{мм}$  - зовнішній діаметр гребеня хвилі компенсатора;  
 $r=14\text{мм}$  - внутрішній радіус тороїдального переходу в верхній та нижній частинах хвилі компенсатора

$$\frac{S_{\varepsilon}}{d_i} = \frac{4}{325} = 0,012 < 0,035$$

$$1,08 < \frac{D_{\varepsilon}}{d_i} = \frac{475}{325} = 1,46 < 3,00$$

$$\frac{2 \cdot r}{D_{\varepsilon} - d_i} = \frac{2 \cdot 14}{475 - 325} = 0,187 < 0,4$$

### 5.6.2 Визначення допоміжних величин

Розрахунковий діаметр западини хвилі компенсатора визначають за формулою

$$d_1 = d_i - S_{\varepsilon} \quad (5.26)$$

$$d_1 = 325 - 4 = 321 \text{ мм}$$

Розрахунковий діаметр гребеня хвилі компенсатора визначають за формулою

$$d_2 = D_{\varepsilon} - S_{\varepsilon} \quad (5.27)$$

$$d_2 = 475 - 4 = 471 \text{ мм}$$

Середній радіус тороїдального переходу хвилі компенсатора розраховують за формулою

$$r_s = 0,5 (2r + S_{\varepsilon}) \quad (5.28)$$

$$r_s = 0,5 \cdot (2 \cdot 14 + 4) = 16 \text{ мм}$$

Допоміжну величину впливу переходу розраховують за формулою

$$\rho_{\varepsilon} = 2 - 100 \frac{r_s}{d_1 + d_2} \quad (5.29)$$

$$\rho_{\varepsilon} = 2 - 100 \cdot \frac{16}{321 + 471} = -0,02 \text{ мм}$$

Розрахункова ширина пластинчастої зони хвилі компенсатора

$$b_{\varepsilon} = 0,5(d_2 - d_1 + \rho_{\varepsilon} \cdot r_s) \quad (5.30)$$

$$b_{\varepsilon} = 0,5 \cdot (471 - 321 + (-0,02) \cdot 16) = 74,8 \text{ мм}$$

Радіус закруглення пластинчастої зони хвилі компенсатора

$$R_0 = 0,25(d_2 + d_1 - 2b_{\varepsilon}) \quad (5.31)$$

$$R_0 = 0,25 \cdot (471 + 321 - 2 \cdot 74,8) = 160,6 \text{ мм}$$

Середній діаметр хвилі  $d_{\text{cp}}$ , мм, визначають за формулою

$$d_{\text{нб}} = 0,5(d_2 + d_1) \quad (5.32)$$

$$d_{\text{нб}} = 0,5 \cdot (471 + 321) = 396 \text{ мм}$$

Характеристики хвилі визначають за формулами:

$$\xi = \frac{d_2}{d_1} - 1 \quad (5.33)$$

$$\xi = \frac{471}{321} - 1 = 0,47$$

$$\eta = \frac{d_2 - d_1}{2r_s} - 2 \quad (5.34)$$

$$\eta = \frac{471 - 321}{2 \cdot 16} - 2 = 2,69$$

$$\alpha = \frac{S_{\varepsilon}}{d_1} \quad (5.35)$$

$$\alpha = \frac{4}{321} = 0,012$$

$$\lambda = \frac{b_{\varepsilon}}{R_0} \quad (5.36)$$

$$\lambda = \frac{74,8}{160,6} = 0,47$$

$$\gamma = 1 + 1,25 \frac{d_2}{d_1} - \frac{3,2r_s}{d_2 - d_1} \quad (5.37)$$

$$\gamma = 1 + 1,25 \cdot \frac{471}{321} - \frac{3,2 \cdot 16}{471 - 321} = 2,49$$

### 5.6.3 Розрахунок компенсатора на міцність

Виконавчу товщину стінки компенсатора  $S_{\varepsilon}$ , мм, розраховують за формулою

$$S_{\varepsilon} \geq S_{\varepsilon 0} + \tilde{N}_{\varepsilon} \quad (5.38)$$

де  $S_{\varepsilon 0}$  – розрахункова товщина стінки компенсатора, мм;

$S_{\varepsilon}$  – сума добавок до розрахункової товщини стінки компенсатора, мм.

Суму добавок до розрахункової товщини стінки компенсатора при  $S_{\varepsilon} = 4,0$  мм приймають рівною не більше 0,8 мм.

Розрахункову товщину стінки компенсатора визначають за формулою

$$S_{\varepsilon 0} = S_4 \cdot \sqrt{0,5 + \sqrt{0,25 + (S_3 / S_4)^4}} \quad (5.39)$$

де

$$S_3 = 0,25 (d_2 - d_1 - \gamma \cdot r_s) \cdot \sqrt{P / [\sigma]_{\varepsilon}} \quad (5.40)$$

$$S_3 = 0,25 \cdot (471 - 321 - 2,49 \cdot 16) \cdot \sqrt{\frac{1,6}{144,4}} = 2,9 \text{ и}$$

$$S_4 = \frac{P \cdot d_{cp}}{2 [\sigma]_{\varepsilon} \cdot \varphi} \cdot \frac{L}{d_2 - d_1 + 2 l_{\varepsilon} + 2,3 r_s} \quad (5.41)$$

$$S_4 = \frac{1,6 \cdot 396}{2 \cdot 144,4 \cdot 1} \cdot \frac{80}{471 - 321 + 2 \cdot 5 + 2,3 \cdot 16} = 0,9 \text{ и}$$

Позначення в формулах (5.40)-(5.41):

де  $[\sigma]_{\varepsilon}$  – допустима напружина для матеріалу лінзи при розрахунковій температурі, МПа;

$L$  – виконавча довжина компенсатора, мм;

$l_{\varepsilon}$  – приєднувальна довжина циліндричної частини компенсатора, мм;

$\varphi$  – коефіцієнт міцності подовжнього зварного шва компенсатора.

$$S_{\varepsilon 0} = 0,9 \cdot \sqrt{0,5 + \sqrt{0,25 + (2,9/0,9)^4}} = 2,97 \text{ и}$$

Виконавчу товщину стінки компенсатора розраховують за формулою

$$S_{\varepsilon} \geq S_{\varepsilon 0} + \tilde{N}_{\varepsilon} \quad (5.42)$$

$$S_{\varepsilon} = 2,97 + 0,8 = 3,77 \text{ и}$$

Приймаємо:

$$S_{\varepsilon} = 4 \text{ и}$$

Допустимий тиск  $[\mathcal{D}]_{\varepsilon}$  визначають за формулою

$$[\mathcal{P}]_{\varepsilon} = \frac{[\mathcal{P}]_1}{\sqrt{1 + \left(\frac{[\mathcal{P}]_1}{[\mathcal{P}]_2}\right)^2}} \quad (5.43)$$

