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

Кафедра хімічної інженерії

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри

_____
підпис, дата

Кваліфікаційна робота бакалавра

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

Тема роботи: Ректифікаційна установка для розділення суміші бензол – толуол. Розробити ректифікаційну колону з ситчастими тарілками

Виконав:
студент групи ХМ-91/3кі-1
Ковальчук Єгор Геннадійович

_____
підпис

Залікова книжка
№_____

Кваліфікаційна робота бакалавра
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою _____

"___" _____ 20___ р.

Керівник:
канд. техн. наук, доцент
Острога Руслан Олексійович

_____
підпис, дата

Підпис голови
(заступника голови) комісії _____

СУМИ 2023

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

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

Курс 4 Група ХМ-91/3кі-1 Семестр 8

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Студенту Ковальчуку Єгору Геннадійовичу

1 Тема роботи: Ректифікаційна установка для розділення суміші бензол – толуол. Розробити ректифікаційну колону з ситчастими тарілками

2 Вихідні дані: Розробити тарілчасту ректифікаційну колону для розділення бінарної суміші (бензол і толуол) продуктивністю 4200 кг/год. Вміст ЛЛК (% мол.): у початковій суміші – 30; у дистиляті – 94; у кубовому залишку – 5. Тарілки – ситчасті. Тиск у колоні становить 0,1 МПа.
Питання до розділу «Охорона праці»: Класифікація приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом.

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

1. Технологічна схема ректифікаційної установки – 0,5 арк.
2. Складальний кресленик ректифікаційної колони – 1,0 арк.
3. Складальний кресленик тарілки ситчастої – 1,0 арк.
4. Складальний кресленик кришки – 0,5 арк.

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

5 Етапи виконання кваліфікаційної роботи:

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

6 Дата видачі завдання жовтень 2022 р.

Керівник _____ к.т.н. Острога Р.О.
підпис

Зміст

	С.
Вступ	5
1 Технологічна частина	6
1.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки	6
1.2 Теоретичні основи процесів ректифікації	8
1.3 Опис тарілчастої ректифікаційної колони та вибір основних конструкційних матеріалів для її виготовлення	12
2 Технологічні розрахунки процесу і апарату	16
2.1 Технологічні розрахунки	16
2.2 Конструктивні розрахунки	22
2.3 Гідравлічні розрахунки	26
2.4 Вибір допоміжного обладнання	35
3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність	36
3.1 Визначення товщини циліндричної обичайки та кришки	36
3.2 Розрахунок опори апарату	39
4 Монтаж та ремонт апарату	41
4.1 Монтаж тарілчастої ректифікаційної колони	41
4.2 Ремонт основних вузлів ректифікаційної колони	44
5 Охорона праці	47
Література	51
Додаток А – Побудова рівноважної і робочих ліній на х – у діаграмі	
Додаток Б – Специфікації до графічної частини	

Вступ [1]

Процес ректифікації є одним з ключових процесів в хімічній технології, використовуваних для розділення бінарних сумішей. Він заснований на принципі фракційного перегону, що використовується для розділення рідини або рідинної суміші на її компоненти з різними температурами кипіння.

Основна мета ректифікації полягає в розділенні бінарної або багатокомпонентної суміші на компоненти з високою чистотою або певною концентрацією. Цей процес використовується у різних промислових галузях, таких як нафтопереробка, хімічне виробництво, фармацевтика та інші, де важливо отримати чисті речовини для подальшого використання.

У процесі ректифікації бінарна суміш піддається повторному перегону у ректифікаційній колоні, де відбувається процес фракційного перегону. Бензол і толуол – це дві різні хімічні сполуки, які можна розділити за допомогою їх різниці в температурі кипіння. Під час підйому по колоні, бензол і толуол взаємодіють з рефлюксом. Оскільки бензол має нижчу температуру кипіння (80,1°C), ніж толуол (110,6°C), він швидше конденсується. Тимчасово більша концентрація толуолу в парах утворюється ближче до верхньої частини колони.

Ректифікаційна колона є ключовим елементом у процесі ректифікації. Вона зазвичай має вертикальну конструкцію і складається з двох основних частин: дистиляційної та ректифікаційної секцій. Основне призначення ректифікаційної колони полягає у створенні оптимальних умов для контакту між парою і рідиною, що перебувають у протилежних напрямках. Колона забезпечує взаємодію компонентів суміші і дозволяє їм розподілятися між газовою та рідиною фазами залежно від їх різниці у фізичних властивостях, зокрема температурі кипіння.

У результаті виконання даного кваліфікаційного проекту отримано теоретичні навички в області розрахунків і проєктування ректифікаційної колони. Загалом, робота виконувалась у відповідності до методичних вказівок [2] та відповідає всім нормативним вимогам.

1 Технологічна частина

1.1 Опис технологічної схеми ректифікаційної установки

Технологічну схему ректифікаційної установки для розділення банарної суміші (бензол і толуол) наведено на рис. 1.1.