де

$$[\mathcal{P}]_1 = 16 \left( \frac{S_{\varepsilon} - \tilde{N}_{\varepsilon}}{d_2 - d_1 - \gamma \cdot r_s} \right)^2 \cdot [\sigma]_{\varepsilon} \quad (5.44)$$

$$[\mathcal{D}]_1 = 16 \cdot \left( \frac{4 - 0,8}{471 - 321 - 2,49 \cdot 16} \right)^2 \cdot 144,4 = 1,94 \text{ и}$$



$$[P]_2 = \frac{2 [\sigma]_{\epsilon} \cdot \varphi \cdot (S_{\epsilon} - C_{\epsilon}) \cdot d_2 - d_1 + 2 l_{\epsilon} + 2,3 r_s}{d_{cp} \cdot L} \quad (5.45)$$

$$[D]_2 = \frac{2 \cdot 144,4 \cdot 1 \cdot (4 - 0,8)}{396} \cdot \frac{471 - 321 + 2 \cdot 5 + 2,3 \cdot 16}{80} = 5,7 \text{ МПа}$$

$$[D]_{\epsilon} = \frac{1,94}{\sqrt{1 + \left(\frac{1,94}{5,7}\right)^2}} = 1,83 \text{ МПа}$$

При цьому повинна виконуватися умова

$$P_k \leq [P],$$

1,6 МПа < 1,83 МПа, умова виконується.

#### 5.6.4 Розрахунок числа лінз компенсатора

Різницю у видовженні кожуха і труб в робочих умовах, яку необхідно скомпенсувати, визначаємо за формулою

$$\Delta = l \cdot |[\alpha_{\epsilon} \cdot (t_{\epsilon} - t_0) - \alpha_{\delta} \cdot (t_{\delta} - t_0)]| \quad (5.46)$$

де  $\alpha_{\epsilon}, \alpha_{\delta}$  – коефіцієнти лінійного розширення матеріалів відповідно кожуха та труб,  $1/^{\circ}\text{C}$ ;

$t_{\epsilon}, t_{\delta}, t_0$  – температури відповідно кожуха, труб і виготовлення апарата,  $^{\circ}\text{C}$ ,  
( $t_0 = 20^{\circ}\text{C}$ )

$l$  – довжина труб, мм  $l = 2000$  мм

$$\alpha_{\epsilon} = 12 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$$

$$\alpha_{\delta} = 17 \cdot 10^{-6} 1/^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta = 2000 \cdot \left| \left[ 12 \cdot 10^{-6} \cdot (160 - 20) - 17 \cdot 10^{-6} \cdot (100 - 20) \right] \right| = 0,64 \text{ мм}$$

За додатком визначаємо компенсуючу здатність однієї лінзи компенсатора при загальному числі циклів навантаження  $N = 10^3$ ,  $\Delta_{\epsilon} = 3$  мм

Необхідне число лінз в компенсаторі розраховуємо за формулою

$$n_{\epsilon} = \frac{\Delta}{\Delta_{\epsilon}} = \frac{0,64}{3} = 0,21$$

Отримане число лінз округляємо до найближчого більшого цілого числа,

$$n_{\epsilon} = 1.$$

## 6 ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ПІДІГРІВАЧА

### 6.1 Виготовлення основних елементів підігрівача

#### 6.1.1 Виготовлення обичайок

Циліндрична частина корпусу діаметром до 800 мм може бути виконана у вигляді обичайки з одного звальцьованого в циліндр листа; обичайки діаметром до 1600 мм - з двох листів, звальцьованих в напівциліндри, і з декількох обичайок при великій довжині корпусу, що визначається розмірами листового прокату, що випускається промисловістю.

Листову сталь, призначену для виготовлення корпусів і інших деталей апаратів, перевіряють перед розміткою і різанням на хвилястість і на прогин, і якщо ці показники не перевищують норм, листи направляють на розмітку і різання.

Для полегшення операцій обробки листових заготівель листи великих розмірів розрізають на дрібніші листи. Для різання листів застосовують також автоматичне різання електродугою.

Габаритні розміри листа мають бути такими, щоб після розмітки розгортки обичайки з необхідними припусками на обробку відходи металу були мінімальними.

Механічне прямолінійне і криволінійне різання листів товщиною до 8 мм проводять роликівими ножицями з двома дисковими ножами. Прямолінійне різання листів більшої товщини проводять на ножицях гільйотин або на пресс-ножицях.

Газове різання, широко поширене при виготовленні теплообмінних апаратів, може виконуватися вручну, напівавтоматом і автоматично.

Подовжні і кільцеві кромки обичайок, призначені для накладення зварного шва, обробляють для отримання поверхні необхідного профілю і чистоти. Обробка кромки здійснюється механічно або вогневим способом.

Перед вальцюванням листів необхідно зробити спеціальну операцію - підведення (підгибку) кромки, оскільки при вальцюванні листів в циліндр або конус краї їх на довжині 100—150 мм залишаються прямими, і при стикуванні таких кінців поверхня апарата отримує гострий злам на стику. Залежно від товщини листа підведення кромки виконують на кромкогибочних пресах, на гибочних вальцях або вручну.

Після підведення кромки листи поступають на вальцювання для надання їм необхідної конфігурації. Вальцювання виконується на трьох- або чотиривалкових горизонтальних вальцях.

### 6.1.2 Виготовлення еліптичних днищ

Для виготовлення днищ потрібне наступне устаткування: обладнання для плазмового різання металу, апарат для автоматичного зварювання, а також безліч токарно-фрезерних верстатів для обробки кромки та ін.

Спочатку здійснюється розкрій заготівлі на верстаті плазмового або механічного різання. Заготівлі для еліптичних, сферичних або плоских днищ подають на гідравлічний прес для штампування або фланжировочну машину для холодної обкатки.

На гідравлічному пресі заготівлі надається необхідна форма при її нагріванні під тиском. Далі вже сформоване днище проходить процес відбортовки методом холодної обкатки - пластичного загинання бортиків (кромки) днища. Гибку кромки виконують формувальні ролики, які рухаються в горизонтальному і вертикальному напрямку. Також для обробки бортиків може використовуватися метод вальцювання. Для отримання рівних кромки їх обробляють на шліфувальній машині або установці плазмового різання. На фланжировочному верстаті відбувається послідовно надання форми днищу і відбортовка кромки роликми. Для захисту днища під час експлуатації, поверхню шліфують, проводять електрохімічне трієння, забарвлюють, піддають піскоструминній обробці або наносять спеціальне антикорозійне покриття.