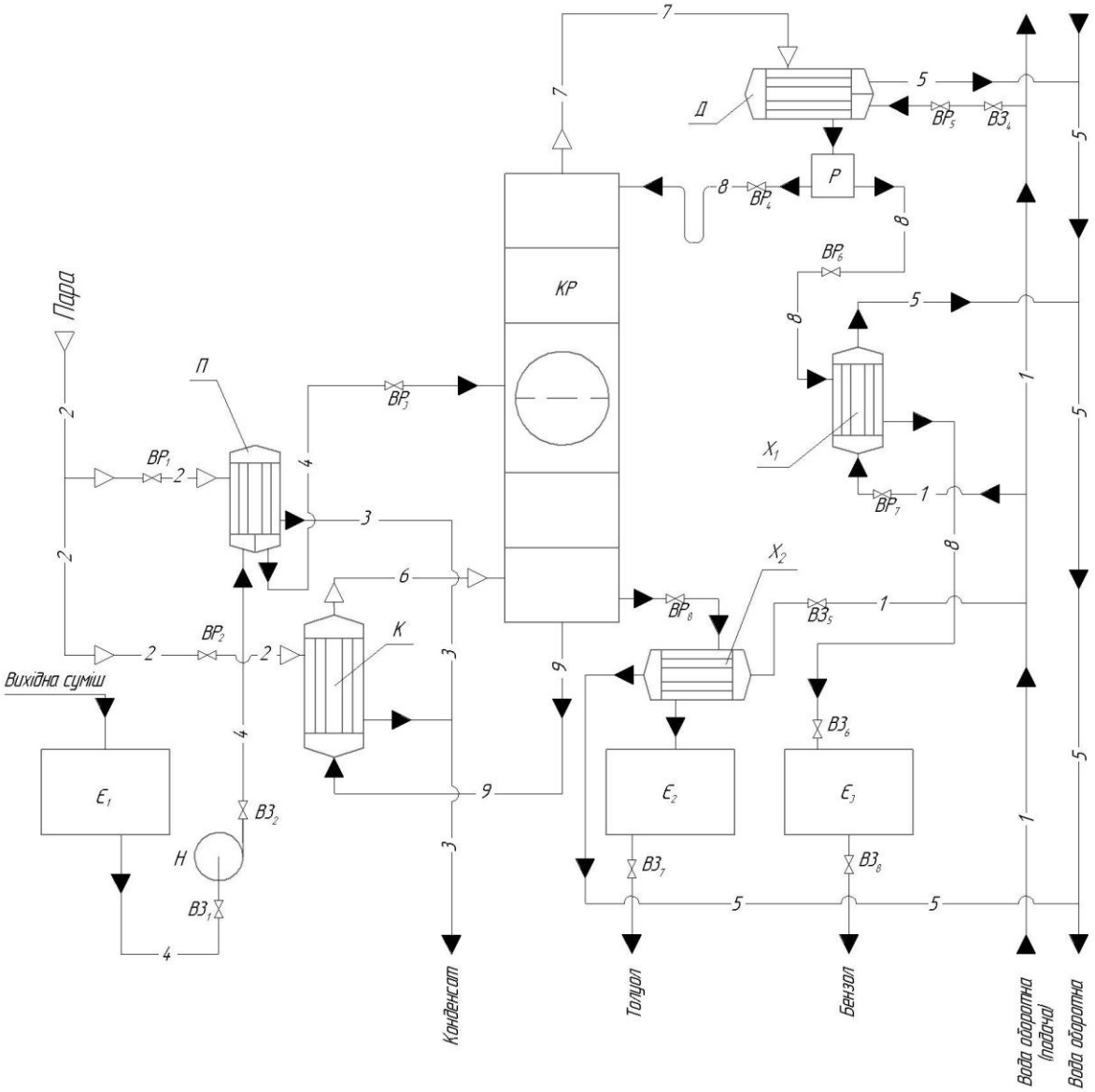

Рисунок 1.1 – Технологічна схема ректифікаційної установки для розділення банарної суміші (бензол і толуол): $Є_1$, $Є_2$, $Є_3$ – ємність рефлюксна; Н – відцентровий насос; П – підігрівач; К – кип’ятильник; КР – колона ректифікаційна; $Х_1$, $Х_2$ – холодильник; Д – дефлегматор; Р – розподілювач

Робота даної установки ґрунтується на такому принципі функціонування. Початкова бінарна суміш бензол – толуол з проміжної ємності $Є_1$ безперервно подається до теплообмінника-підігрівача П за допомогою відцентрового насосу Н. У теплообміннику суміш підігрівається до температури початку кипіння. Температура вихідної суміші після підігріву вимірюється за допомогою термометра. Після підігріву нагріта суміш подається до ректифікаційної колони КР для подальшого розділення.

У ректифікаційній колоні КР відбувається процес розділення компонентів суміші. Рідина знизу колони стікає в кип'ятильник К, де під дією тепла насиченої водяної пари вона вскипає. Утворений конденсат гріючої пари відводиться в систему каналізації. Регулювання витрати гріючої пари здійснюється за допомогою вентиля, а тиск контролюється за допомогою манометра. Залишкова рідина проходить через холодильник $Х_2$, де вона охолоджується і потім накопичується в збірнику кубового залишку $Є_2$.

Таким чином, ця установка забезпечує безперервний процес ректифікації, де постійно подається початкова бінарна суміш, яка піддається підігріву та розділенню в колоні. Контроль над температурою, тиском і витратою гріючої пари дозволяє ефективно керувати процесом ректифікації для досягнення бажаної чистоти розділення.

Зі зміцнюючої частини колони пара, яка містить більшу кількість низькокиплячого компонента, подається до дефлегматора Д, який охолоджується за допомогою води. Витрата води контролюється за допомогою ротаметра, а температура води на вході і виході вимірюється за допомогою термометрів. Рідина, яка повністю конденсується з пари в дефлегматорі Д, розділяється на дві частини. Перша частина, відома як флегма, подається для зрошування верхньої частини колони, а друга частина, яка є готовим продуктом, відбирається як дистилят і потрапляє до збірника дистиляту ЄЗ.

Головними параметрами, які можна регулювати, є:

1. Склад рідини у верхній і нижній частині колони.
2. Витрата і температура початкової суміші.

3. Тиск у верхній частині колони.

4. Температура і рівень рідини в кубі.

Для стабілізації складу рідини у верхній частині колони, використовується регулювання витрати флегми, а у нижній частині – відповідно витрати гріючої пари.

Ректифікаційна установка, яка здійснює розділення бінарної суміші, є невід'ємною частиною виробництва, оскільки отримані продукти розділення, такі як бензол і толуол, широко використовуються у промисловості.

1.2 Теоретичні основи процесів ректифікації [3–6]

Процес масопередачі має глибоку залежність від структури турбулентного потоку в кожній фазі. Під впливом турбулентного руху, навколо твердої стінки утворюється ламінарний прикордонний шар. Аналогічно, у кожній фазі можна виділити ядро (основну масу фази) та прикордонний шар біля межі фаз. В ядрі речовина переноситься переважно за допомогою турбулентних пульсацій, і концентрація розподілюваної речовини у ядрі залишається практично постійною. У прикордонному шарі відбувається поступове приглушення турбулентності, що проявляється різким змінюванням концентрації по мірі наближення до поверхні розділення. Прямо біля поверхні перенесення значно уповільнюється, оскільки його швидкість вже визначається швидкістю молекулярної дифузії. У цій області спостерігається найбільш різке, практично лінійне, змінювання концентрації аж до межі розділення фаз.