Після отримання готового елемента він проходить контроль якості в лабораторії візуально-вимірювальним методом, ультразвуковим або методом проникаючого контролю.

Найбільш поширеним видом днищ є еліптичні, оскільки їх застосовують в посудинах, що працюють під тиском. Днища виготовляються двома способами залежно від діаметру: днища діаметром до 2 м виготовляють на гідравлічних пресах, більші днища - на фланжировочних верстатах з наступним зварюванням елементів. Краї днищ проходять відбортовку кромки. Розміри еліптичних днищ за ГОСТ 6533-78.

### 6.1.3 Виготовлення трубних решіток

Трубні решітки виготовляють із сталевих листів або поковок, в особливих случаях - з інших металів і сплавів, перегородки - з сталевих листів необхідної товщини. Відібрані за якістю і розмірами листи правлять на листопрямильних вальцях. На виправлених листах розмічають контури для вирізання трубної решітки і, якщо необхідно, для обробки поверхні під фланець. Вирізання заготівель для трубної решітки і перегородок проводять автоматичним або напівавтоматичним газовим або плазмено-дуговим різанням. Вирізані заготівлі трубних решіток обробляють по торцю і по площині, а заготівлі перегородок тільки по торцю. При виготовленні трубної решітки для багатоходового (по трубному простору) теплообмінного апарату чистовій обробці піддають або усю її поверхню з боку камери, що необхідно для герметичного з'єднання решітки з перегородкою камери, або під перегородками вибирається канавка для закладки матеріалу ущільнювача. Обробку трубних решіток здійснюють на карусельних, фрезерних і строгальних верстатах.

Після зовнішньої обробки заготівлю розмічають під свердління отворів для трубок, болтових з'єднань, анкерних і каркасних зв'язків. Для забезпечення співвісності отворів в трубних решітках і проміжних перегородках апарата отвори під трубки свердлять по кондуктору або пакетом, або на верстатах з

числовим програмним управлінням за спеціальною програмою. При свердлінні пакетом розмічають одну заготівлю, після чого решітки і перегородки збирають в пакет і стягують болтами. На радіально-свердлувальному верстаті виконують спочатку центрування (свердлом малого діаметру), а потім свердління і зенкування отворів інструментом необхідного діаметру.

#### 6.1.4 Зварювання теплообмінника

Сталеві елементи теплообмінних апаратів зварюють, як правило, методом зварювання електродугового (ручною, напівавтоматичною, автоматичною під флюсом, електрошлаковою, аргонодуговою).

Способи отримання зварних з'єднань, типи зварних швів, зварювальні матеріали (електроди, присадні матеріали, флюси, захисні гази) і режими зварювання регламентуються стандартами і вибираються при проектуванні теплообмінника і розробці технологічного процесу його виготовлення залежно від видів вживаних сталей, товщини зварюваних елементів, місць розташування зварних швів і умов роботи теплообмінного апарату. Зварювальні роботи проводяться на спеціально виділених ділянках, що мають зварювальне і допоміжне устаткування і зварювальників високої кваліфікації.

Якість зварних швів безпосередньо впливає на надійність теплообмінних апаратів і на безпеку їх експлуатації. Згідно з "Правилами" зварні шви посудин, що працюють під тиском, піддаються зовнішньому огляду і виміру, механічним випробуванням на контрольних зразках, вирізаних із зварних з'єднань, просвічуванню гамма променями, ультразвуком, дослідженню макро- і мікроструктури і гідравлічним випробуванням. Результати випробувань заносяться в паспорт посудини.

Зовнішньому огляду і виміру піддають усі зварні шви. Відповідно до ГОСТ 3242—79 при зовнішньому огляді звертають увагу на тріщини в шві і в околошовній зоні, які можуть з'явитися із-за нерівномірної усадки металу шва

при його твердінні. У зварному шві не повинно бути напливів, подрізів і пористості, а також відступів від форми і розмірів, заданих в кресленні.

Механічним випробуванням піддають зразки, вирізані при зварюванні листів з контрольних пластин, а при зварюванні труб - з контрольних стиків. Механічні випробування включають випробування на розтягування, на вигин або сплющення, а в деяких випадках - на ударну в'язкість. Результати випробувань вважаються незадовільними, якщо показники властивостей хоч одного із зразків виходять більш ніж на 10 % за межі, що допускаються.

Металографічні дослідження проводять у випадках, коли апарат призначений для роботи при температурі вище 450°C або при тиску більше 5 МПа. Їх проводять також в тих випадках, коли теплообмінник виготовляється з легованої сталі, схильної до підгартування. В процесі металографічного дослідження виявляють макро- і мікроскопічні дефекти зварного шва: непровари, тріщини, пори і шлакові включення, а також визначають макро- і мікроструктуру металу шва і зони термічного впливу зварювання. Зразок для металографічного дослідження вирізають з контрольної пластини або з контрольного стику упоперек вісі шва. Якщо металографічне дослідження дало незадовільні результати, апарат до експлуатації не допускається.

Контроль рентгено- або гама-просвічуванням повинні проходити зварні шви усіх посудин, що працюють під тиском. Залежно від тиску, під яким працюватиме посудина, і температури робочого середовища "Правила" встановлюють відсоток довжини зварних швів, що підлягають просвічуванню. Довжина ділянок швів, що підлягають просвічуванню, коливається в межах від 10 до 100 % повної довжини шва. Невеликі тріщини і непровари просвічуванням не виявляються, тому для їх виявлення краще перевіряти шов ультразвуком.

Усі дефекти зварних швів, що виходять за допустимі межі, вирубують, а місця вирубування заварюють. Після заварки дефектних місць зварний шов

повторно просвічують, або піддають контролю за допомогою проникаючих рідин або магнітопорошковим методом.

#### 6.1.5 Кріплення труб в трубних решітках

В якості обладнання для розвальцьовування труб можуть використовуватися машини і устаткування з електричними або пневматическими реверсируемими двигунами. У склад розвальцьовочного обладнання повинний входити пристрій обмеження крутного моменту, забезпечуючий автоматичну зупинку обертання розвальцьовочного інструмента при досягненні заданої величини крутного моменту. При виборі розвальцьовочного обладнання слід керуватися потребою величиною і точністю обмеження крутного моменту.

Розвальцьовочний інструмент призначений для розвальцьовування труб в трубних решітках.

Розвальцьовочний інструмент, що охолоджується, використовується при роботі з електричними розвальцьовочними машинами. Охолодження і змащення завишають стійкість інструмента і стабільність ступеню розвальцьовування. Крім того, застосування цього інструмента завишає продуктивність труда, так як відпадає необхідність замінювати інструмент через кожні декілька труб, щоб заподігти його перегріву.