Таку зміну концентрацій можна пояснити гальмуючим впливом сил тертя між фазами та сил поверхневого натягу на межі рідкої фази. Ці сили впливають на зміну концентрації розподільної речовини під час масоперенесення, аналогічно до зміни температури біля твердої стінки під час теплопередачі.

Отже, під час турбулентного руху в ядрі фазового потоку перенесення до межі розділення фаз відбувається одночасно за допомогою молекулярної та турбулентної дифузії, причому основна маса речовини переноситься за

допомогою турбулентної дифузії. У прикордонному шарі швидкість перенесення обмежується швидкістю молекулярної дифузії. Тому, для підвищення інтенсивності масоперенесення бажано зменшувати товщину прикордонного шару, збільшуючи ступінь турбулентності потоку, наприклад, шляхом збільшення (до певної межі) швидкості фази.

Механізм масовіддачі включає поєднання молекулярного і конвективного перенесення. Процес масоперенесення, що відбувається на межі розділення фаз, ще більш складний і включає в себе обидві сторони цієї межі. У зв'язку з цим було запропоновано різноманітні теоретичні моделі, які у певній мірі спрощують механізм масоперенесення.

Більшість моделей базуються на наступних припущеннях:

1. Загальний опір перенесенню між фазами складається з опору кожної фази і опору поверхні розділення фаз. Проте в багатьох випадках можна вважати, що опір на поверхні розділення фаз дорівнює нулю. Таким чином, якщо вважати, що процес перенесення в кожній фазі відбувається незалежно від іншої, то загальний опір перенесення можна розглядати як суму опорів кожної фази.
2. На поверхні розділення фаз встановлюється рівновага, при цьому рівновага на межі фаз встановлюється значно швидше, ніж зміна середньої концентрації в ядрі фази.

Ці припущення утворюють основу більшості моделей, які допомагають у розумінні та спрощеному описі механізму масоперенесення. Використовуючи ці моделі, можна отримати більш глибоке розуміння процесів, які відбуваються під час масоперенесення у системах розділення фаз.

За плівковою моделлю, швидкість перенесення речовини q через одиницю площі за одиницю часу залежить від різниці концентрацій між ядром і межею фаз, коли перенесення відбувається від ядра до поверхні розділення фаз:

$$q = \frac{D}{\delta_{ЕФ}} \cdot \left(c_0 - c_{ГР}\right), \qquad (1.1)$$

де c_0 і $c_{ГР}$ – відповідно середня концентрація в ядрі фази і концентрація на межі поділу фаз;

$\delta_{ЕФ}$ – «ефективна» товщина прикордонної плівки.

У випадку перенесення речовини через поверхню розділення в протилежному напрямку, величина q пропорційна відмінності концентрацій між кордоном і ядром фази.

У рівнянні (1.1), коефіцієнт $D/\delta_{ЕФ}$ відображає швидкість масовіддачі, а величина $\delta_{ЕФ}$ представляє товщину прикордонного шару, який має опір, еквівалентний опору, що виникає від молекулярної дифузії, але в дійсності обумовлений конвективною дифузією. У плівковій моделі значно спрощено гідродинамічні умови поблизу кордону розділення фаз, де турбулентність поступово згасає. Через це більшість експериментальних даних не підтверджують залежність $q \sim D$, як це випливає з рівняння (1.1), якщо вважати, що величина $\delta_{ЕФ}$ не залежить від D. Крім того, ефективні товщини плівок практично неможливо розрахувати або виміряти.

Матеріальний баланс ректифікаціної колони за потоками:

$$G_F=G_D+G_W; \tag{1.2}$$

Матеріальний баланс ректифікаціної колони за легколетючим компонентом:

$$G_F\, x_F = G_D\, x_D + G_W\, x_W, \tag{1.3}$$

де G_F, G_D, G_W – масові або мольні витрати живлення, дистиляту та кубового залишку відповідно;

x_F, x_D, x_W – вміст легколетучего компонента в живленні, дистиляті і кубовому залишку відповідно.

Тепловой баланс ректификационной колонны.

Прихід тепла: з теплоносієм в кип’ятильнику Q_K; з вихідною сумішшю Q_F; з флегмою $Q_Ф$.

Витрата тепла: з парами, які надходять з колони в дефлегматор Q_G; із залишком Q_W; втрати в навколишнє середовище $Q_{ВТР}$.

Таким чином, рівняння теплового балансу запишеться як:

$$Q_K + Q_F + Q_Ф = Q_G + Q_W + Q_{ВТР}. \quad (1.4)$$

При роботі колони в адіабатичних умовах і рівності молярних теплот випаровування компонентів в кожному перетині зміцнючої частини (вище введення живлення) концентрація ЛЛК в парі пов'язана з його концентрацією в рідині рівнянням (робоча лінія):

$$y = x\frac{R}{R+1} + \frac{x}{R+1}, \quad (1.5)$$

де $R = Ф / D$ – флегмове число.

Рівняння робочої лінії для вичерпної частини колони (нижче введення живлення):

$$y = x\frac{R+f}{R+1} + x_W\frac{1-f}{R+1}, \quad (1.6)$$

де $f = F / D$.

Залежність між граничними, або рівноважними, концентраціями розподілюваної речовини в фазах зображується графічно і називається рівноважною лінією. Для аналізу роботи колони, розрахунку складу дистиляту і залишку, а також вивчення розподілу концентрацій леткоплавких компонентів по висоті апарату, використовують концепцію теоретичних ступенів поділу або теоретичних тарілок. Кожна така ступінь (тарілка) відповідає уявному сегменту апарату, де рідина і пара знаходяться в рівновазі. Число теоретичних тарілок, необхідне для отримання дистиляту і залишку з певним заданим складом, можна визначити графічно за допомогою діаграми у – х, яка описує залежність між рівноважними молярними концентраціями парової фаз.

1.3 Опис тарілчастої ректифікаційної колони та вибір основних конструкційних матеріалів для її виготовлення

Тарілчасті колони використовуються для досягнення високої продуктивності, обробки широкого спектру змін у фазі газу і рідини, а також забезпечують ефективне розділення сумішей. Однак, ці апарати мають певний недолік - високий гідравлічний опір. Утім, в контексті ректифікації цей фактор не має вирішального значення, оскільки збільшення гідравлічного опору впливає лише на підвищення тиску і, відповідно, температури кипіння рідини у кип'ятильнику колони.