Розвальцьовочний інструмент, що не охолоджується, з глибиною розвальцьовування, що регулюється використовується з пневматичними машинами.

Труби закріплюють в решітках найчастіше розвальцьовуванням, причому особливо міцне з'єднання (необхідне у разі роботи апарату при підвищених тисках) досягається при застосуванні в трубних решітках отворів з кільцевими канавками, які заповнюються металом труби в процесі її розвальцьовування. Крім того, використовують закріплення труб зварюванням, якщо матеріал труби не піддається витягу і допустиме жорстке з'єднання труб з трубними ґратами, а також пайкою, яка застосовується для з'єднання головним чином мідних і

латунних труб. Зрідка використовують з'єднання труб з решітками за допомогою сальників, що допускають вільне подовжнє переміщення труб і можливість їх швидкої заміни. Таке з'єднання дозволяє значно зменшити температурну деформацію труб, але є складним, дорогим і недостатньо надійним.

Роликове розвальцьовування вводять в трубу і її обертанням і осьовим переміщенням забезпечують деформацію труби до отримання з'єднання. Така схема призводить до об'ємного напруженого стану, в радіальному напрямі виникає напруження стискування, в двох інших напрямках - розтягування. Труба при розвальцьовуванні подовжується в осьовому напрямі до 15 % розвальцьовуваної довжини, і цей не завжди однаковий надлишок доводиться видаляти. Стоншування труби досягає 20 % (механічна запресовка). Труба на внутрішній поверхні зміцнюється, а в місці переходу розвальцьованої і неразвальцьованої частин утворюється концентратор напруження. Коливання властивостей і нерівномірність товщини труби служать джерелом інтенсивної корозії і вогнищем руйнувань.

## 6.2 Збирання трубчаткі

Найбільш трудомісткою операцією при виготовленні кожухотрубчастих теплообмінників є збирання трубчаток. решітках, як правило, проводять в спеціальних пристосуваннях, які строго фіксують положення трубних решіток. Якщо трубчатка складається з великого числа труб, під час збирання пристосування встановлюють вертикально, при малому числі труб - горизонтально. В трубних решітках при вертикальному положенні трубчаткі співвісність отворів, що протилежать один одному, перевіряють схилом. Під нижні решітки на відстані, рівній довжині виступаючих з решіток кінців труб, підкладають плоску плиту. Цим забезпечують рівне розташування труб над поверхнею нижніх решіток. Набір трубок ведуть від центру до периферії.



У тих випадках, коли конструкція теплообмінника передбачає з'єднання трубних решіток з кожухом до установки трубок, збирання ускладнюється внаслідок введення трубок в другі решітки з внутрішньої порожнини апарату. Набір трубок таких теплообмінників проводять в горизонтальному положенні із застосуванням попередньо встановлених шомполів.

Для правильного розподілу довгих тонких труб між трубними решітками встановлюють поперечні перегородки. Установку поперечних перегородок проводять до набору трубок.

Замість перегородок можуть бути використані кільцеві прокладки, які встановлюють і кріплять на трубках по концентричних колах у міру набору трубчаток.

### 6.3 Випробування після виготовлення

Мінімальну величину пробного тиску  $P_{пр}$  при гідравлічному випробуванні теплообмінника приймають:

$$P_{пр} = 1,25 \cdot P \frac{[\sigma]^{20}}{[\sigma]^t}$$

де  $P$  – розрахунковий тиск, МПа

$[\sigma]^{20}$  - допустиме напруження матеріалу апарата при 20°C, МПа

$[\sigma]^t$  - допустиме напруження матеріалу апарата при розрахунковій температурі, МПа

Гідравлічне випробування теплообмінника проводиться після всіх видів контролю, а також виправлення виявлених дефектів.

Гідравлічне випробування повинно проводитись водою з температурою не нижче 5 і не вище 40 °С.

Різниця температур металу і оточуючого повітря під час випробування не повинна викликати утворення вологи на поверхнях об'єкта випробувань.

При заповненні теплообмінника водою повинно бути вилучене повітря із внутрішніх порожнин. Тиск слід піднімати рівномірно до досягнення пробного.

Загальний час підняття тиску вказується в інструкції з монтажу і експлуатації теплообмінника; якщо такої вказівки в інструкції немає, то час підняття тиску повинен бути не менше 10 хв.

Тиск води при випробуванні повинен контролюватись двома манометрами, із яких один повинен бути класу точності не нижче 1,5.

Після утримання під пробним тиском тиск знижують до розрахункового, при якому проводять огляд зовнішньої поверхні теплообмінника, його зварних з'єднань.

Використання стиснутого повітря або газу для підняття тиску не допускається.

Теплообмінник вважається таким, що витримав випробування, якщо не буде виявлено видимих залишкових деформацій, тріщин або ознак розриву, протікання в зварних, роз'ємних з'єднаннях і в основному металі.

У вальцьованих і роз'ємних з'єднаннях допускається поява окремих крапель, які з витримкою часу не збільшуються за розмірами.

Після проведення гідравлічного випробування необхідно забезпечити видалення води.

Теплообмінник та його елементи, в яких під час і випробування виявлено дефекти, після їх виправлення підлягають випробування пробним тиском.

Приймання теплообмінника в експлуатацію проводиться після виконання всіх робіт, передбачених дефектною відомістю та проведення всіх видів випробування з позитивними результатами.

## 7 РЕМОНТ ПІДГРІВАЧА

### 7.1 Методи виконання планово-попереджувальних ремонтів

Організація ремонту і обслуговування теплообмінників здійснюється на підприємстві відповідно до графіку ППР.

#### Поточний ремонт

Ремонт дозволяється робити без звільнення від вмісту.

Перевіряються зовнішнім оглядом стан зовнішньої поверхні корпусу, кришки, штуцерів теплообмінника.

При виявленні дефектів теплообмінник звільняється від вмісту, складається акт на готовність до ремонту, дефекти усуваються.

При великих дефектах теплообмінник виводиться на середній ремонт достроково.

Перевірити, підтягнути і, при необхідності, замінити кріпильні деталі і прокладки.

Перевірити стан комунікацій. При необхідності зробити ремонт або заміну окремих ділянок трубопроводів. Замінити дефектні прокладки.

Арматуру перевірити на працездатність. Проводиться підтягування і перебивання сальників. Дефекти усуваються.

У теплообмінників, що мають запобіжні клапани, перевірити працездатність запобіжного клапану.

Провести перевірку затягування болтових з'єднань фланців комунікацій, арматури.