Проєктований апарат (див. рис. 1.2, а) має конструктивну будову, що включає циліндричну оболонку. До неї прикріплені еліптична кришка і еліптичне днище за допомогою фланцевого з’єднання і зварювання. Усередині корпусу, в горизонтальному положенні, розміщені контактні пристрої у формі ситчастих тарілок. Ці тарілки відіграють важливу роль, створюючи направлений потік фаз та забезпечуючи повторну взаємодію між рідиною і парою.

У порівнянні з ковпачковими, ситчасті тарілки мають більшу продуктивність, проте їх робочий діапазон не перевищує 2,5. Металоємність цих тарілок становить 50–65 кг/м^2. Важливою характеристикою ситчастих тарілок є їх чутливість до горизонтального розташування, а також вони не рекомендуються для використання у забруднених або смолистих середовищах, оскільки це може призвести до забивання отворів.

Ситчасті тарілки зі зливним пристроєм (див. рис. 1.2, б) застосовуються у колонних апаратах з діаметром від 400 до 4000 мм, при відстані між тарілками від 200 мм і більше. Основним елементом таких тарілок є металевий диск з отворами діаметром від 2 до 6 мм, які розташовані по вершинах рівносторонніх трикутників.

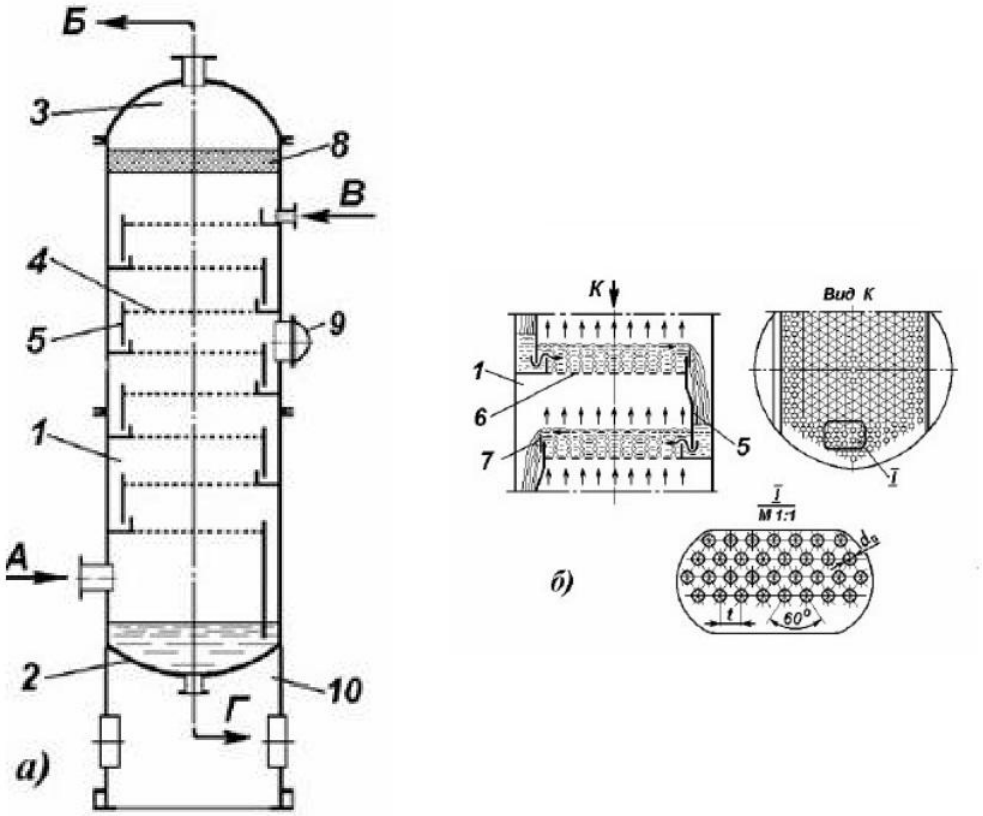

Рисунок 1.2 – Ескіз ректифікаційної колони (а) та принцип роботи ситчастої тарілки (б): 1 – корпус; 2 – днище; 3 – кришка; 4 – ситчаста тарілка; 5 – переливна стінка; 6 – полотно тарілки; 7 – переливна планка; 8 – бризковловлювач; 9 – люк-лаз; 10 – циліндрична опора

У випадку колон діаметром понад 800 мм, ситчасті тарілки складаються з окремих секцій. Зв’язок між секціями тарілок і кріпленням до корпусу та пристрою переливів у таких колонах аналогічний апаратам з ковпачковими і клапанними тарілками. Основною перевагою ситчастих тарілок є великий вільний перетин тарілки (тобто часnbyf, яка зайнята отворами), що забезпечує високу продуктивність для парової фази. Виготовлення цих тарілок просте, а їх металоємність невелика.

На колоні передбачені технологічні штуцери, які використовуються для з’єднання апарату з технологічними трубопроводами та підключення до технологічної лінії. Також на нижній частині корпусу колони присутня циліндрична опора, яка має лапи для кріплення до фундаменту.

Хімічні апарати повинні відповідати низці основних вимог, що включають механічну надійність, довговічність, конструктивну досконаліть, простоту виготовлення, зручність транспортування, монтажу та експлуатації [7].

Механічна надійність вимагає, щоб апарати були здатні витримувати механічні навантаження, тиску, вібрації та інші динамічні сили, забезпечуючи безпечну та стійку роботу протягом тривалого часу. Довговічність передбачає, щоб апарати були стійкими до зносу, корозії, дії агресивних речовин або високих температур, та могли функціонувати без значних пошкоджень або втрат ефективності протягом тривалого періоду часу [8].

Конструктивна досконаліть означає, що апарати повинні мати оптимальну конструкцію, враховуючи потреби процесу, забезпечуючи ефективність, надійність та легкість обслуговування. Простота виготовлення забезпечує швидке та ефективне виготовлення апаратів, знижуючи витрати та час. Зручність транспортування, монтажу та експлуатації вимагає, щоб апарати були зручними для переміщення, установки та обслуговування, забезпечуючи зручний доступ до елементів для ремонту та інші операції [8].