#### Капітальний ремонт

Капітальний ремонт проводиться при повністю звільненому теплообміннику, складається акт на готовність його до ремонту.

Капітальний ремонт теплообмінника полягає в повному розбиранні теплообмінника і включає усі вимоги середнього ремонту, а також ремонт або

заміну частин корпусу, кришок, трубних решіток, заміну дефектних труб, усієї трубчатки, ремонт або заміну замочної арматури, трубопроводів.

У теплообмінника, що має теплоізоляцію, робиться її ремонт або заміна при необхідності.

Проводиться зміна прокладок і усього зношеного кріплення.

Після збирання проводиться гідровипробування міжтрубного простору і трубчатки. Дефекти усуваються.

Усі роботи проводяться відповідно до дефектної відомості.

## 7.2 Розбирання підігрівача, виявлення і усунення дефектів

Розбирання підігрівача проводять в наступній послідовності:

- разболтити фланцеві з'єднання трубопроводів пари і початкової суміші;
- раз'єднати фланцеві з'єднання розподільної камери і корпусу;
- разболтити фланцеві з'єднання кришки і корпусу;

Вкрутити віджимні болти, застропити і зняти розподільну камеру, причому необхідно кантувати її горизонтальним роз'ємом вгору.

Потім вкрутити віджимні болти, застропити і зняти кришку, кантувати її горизонтальним роз'ємом вгору.

Далі слід зачистити ущільнюючі поверхні роз'ємів, виготовити і прографитити прокладки на горизонтальному роз'ємі розподільної камери і кришки і патрубках підведення-відведення пари і початкової суміші, викрутити шпильки, відкалібрувати і прографитити різьби кріплення.

Для корпусу характерні наступні дефекти:

- тріщини в зварних швах, наплавленнях, навколошовній зоні, основному металі;
- корозійні ураження основного металу, зварних швів і наплавлень у вигляді суцільної рівномірної або нерівномірної корозії, локальної корозії (виразки, питинги), міжкристалевої корозії;
- ерозійний знос;

- вм'ятини, випучини і інші деформації.

Виявлення дефектів корпусу включає: візуальний огляд, вимір залишкової товщини корпусу за допомогою ультразвукових дефектоскопів, шляхом мікрометрування і контрольного просвердлення отворів, перевірку на щільність зварних швів і роз'ємних з'єднань.

Залежно від виду і розміру дефектів застосовують два способи їхнього виправлення: заварку або наплавлення дефектної ділянки; заміну дефектної ділянки.

При ремонті корпусу зварні шви повинні бути доступними для контролю.

Зварні шви повинні розташовуватися поза опорами корпусу. При попаданні зварного шва на опору він має бути перевірений в об'ємі 100% ультразвуковим або радіаційним методом контролю на відсутність дефектів.

Не допускається перетинання зварних швів, виконаних при ремонті ручним дуговим зварюванням. Зварні шви мають бути зміщені по відношенню один до одного на величину, трикратної товщини стінки корпусу, але не менше чим на 100мм. Зварні шви корпусів апаратів, що піддаються термообробці, допускається перетинати зварними швами, що виконуються при ремонті.

Перед ремонтним зварюванням або наплавленням проводять контроль підготовленої поверхні на відсутність дефектів.

При установці на корпусах «латок», заміні аркушів, обичайок і днищ підготовку кромки під зварювання рекомендується проводити згідно вимогам креслення (паспорта) на корпус або за типом з'єднань, наведених в ГОСТ 5264—80.

Заміну обичайки або днища проводять за індивідуальною технологією. Дефектні обичайки заміняють цілою обичайкою або полистно. При полистовій зміні кожний аркуш винний бути звальцьований радіусом, рівним радіусу корпусу. Довжина ділянки, що вирізується, повинна бути не більше  $\frac{1}{5}$  довжини кола корпусу.

При вирізці ділянок більше  $\frac{1}{5}$  довжини окружності корпусу листову заміну обичайок вертикальних корпусів проводять із установкою зміцнювальних стійок.

Дефектні днища корпусу при неможливості їхнього виправлення на місці заміняють новими.

Після складання і зварювання в результаті заміни обичайок або днищ корпус апарата повинен задовольняти наступним вимогам: відхилення по довжині апарата не повинно перевищувати 0,3% номінальної довжини корпусу, але не більше  $\pm 75$ мм; непрямолінійність корпусу не повинна виходити за межі 2мм на довжині 1м, а по всій довжині корпусу - за межі 30мм при довжині корпусу більше 10м.

Штуцера підлягають заміні при наступних дефектах: тріщинах всіх видів і напрямків; корозії та ерозії; розшаруванні металу.

Заміну штуцерів виконують установкою нового штуцера із заміною зміцнювального кільця або ж без заміни зміцнювального кільця.

Новий штуцер повинний виготовлятися в умовах ремонтного цеху з дотриманням вимог стандартів і нормативно - технічної документації на виготовлення штуцерів.

### 7.3 Ремонт вузла кріплення труб до трубної решітки

Відмови теплообмінників відбуваються в основному із-за пропуску продукту через вальцьовальні з'єднання і із-за корозії труб трубного пучка.

Приховані дефекти теплообмінників встановлюють опресовуванням міжтрубного простору при відкритих з обох торців кришках. Зношену або лопнувшу трубу виявляють по появі в ній рідині опресовування, а нещільність в з'єднаннях кінців труб з трубними решітками - по рідині, що пропускають і запітнінню.

Дефектні трубки зазвичай заглушають з двох кінців металевими пробками, що мають невелику конусність (3 - 5°). Пробки забивають туго, щоб надійно протистояти максимальному тиску в трубках.

Число заглужених труб не повинно перевищувати 15% трубок в кожному потоці пучка; інакше значно зростає гідравлічний опір і помітно зменшується поверхня теплообміну.

При виході з ладу більше 15% трубок усі вони замінюються.

Заміна труб - складна операція, яка включає видалення дефектних труб, підготовку нових труб, кріплення нових труб в трубних решітках.

Труби видаляють з використанням оправки. Для цього зенкують (висвердлюють) трубу приблизно на 3/4 довжини развальцьованої частини, зменшуючи при цьому товщину її стінки. Після цього між трубою і внутрішньою поверхнею отвору решітки забивають спеціальне оправляння, яке деформує стінку труби. Потім оправлянням трубу вибивають з трубних решіток.

Для видалення приварених труб заздалегідь вирубують зварний шов вручну або спеціальною фрезою з приводом від гнучкого валу або переносного дреля.

Нові трубки, що вставляються, відрізають по довжині трубного пучка з надбавкою 8 - 10 мм довжини. Кінці трубок зачищають до металевого блиску на довжину, рівну товщині решітки з прибавкою 10 мм на сторону. У трубних решітках усі отвори зачищають від задирок, іржі і бруду. Наявність подовжніх рисок в отворах трубних решіток не допускається. Перед установкою трубок отвори в решітках продувають повітрям і досуха протирають. Трубки встановлюють в трубні решітки так, щоб їх кінці виступали на 3 - 5 мм від зовнішнього торця кожної решітки. Проміжок між зовнішнім діаметром трубки і отвором в решітках не повинен перевищувати 1,5 % діаметру трубки.

У трубних решітках кінці трубок кріпляться розвальцьовуванням або розвальцьовуванням з обварюванням.

Розвальцьовування є найбільш поширеним способом отримання міцних і герметичних з'єднань труб з трубними решітками теплообмінних апаратів. При вальцюванні відбувається пластична деформація труби.

Розвальцьовування трубок здійснюють за допомогою спеціального інструменту - вальцювання. Вальцювання складається з металевого конуса, патрона з пазами і циліндричних роликів. Під кожний розмір труби свій патрон.

В процесі розвальцьовування ролики виходять з пазів і збільшують діаметр труби.

Оскільки трубки при розвальцьовуванні подовжуються, спочатку розвальцьовують усі кінці трубок в одній решітці, а потім в іншій.

Порядок розвальцьовування трубок наступний: спочатку вальцюють чотири трубки хрест на хрест, потім усі трубки по периметру і далі інші.

При розвальцьовуванні можливі наступні дефекти:

- 1) відсутність характерного переходу між розвальцьованою і неразвальцьованою частинами труб;
- 2) надмірна довжина дзвоника або роздутий вихід труби за трубними решітками;
- 3) одностороннє витріщення трубки на виході з гнізда;
- 4) підрізи труби по кромках гнізда трубних решіток;
- 5) тріщини і розриви у вальцьованій частині труби або в дзвонику.

Зварювання труб з трубними решітками проводять тільки у поєднанні з розвальцьовуванням.



## 8 ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ

Хімічні виробництва характеризуються підвищеною небезпекою праці робітників, несуть потенційну небезпеку професійних отруєнь і захворювань, травматизму, забруднення довкілля та ін. Тому питанням охорони праці приділяється велика увага, вони спрямовані на забезпечення безпечних та здорових умов праці, безаварійної роботи устаткування, пожежної безпеки, тощо.

Для запобігання аваріям, неполадкам, нещасним випадкам і забезпечення нормальних умов праці необхідно дотримувати норми і вимоги технологічного регламенту, інструкцій по робочих місцях, інструкцій по охороні праці. Небезпечні чинники виробничих процесів:

1 Прорив горючого газу або легкозаймистої рідини через нещільність, що утворилася, в апаратах комунікаціях з подальшим загорянням або вибухом.

2 Утворення вибухонебезпечної газової суміші в апаратах і трубопроводах при попаданні кисню, повітря в систему при незадовільному продуванні комунікацій і апаратів азотом, а також при пропуску газу або пари легкозаймистої рідини в приміщення.

3 Отруєння тих, що працюють при контакті з токсичними речовинами, вживаними у виробничих процесах.

4 Хімічні опіки при попаданні агресивних речовин на шкіру.

5 Термічні опіки при попаданні пари, гарячого конденсату на шкіру, при зіткненні з гарячими поверхнями апаратів або трубопроводів, загорянні газу, що прорвався, або легкозаймистої рідини.

6 Обмороження при зіткненні із зрідженими газами.

7 Поразка електричним струмом при несправності електроустаткування.

8 Механічні травми при обслуговуванні і ремонті устаткування і трубопроводів з порушенням техніки безпеки.

9 Задуха від недовліку кисню при виконанні робіт в кабельних тунелях, колодязях, пріямках.

10 Шкідливі викиди в робочу зону та водоймища.

Ремонтно – монтажні роботи

Виведення в ремонт устаткування (або демонтаж при виключенні з схеми) здійснюється по письмовому розпорядженню начальника цеху. На підставі письмового розпорядження заступник начальника цеху встановлює і підписує порядок виведення устаткування в ремонт або посилається на відповідні розділи інструкції.

У об'єм робіт з підготовки устаткування до ремонту входить:

- зупинка об'єкту (устаткування, машин, комунікацій), відключення системи арматурою;
- скидання тиску, звільнення об'єкту від продукту, сировини;
- відключення електроенергії, зняття напруги на щитах, вивішування заборонних і попереджувальних плакатів, установка огорожувачів;
- від'єднання ремонтного об'єкту від комунікацій за допомогою заглушок;
- пропарювання, продування, провітрювання об'єкту і відповідне прибирання від продукту і сировини приміщення.

Якість підготовчих робіт визначається виконанням аналізу на вміст палих, отруйної, вибухонебезпечної пари або газів, яких повинно бути не більш за ГДК по санітарних нормах.

На арматурі, що відсікає ремонтне устаткування від того, що діє, вивішуються таблички, що забороняють її розтин, а арматуру що підлягає ремонту, позначають крейдою або фарбою.

Установка заглушок повинна проводитися силами ремонтної служби цеху, під керівництвом механіка або майстра цієї служби.

При установці заглушок ремонтною службою цеху механік (майстер) несе відповідальність за дотримання ремонтною службою правил техніки безпеки і пожежної безпеки при виконанні цієї роботи і за якість установки заглушок.

Перед проведенням ремонтних робіт, механік або майстер цеху проводить виконавцям інструктаж про порядок ведення робіт, дотриманням правил протипожежною і техніці безпеки, потім допускає до виконання ремонтних робіт по оформленому разом із застосуванням засобів захисту, вказаних в наряді.

Інструктаж робітником підрядних організацій про основні небезпеки і шкідливі виробничі чинники в даному цеху в об'ємі першого інструктажа проводить начальник зміни перед початком робіт.

Весь персонал має бути ознайомлений про місце і час проведення ремонтних робіт сторонньою організацією.

При виникненні пожежі або аварії, а так само в разі порушення технологічного режиму і появи небезпеки для оточуючого персоналу цеху повинен дати вказівку про припинення робіт підрядчиком і видалити їх з цеху або небезпечної зони.

Основні правила при роботі всередині апаратів, ємностей, колодязях

Проведення такого роду робіт вимагає письмового дозволу головного інженера, узгодження з органами пожежного нагляду, наявність акту огляду ємності й дотримання особливих заходів безпеки у відповідності зі спеціальною інструкцією, а саме:

- повністю відкриті лази й люки, забезпечення максимального повітрообміну;
- обов'язкове заземлення посудини;
- цілісність ізоляції токопроводів;
- неможливість зміни електродів при включеному струмі;

- наявність повного комплексу захисного одягу у зварника;
- після закінчення робіт перед закриттям посудини перевірити її

порожнечу й відсутність усередині сторонніх предметів.