Ці вимоги допомагають забезпечити ефективну та безпечну роботу хімічних апаратів, що є важливими в промислових процесах та забезпечують ефективне функціонування хімічних систем.

Ми проводемо вибір конструкційних матеріалів для виготовлення складових колони, звертаючи увагу на робочу температуру, агресивність середовища та робочий тиск. Із урахуванням цих параметрів обираємо сталь 16ГС, яка відноситься до класу низьколегованих сталей і поставляється у вигляді листової сталі. Вона відрізняється підвищеною міцністю і ударною в’язкістю в широкому діапазоні температур. Цей матеріал легко деформується як у гарячому, так і у холодному стані, і його легко піддавати різанню. Він також добре зварюється будь-якими методами зварювання. Проте через високу в’язкість він менш придатний для механічної обробки. Крім того, сталь 16ГС може бути нестійкою у деяких агресивних середовищах [9].

Такий вибір матеріалу забезпечує необхідну міцність колони, стійкість до ударів та високу термостабільність в широкому діапазоні температур.

Сталь Ст3 є вуглецевою конструкційною сталлю стандартної якості. Вона застосовується для виготовлення несучих елементів зварних і незварних конструкцій, які працюють при плюсових температурах. Сталь Ст3 має хороші зварювальні властивості для всіх видів зварювання і не схильна до відпускної крихкості.

Сталь 35Х є легованою конструкційною сталлю. Вона використовується для виготовлення осей, валів, шестерень та інших деталей, які потребують покращених характеристик. Зварювання сталі 35Х обмежене, і вона схильна до відпускної крихкості.

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

Використання пароніту для прокладок має декілька важливих переваг. По-перше, азбестова основа надає пароніту високу стійкість до впливу різних хімічних речовин, включаючи розчинники, мастила та кислоти. Це дозволяє забезпечити ефективне ущільнення фланцевих з'єднань навіть у вимогливих середовищах. Прокладки з пароніту є легкими у виготовленні, мають високу міцність та довговічність. Вони також добре витримують високі температури і не піддаються значному стиску при стисканні між фланцями.

Враховуючи ці переваги, використання пароніту являє собою оптимальний вибір для виготовлення неметалевих прокладок, необхідних для ущільнення роз'ємів фланцевих з'єднань апарата.

2 Технологічні розрахунки процесу і апарату

2.1 Технологічні розрахунки [3, 6]

Переведемо молярні частки легколеткого компоненту в масові:

$$\overline{x_f} = x_f \cdot \frac{M_{ллк}}{M_f}; \quad (2.1)$$

$$\overline{x_D} = x_D \cdot \frac{M_{ллк}}{M_D}; \quad (2.2)$$

$$\overline{x_W} = x_W \cdot \frac{M_{ллк}}{M_W}; \quad (2.3)$$

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

де $M_f = 78 \cdot 0,3 + 92 \cdot (1 - 0,3) = 87,8$ кг/кмоль

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

$M_D = 78 \cdot 0,94 + 92 \cdot (1 - 0,94) = 78,8$ кг/кмоль

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

$M_W = 78 \cdot 0,05 + 92 \cdot (1 - 0,05) = 91,3$ кг/кмоль

$M_{ллк}$=78 кг/кмоль, $M_{тлк}$= 92 кг/кмоль – молярні маси бензолу і толуолу відповідно [10].

$$\overline{x_f} = 0,3 \cdot \frac{78}{87,8} = 0,267$$

$$\overline{x_D} = 0,95 \cdot \frac{78}{78,8} = 0,940$$

$$\overline{x_W} = 0,05 \cdot \frac{78}{91,3} = 0,043$$

Матеріальний баланс ректифікаційної колони складається з потоків:

$$G_f = G_D + G_W; \tag{2.5}$$

за легколетким компонентом:

$$G_f \cdot \overline{x_f} = G_D \cdot \overline{x_D} + G_W \cdot \overline{x_W}; \tag{2.6}$$

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

$$G_D = G_f \cdot \frac{\overline{x_f} - \overline{x_W}}{\overline{x_D} - \overline{x_W}}; \tag{2.7}$$

$$G_D = 4200 \cdot \frac{0,267 - 0,043}{0,940 - 0,043} = 1049 \text{ кг/год.}$$

$$G_W = G_f \cdot \frac{\overline{x_D} - \overline{x_f}}{\overline{x_D} - \overline{x_W}}; \tag{2.8}$$

$$G_W = 4200 \cdot \frac{0,940 - 0,267}{0,940 - 0,043} = 3151 \text{ кг/год.}$$

Криву рівноваги будуємо в координатах у – х за довідковими даними при рівноважних складах рідини і пари у залежності від температури (див. рис. 2.1).

Визначаємо мінімальне флегмовое число:

$$R_{\min} = \frac{x_D - y_f^*}{y_f^* - x_f}; \tag{2.9}$$

де y_f^* – склад пари, яка перебуває в рівновазі з вихідної сумішшю;

$y_f^* = 0,5$ – визначається за кривою рівноваги.

$$R_{\min} = \frac{0,94 - 0,5}{0,5 - 0,30} = 2,2$$

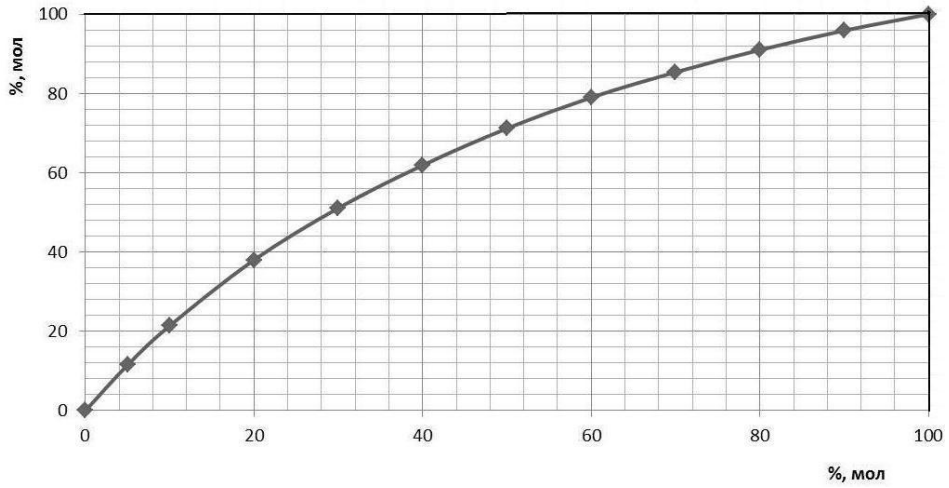

Рисунок 2.1 – Діаграма у – х для суміші бензол – толуол

Визначаємо оптимальне флегмовое число R при β = 1,4:

$$R = \beta \cdot R_{\min} = 1,4 \cdot 2,2 = 3,08 \tag{2.10}$$

Оптимальне значення флегмового числа має вирішальний вплив на розміри ректифікаційної колони і дозволяє точно розрахувати масові витрати флегми, яка стікає по колоні, а також піднімаючихся парів:

$$G_R = R \cdot G_D; \tag{2.11}$$

$$G_R = 3,08 \cdot 1049 = 3231 \text{ кг/год.}$$

$$G_V = (R+1) \cdot G_D; \tag{2.12}$$

$$G_V = (3,08+1) \cdot 1049 = 4280 \text{ кг/год.}$$

Робоча лінія процесу для верхньої частини колони:

$$y = \frac{R}{R+1} \cdot x + \frac{x_D}{R+1}; \tag{2.13}$$

Робоча лінія процесу для нижньої частини колони:

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

де F – число живлення, що визначається за формулою:

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

$$F = \frac{4200}{1049} \cdot \frac{78,8}{87,8} = 3,6.$$

У такому разі отримаємо:

$$y_f^{'} = \frac{3,08}{3,08+1} \cdot 0,30 + \frac{0,94}{3,08+1} = 0,460;$$

$$y_f^{//} = \frac{3,6+3,08}{3,08+1} \cdot 0,30 - \frac{3,6-1}{3,08+1} \cdot 0,05 = 0,460$$

Якщо значення $y_f^{/}=y_f^{//}$ є однаковими, це свідчить про відсутність помилок у проведених розрахунках.

Середня молярна концентрація рідини у верхній частині колони:

$$x_{cp}^{/} = \frac{\left(x_f + x_D\right)}{2}; \qquad (2.16)$$

$$x_{cp}^{/} = \frac{\left(0,30+0,94\right)}{2} = 0,62.$$

Середня молярна концентрація рідини у нижній частині колони:

$$x_{cp}^{//} = \frac{\left(x_f + x_W\right)}{2}; \qquad (2.17)$$

$$x_{cp}^{//} = \frac{\left(0,30+0,05\right)}{2} = 0,175.$$

Середня молярна концентрація парової фази у верхній частині колони:

$$y_{cp}^{/} = \frac{R}{R+1} \cdot x_{cp}^{/} + \frac{x_D}{R+1}; \qquad (2.18)$$

$$y_{ср}^{'} = \frac{3,08}{3,08+1} \cdot 0,62 + \frac{0,94}{3,08+1} = 0,70.$$

Середня молярна концентрація парової фази у нижній частині колони:

$$y_{ср}^{//} = \frac{F+R}{R+1} \cdot x_{ср}^{//} - \frac{F-1}{R+1} \cdot x_W; \qquad (2.19)$$

$$y_{ср}^{//} = \frac{3,6+3,08}{3,08+1} \cdot 0,175 - \frac{3,6-1}{3,08+1} \cdot 0,05 = 0,25.$$

Середня молярна маса парів у верхній частині колони:

$$M_{ср}^{/} = y_{ср}^{/} \cdot M_{ллк} + \left(1 - y_{ср}^{/}\right) \cdot M_{тлк}; \qquad (2.20)$$

$$M_{ср}^{/} = 0,70 \cdot 78 + (1-0,70) \cdot 92 = 82,2 \text{ кг/кмоль.}$$

Середня молярна маса парів у нижній частині колони:

$$M_{ср}^{//} = y_{ср}^{//} \cdot M_{ллк} + \left(1 - y_{ср}^{//}\right) \cdot M_{тлк}; \qquad (2.21)$$

$$M_{ср}^{//} = 0,25 \cdot 78 + (1-0,25) \cdot 92 = 88,5 \text{ кг/кмоль.}$$

Середня густина парів у верхній частині колони:

$$\rho_y^{/} = \frac{M_{ср}^{/} \cdot 273}{22,4 \cdot \left(273 + t_y^{/}\right)}; \qquad (2.22)$$

Середня густина парів у нижній частині колони:

$$\rho_y^{//} = \frac{M_{ср}^{//} \cdot 273}{22,4 \cdot \left(273 + t_y^{//}\right)}; \qquad (2.23)$$

де $t_y^{/}$ – середня температура пари у верхній частині колони в залежності від концентрації $y_{ср}^{/}$, °С;

$t_y^{//}$ – середня температура пара в нижній частині колони в залежності від концентрації $y_{ср}^{//}$, °С.

$$\rho_y^{/} = \frac{82,2 \cdot 273}{22,4 \cdot (273+90)} = 2,76 \text{ кг/м}^3;$$

$$\rho_y^{//} = \frac{88,5 \cdot 273}{22,4 \cdot (273+105)} = 2,85 \text{ кг/м}^3.$$

Середня густина рідини у верхній частині колони:

$$\rho_x^{/} = x_{ср}^{/} \cdot \rho_{ллк}^{/} + \left(1 - x_{ср}^{/}\right) \cdot \rho_{тлк}^{/}; \qquad (2.24)$$

$$\rho_x^{/} = 0,62 \cdot 805 + (1 - 0,62) \cdot 800 = 803 \text{ кг/м}^3$$

Середня густина рідини у нижній частині колони:

$$\rho_x^{//} = x_{ср}^{//} \cdot \rho_{ллк}^{//} + \left(1 - x_{ср}^{//}\right) \cdot \rho_{тлк}^{//}; \qquad (2.25)$$

$$\rho_x^{//} = 0,175 \cdot 790 + (1 - 0,175) \cdot 785 = 786 \text{ кг/м}^3.$$

Теплове навантаження кип'ятильника буде становити:

$$Q_W = G_V \cdot r_w = G_V \cdot \left(r_{ллк} \cdot \bar{x}_w + r_{тлк}\left(1 - \overline{x_w}\right)\right); \qquad (2.28)$$

де $r_{ллк}$= 379,2 кДж/кг, $r_{тлк}$= 390,1 кДж/кг – питома теплота випаровування бензолу і толуолу при усереднених значеннях температур.

$$Q_W = \frac{4280}{3600} \cdot (379,2 \cdot 0,043 + 390,1 \cdot (1 - 0,043)) = 463 \text{ кВт}.$$

Витрата гріючої пари у кип'ятильнику:

$$G_{г.п} = Q_W / r_{г.п.}, \qquad (2.29)$$

де $r_{г.п}$ = 2300 кДж/кг – питома теплота випаровування гріючої пари.

$$G_{г.п} = \frac{463}{2300} = 0,2 \text{ кг/с.}$$

Теплове навантаження дефлегматора буде становити:

$$Q_D = G_V \cdot r_d = G_V \cdot \left(r_{ллк} \cdot \overline{x_D} + r_{тлк} \cdot \left(1 - \overline{x_D}\right)\right); \quad (2.30)$$

$$Q_D = \frac{4280}{3600} \cdot \left(379,2 \cdot 0,94 + 390,1 \cdot \left(1 - 0,94\right)\right) = 452 \text{ кВт.}$$

Витрата води в дефлегматорі дорівнює:

$$G_в = \frac{Q_D}{C_в \cdot \left(t_{кв} - t_{нв}\right)}, \quad (2.31)$$

де $C_в$ = 4,2 кДж/кг·К – питома теплоємність води.

$$G_в = \frac{452}{4,2 \cdot 20} = 5,38 \text{ кг/с.}$$

2.2 Конструктивні розрахунки [6, 11]

Граничну і робочу швидкості парів у верхній і нижній частинах колони знаходимо як:

$$\omega' = \left(0,75 \div 0,9\right) \cdot \omega_{пр}; \quad (2.32)$$

де $\omega_{пр}$ – швидкість газу, що відповідає точці заклинання, м/с.

$$\omega_{пр} = c \cdot \sqrt{\frac{\rho_р - \rho_п}{\rho_п}}; \quad (2.33)$$

де с=0,043 при відстані між тарілками Н=400 мм – коефіцієнт, який вибирається в залежності від конструкції тарілок і відстані між ними.

Гранична швидкість парів для верхньої частини колони:

$$\omega'_{пр} = 0,043 \cdot \sqrt{\frac{803 - 2,76}{2,76}} = 0,73 \text{ м/с}.$$

Гранична швидкість парів для нижньої частини колони:

$$\omega''_{пр} = 0,043 \cdot \sqrt{\frac{786 - 2,85}{2,85}} = 0,71 \text{ м/с}.$$

Робоча швидкість парів для верхньої частини колони:

$$\omega' = 0,8 \cdot 0,73 = 0,58 \text{ м/с}$$

Робоча швидкість парів для нижньої частини колони:

$$\omega'' = 0,8 \cdot 0,71 = 0,57 \text{ м/с}$$

Відношення масових витрат рідкої і парової фаз у верхній частині колони:

$$\left(\frac{L}{G}\right)' = \frac{G_R}{G_V} = \frac{R}{R+1}; \quad (2.34)$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)' = \frac{3,08}{3,08+1} = 0,75.$$

Відношення масових витрат рідкої і парової фаз у нижній частині колони:

$$\left(\frac{L}{G}\right)'' = \frac{G_R + G_f}{G_V} = \frac{R+F}{R+1}; \quad (2.35)$$

$$\left(\frac{L}{G}\right)'' = \frac{3,08+3,6}{3,08+1} = 1,64.$$

Об’ємна витрата парів у верхній частині колони:

$$V^{/} = \frac{G_V}{\rho_y^{/}}; \qquad (2.36)$$

$$V^{/} = \frac{4280}{3600 \cdot 2,76} = 0,43 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Об’ємна витрата парів у нижній частині колони:

$$V^{//} = \frac{G_V}{\rho_y^{//}}; \qquad (2.37)$$

$$V^{//} = \frac{4280}{3600 \cdot 2,85} = 0,42 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Діаметр колони розраховуємо як:

$$D = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot \omega}}; \qquad (2.38)$$

Для верхньої частини колони:

$$D^{/} = \sqrt{\frac{0,43}{0,785 \cdot 0,58}} = 0,97 \text{ м}.$$

Для нижньої частини колони:

$$D^{//} = \sqrt{\frac{0,42}{0,785 \cdot 0,57}} = 0,97 \text{ м}.$$

Ми обираємо найближчий діаметр колони, який є більшим і доступний у стандартному ряді діаметрів, а саме: D = 1000 мм.

Дійсні робочі швидкості пари в колоні будуть становити:

$$w_в = 0,58 \cdot \left(\frac{0,97}{1,0}\right)^2 = 0,55 \text{ м/с};$$

$$w_н = 0,57 \cdot \left(\frac{0,97}{1,0} \right)^2 = 0,54 \text{ м/с.}$$

У результаті побудови горизонтальних і вертикальних відрізків між робочою і рівноважною лініями (див. додаток А), отримуємо число теоретичних тарілок, а саме: для верхньої частини колони – $N_m^{/} = 9$ шт., для нижньої – $N_m^{//} = 7$ шт.

Число дійсних тарілок визначаємо за залежністю:

$$N_д = N_т / \eta; \qquad (2.39)$$

де η – коефіцієнт корисної дії ситчастої тарілки.

У верхній частині колони:

$$N_д = 9 / 0,55 \approx 16 \text{ шт.}$$

У нижній частині колони:

$$N_д = 7 / 0,55 \approx 13 \text{ шт.}$$

Висота секції колони з тарільчастою частиною залежить від кількості фактичних тарілок і вибраного між ними інтервалу:

$$H_Т = \left(N_Д - 1\right) \cdot H, \qquad (2.40)$$

де $N_д$ = 16 + 13 = 29 шт. – загальна кількість тарілок;
H = 400 мм – відстань між тарілками.

$$H_т = (29 - 1) \cdot 400 = 11200 \text{ мм.}$$

Діаметри патрубків визначаються за рівнянням:

$$D = \sqrt{\frac{G}{\rho \cdot 3600 \cdot 0.785 \cdot \omega}}; \qquad (2.41)$$

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

Швидкість пари приймається в межах 15–20 м/с, а швидкість рідини 0,5–2 м/с.