Вогневі роботи дозволяється проводити тільки після виконання всіх підготовчих робіт і заходів, передбачених нарядом-допуском.

Напередодні для проведення вогневих робіт в пожежну частину прямує письмове сповіщення з вказівкою найменування цеху, номери корпусу, місця і характеру вогневих робіт.

Перед початком і періодично в процесі проведення робіт необхідно проводити аналізи стану повітряного середовища на місці робіт.

В разі підвищення змісту горючих речовин в небезпечній зоні, усередині апарату або трубопроводу вогневі роботи негайно припиняються. Ці роботи можуть бути відновлені тільки після виявлення і усунення причини загазованості і відновлення нормальної повітряної середовища.

Під час проведення вогневих робіт технологічним персоналом цеху мають бути прийняті заходи, що виключають виділення в повітряну середовищу вибухонебезпечних речовин.

При виконанні газонебезпечних робіт з вибухонебезпечними газами необхідно користуватися інструментами, що не дають іскр при ударі, а для освітлення застосовувати переносні електролампи з напругою 12 вольт у вибухозахищеному виконанні, мати засоби індивідуального захисту: протигази ПШ-1, ПШ-2.

#### Проведення робіт на висоті

Роботи на висоті більш 1,3 м повинні виконуватися із застосуванням приставних сходів, драбин, риштовання й лісів, що мають огороження або при обов'язковому застосуванні перевірених і випробуваних запобіжних поясів, якщо робота проводиться з необгороджених поверхонь.

Ліси й підмости допускаються до експлуатації тільки після технічного приймання їх по актах.

Підйом і спуск людей на ліси допускається тільки по сходах, закріпленим верхнім кінцем до поперечок лісів, що виключають можливість їх зсуву.

Скупчення на настилах людей в одному місці не допускається.

Одночасне провадження робіт на дві й більш ярусах по одній вертикалі без відповідних захисних козирків забороняється;

Під час грози й при вітрі силою 6 балів і більш роботу на лісах, а також їх монтаж і демонтаж слід припинити.

Для роботи на висоті застосовуються переносні сходи й драбини. Нижні кінці переносних сходів і драбин повинні мати обкуття з гострими наконечниками, а при користуванні ними на асфальтних, бетонних підлогах повинні мати черевики з гуми або іншого нековзного матеріалу.

Переносні дерев'яні сходи й розсувні сходи-драбини довжиною більш 3м повинні мати не менш 2-х металевих стяжних болтів, установлених під щаблями. Загальна довжина сходів не повинна перевищувати 5м і забезпечувати робітникові можливість робити роботу стоячи на щаблі, що перебуває на відстані не менш 1м від верхнього кінця сходів.

#### Проведення зварювальних і вогневих робіт

До вогневих робіт відносять виробничі операції, зв'язані із застосуванням відкритого вогню, нагріванням до температур, здатних викликати займання матеріалів.

На проведення вогневих робіт оформляється наряд-допуск, що передбачає розробку і подальше здійснення комплексу заходів щодо підготовки і безпечного проведення робіт, вказаний термін його дії, і тривалість проведення робіт, склад бригади, вимоги до робітників.

Відповідальним за підготовку об'єкту до проведення вогневої роботи призначається інженерний – технічний працівник цеху (як правило, начальник зміни), у веденні якого знаходиться експлуатаційний персонал даного об'єкту.

Відповідальний за проведення вогневих робіт зобов'язаний:

- перевірити у виконавців наявність і справність засобів індивідуального захисту, інструменту і пристосувань, їх відповідність виконуваний роботі, наявність посвідчень і талонів – попереджень;

- проводити інструктаж виконавців про правила безпечного ведення робіт;

- забезпечити місце проведення робіт первинними засобами пожежогасінні.

Виконавці вогневих робіт несуть відповідальність за виконання всіх мерів безпеки, передбачених в наряді – допуску.

Якщо вогневі роботи проводяться усередині ємкості, то вони вимагають письмового дозволу головного інженера, узгодженого з органами пожежної охорони, наявність акту огляду ємності і дотримання особливих заходів безпеки згідно спеціальної інструкції. До таких заходів відносять забезпечення максимального повітрообміну, заземлення ємності, цілісність ізоляції токопроводов, наявність повного комплекту захисного одягу, неможливість зміни електродів при включеній напрузі.

Для проведення робіт усередині ємкостей повинна призначатися бригада в складі не менш 2-х чоловік (працівник, спостережник). Газонебезпечні роботи усередині ємкостей проводяться при постійній присутності газорятівного. Перебування усередині ємкостей допускається, як правило, одній людині. При необхідності перебування в ємності більшого числа працівників мають бути розроблені, внесені до наряду-допуску і додатково здійснені заходи безпеки, що передбачають призначення що не менш одного спостерігаючого персонально на того, що одного працює в апараті, порядок входу і евакуації працівників, порядок розміщення шлангів, забірних патрубків протигазів, сигнально-рятувальних вірьовок, наявність засобів зв'язку і сигналізації на місці проведення робіт.

У всіх випадках на працівника, що спускається в ємність, має бути надітий рятувальний пояс з сигнально-рятувальним мотузком.

### Основні правила з електробезпеки

Експлуатація електроустаткування повинна проводитися відповідно до "Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів" і "Правил улаштування електроустановок" (ПУЕ).

Не дозволяється включати електродвигуни і агрегати без попередньої перевірки наявності надійного заземлення.

Включення і відключення електродвигунів здійснюється в діелектричних рукавичках, стоячи на ізолюючій підставі.

Заміну згорілих запобіжників робити при знятій напрузі в діелектричних рукавичках, стоячи на ізолюючій підставі і в окулярах.

Забороняється робити заміну ламп і освітлювальної арматур під напругою.

Електротехнічні роботи в цеху можуть проводитися тільки з дозволу начальника цеху, майстра зміни, енергетика цеху і під спостереженням останнього.

Всі металеві частини електроустаткування і електроустановок, які можуть опинитися під напругою внаслідок напруги ізоляції, мають бути заземлені.

Включення електрозварювального апарата в мережу і його відключення, повинно впровадитися тільки черговим електриком після ретельного огляду агрегату, проводів і заземлення.

Кожен робітник повинен пам'ятати, що електричний струм небезпечний для життя. Сила струму 0,1 А - смертельна для людини.

Для забезпечення електробезпечності застосовують окремо або в поєднанні наступні технічні способи і засоби: захисне заземлення, занулення, захисне відключення, вирівнювання потенціалів, мала напруга, ізоляція струмоведучих частин, електричний поділ мереж, огорожувальні пристрої, блокування, попереджувальна сигналізація, знаки безпеки, попереджувальні плакати, електрозахисні засоби.

## ВИСНОВКИ

В даному дипломному проекті розглянуто установку ректифікації суміші бензол–толуол продуктивністю 5,5 т/год. з розробкою підігрівача:

- а) На основі аналітичного огляду вибрана конструкція підігрівача, розміри якого отримані з технологічного розрахунку.
- б) Виходячи з умов роботи і характеристик робочого середовища підібрані конструкційні матеріали;
- в) Роботоспроможність підігрівача підтверджена розрахунками на міцність, які виконані згідно з діючою в хімічному машинобудуванні нормативно-технічною документацією;
- г) Розглянуті питання технології виготовлення підігрівача, його монтаж і ремонт;
- д) Висвітлені питання техніки безпеки.



## СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- 1 Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. – Л.: Химия, 1987. – 576с.
- 2 Справочник химика, т. 5. – М.: Химия, 1968. – 975 с.
- 3 Отраслевой стандарт (Ост 26-01-1488-83).
- 4 Борисов Г.С., Брыков В.П., Дытнерский Ю.И. и др. Под ред. Дытнерского Ю.И. Основные процессы и аппараты химической технологии, 2-е изд., перераб. И дополн. – М.: Химия, 1991. – 496 с.
- 5 Коган В.Б., Фридман В.М, Кафаров В.В. Равновесие между жидкостью и паром. Справочное пособие, книга 1-я и 2-я. – М.-Л.: Наука, 1966. – 640 с. + 786 с.
- 6 Плановский А.Н., Рамм В.М., Каган С.З. Процессы и аппараты химической технологии, 4-е изд. – М.: Химия, 1967. – 848 с.
- 7 Романков П.Г., Курочкина М.И. Расчетные диаграммы и номограммы по курсу «Процессы и аппараты химической промышленности». – Л.: Химия, 1985. – 54 с.
- 8 Чернышев А.К., Коптелов В.Г., Листов В.В., Заичко Н.Д. Основные теплофизические свойства газов и жидкостей. Номографический справочник. – Кемеровское изд-во, 1971. – 225 с.
- 9 Дытнерский Ю.И. и др. Колонные аппараты. Каталог/ Под ред. Дытнерского Ю.И., 2-е изд-во. – М.: ЦИНИНЕФТЕХИММАШ, 1978. – С. 220.  
Плановский А.Н., Николаев П.И. Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии, 3-е изд. – М.: Химия, 1987. – 496 с.
- 10 Вихман Г.Л., Круглов С.А. Основы конструирования аппаратов и машин нефтеперерабатывающих заводов. «Машиностроение», 1978 г. 326 с.
- 11 Аппараты теплообменные кожухотрубчатые общего назначения. Аппараты теплообменные кожухотрубчатые с неподвижными трубными решетками и кожухотрубчатые с температурным компенсатором на кожухе. Каталог. М.: АООТ «ВНИИнефтемаш». 2001.–.70 с.

12 Машины и аппараты химических производств: Учебник для вузов по специальности “Машины и аппараты химических производств и предприятий строительных материалов”./ И.И. Поникаров и др. – М.: Машиностроение, 1989. – 368 с.

13 Лашинский А. А., Толчинский А. Р. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры. – М.: Машиностроение, 1970. –752с.

14 Кожухотрубчатые теплообменные аппараты общего и специального назначения. Каталог. М.: ЦИНТИхимнефтемаш”. 1991.–.108 с.

15 ТУ 3612-024-00220302-02. Аппараты теплообменные кожухотрубчатые с неподвижными трубными решетками и кожухотрубчатые с температурным компенсатором на кожухе. Технические условия. М.: АООТ “ВНИИнефтемаш”. 2002.–.145 с.

16 Методические указания к выбору конструкционных материалов для стальных сварных сосудов и аппаратов для студентов специальности 7.090220/ Сост. А.И. Барвин, И.М. Генкина, В.В. Иванченко, Д.А. Куликов, В.Г. Табунщиков, Ю.Н. Штонда. – Северодонецк, СТИ, 2003. – 41 с.

17 ТУ 26-02-1102-89. Аппараты теплообменные кожухотрубчатые повышенной тепловой эффективности с расширителем на кожухе. Технические условия. М.: АООТ “ВНИИнефтемаш”, 1989.–.48 с.

18 ОСТ 26-01-1512-76. Компенсаторы линзовые осевые на  $P_y=2,5$  МПа. Технические требования.

19 ГСТУ 3-071-2004. Апарати кожухотрубчасті теплообмінні та повітряного охолодження. Кріплення труб в трубних решітках.

20 СОУ МПП 71.120-217:2009. Посудини та апарати сталвні зварні. Загальні технічні умови.

21 А.И. Барвин и др. Методические указания к расчету цилиндрических обечаек стальных сварных сосудов и аппаратов для студентов специальности 7.090220. Северодонецк, 2002.– 83 с.

- 22 О.І. Барвін та ін. Конструювання і розрахунок сталевих зварних посудин та апаратів. Фланцеві з'єднання. – Луганськ: Вид-во Східноукр. нац. ун-ту імені Володимира Даля, 2007. – 306 с
- 23 А.И. Барвин и др. Расчет выпуклых и плоских днищ и крышек, конических обечаек, днищ и переходов стальных сварных сосудов и аппаратов. Методика и примеры расчета– Северодонецк, СТИ, 2003. – 122 с.
- 24 Емкостные стальные сварные аппараты. Каталог. - М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1982. - 76 с.
- 25 В.В. Іванченко, О.І Барвін, Ю.М Штонда Конструювання та розрахунок кожухотрубчастих теплообмінних апаратів: – Луганськ: Вид-во СНУ ім. В. Даля. – 2006. – 208 с.
- 26 Конструирование безопасных аппаратов для химических и нефтехимических производств /Г.Г. Смирнов, А.Р. Толчинский, Т.Ф. Кондратьева; Под общ. ред. А.Р. Толчинского –Л.: Машиностроение. 1988.– 303 с.
- 27 Ермаков В.И., Шеин В.С. Ремонт и монтаж химического оборудования: Учебное пособие для вузов. – Л.: Химия, 1981. – 368 с.
- 28 Жидецький В.Ц., Джигирей В.С., Мельников О.В. Основи охорони праці. - Вид.5-е, доп.-Львів:Афіша, 2002.-350с.