Діаметри патрубків для входу і виходу парів:

$$d_V = \sqrt{\frac{4280}{3600 \cdot 2,85 \cdot 0,785 \cdot 15}} = 0,188 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметри патрубків по 200 мм.

Діаметр патрубка для входу флегми:

$$d_R = \sqrt{\frac{3231}{3600 \cdot 803 \cdot 0,785 \cdot 0,5}} = 0,053 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр патрубка 50 мм.

Діаметр патрубка для входу вихідної суміші:

$$d_f = \sqrt{\frac{4200}{3600 \cdot 785 \cdot 0,785 \cdot 0,5}} = 0,06 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр патрубка 60 мм.

Діаметр патрубка для виходу кубового залишку:

$$d_W = \sqrt{\frac{3151}{3600 \cdot 786 \cdot 0,785 \cdot 0,5}} = 0,053 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр патрубка 60 мм.

2.3 Гідравлічні розрахунки [11]

Гідравлічний опір ситчастої тарілки у верхній і нижній частинах колони розраховується як:

$$\Delta p_{заг} = \Delta p_{сух} + \Delta p_{\sigma} + \Delta p_{пр}, \text{ Па} \qquad (2.42)$$

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

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

$\Delta p_{пр}$ – опір пароріднинного шару, Па.

Гідравлічний опір сухої тарілки:

$$\Delta p_{сух} = \xi \cdot \frac{\rho_{п} \cdot \omega_{отв}^{2}}{2}, \qquad (2.43)$$

де ξ=1,82 – коефіцієнт опору незрошуваних ситчастих тарілок з вільним перетином 5–10 %;

$\omega_{отв}$ – швидкість пари в отворах тарілки.

Швидкість пари в отворах тарілки:

$$\omega_{отв} = \frac{w}{F}, \qquad (2.44)$$

де w – дійсна робоча швидкість парів, м/с;

F = 5,14 % – вільний перетин ситчастої тарілки.

Опір, що зумовлений силами поверхневого натягу:

$$\Delta p_{\sigma} = \frac{4 \cdot \sigma \cdot}{d_{0}}; \qquad (2.45)$$

де σ – поверхневий натяг рідини при середній температурі: у верхній частині колони σ = $20{,}5 \cdot 10^{-3}$ Н/м; у нижній частині колони σ = $18{,}5 \cdot 10^{-3}$ Н/м;

d_0=0,004 м – діаметр отворів тарілки.

Опір пароріднинного шару на тарілці:

$$\Delta p_{пр} = 1{,}3 \cdot h_{пр} \cdot \rho_{пр} \cdot g \cdot k, \qquad (2.46)$$

де $h_{пр}$ – висота пароріднинного шару, м.

$$h_{пр} = h_{п} + \Delta h, \qquad (2.47)$$

де h_n – висота зливної перегородки, м;

Δh – висота шару над зливною перегородкою, м.

$$\Delta h = \left(\frac{V_p}{1{,}85 \cdot П \cdot k} \right)^{\frac{2}{3}}, \text{ м} \qquad (2.48)$$

де V_p – об'ємна витрата рідини, м^3/с;

$П$ – периметр зливної перегородки, м;

$k = \rho_{пр} / \rho_p \approx 0{,}5$ – відношення густини пароріднинного шару (піни) до густини рідини.

Об'ємна витрата рідини:

$$V_p = \frac{G_D \cdot R \cdot M_{ср}}{M_D \cdot \rho_p} \qquad (2.49)$$

де R – флегмове число;

$M_{ср}$ – середня мольна маса рідини, кг/кмоль.

Периметр зливної перегородки знаходимо, розв'язуючи систему рівнянь:

$$\begin{cases} \left(\frac{П}{2} \right)^2 + \left(R - b \right)^2 = R^2 \\ 0{,}1 \cdot \pi \cdot R^2 = \frac{2}{3} \cdot П \cdot b \end{cases} \qquad (2.50)$$

де R=0,5 м – радіус тарілки.

Умова нормальної роботи тарілок:

$$H_m > 1{,}8 \cdot \frac{\Delta p}{\rho_p \cdot g} \qquad (2.51)$$

де Н – відстань між тарілками, м.

Мінімальна швидкість пари в отворах, яка є достатньою для того, щоб ситчаста тарілка працювала усіма отворами:

$$w_{o\ мін} = 0,67 \cdot \sqrt{\frac{g \cdot \rho_p \cdot h_{пр}}{\xi \cdot \rho_n}}, \qquad (2.52)$$

Проводимо розрахунки для верхньої частини колони.

Швидкість пари в отворах тарілки:

$$\omega_{отв} = \frac{0,55}{0,0514} = 10,7 \text{ м/с.}$$

Гідравлічний опір сухої тарілки:

$$\Delta p_{сух} = 1,82 \cdot \frac{2,76 \cdot 10,7^2}{2} = 288 \text{ Па.}$$

Опір, що зумовлений силами поверхневого натягу:

$$\Delta p_{\sigma} = \frac{4 \cdot 20,5 \cdot 10^{-3}}{0,004} = 20,5 \text{ Па.}$$

Об’ємна витрата рідини:

$$V_p = \frac{1049 \cdot 3,08 \cdot 82,2}{3600 \cdot 78,8 \cdot 803} = 1,17 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с.}$$

Висота шару над зливною перегородкою:

$$\Delta h = \left(\frac{1,17 \cdot 10^{-3}}{1,85 \cdot 0,73 \cdot 0,5} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,014 \text{ м.}$$

Висота пароріднинного шару:

$$h_{пр} = 0,04 + 0,014 = 0,054 \text{ м.}$$

Опір парорідинного шару на тарілці:

$$\Delta p_{пр} = 1{,}3 \cdot 0{,}054 \cdot 803 \cdot 9{,}81 \cdot 0{,}5 = 276 \text{ Па}.$$

Загальний гідравлічний опір тарілки у верхній частині колони:

$$\Delta p'_{заг} = 288 + 20{,}5 + 276 = 584{,}5 \text{ Па}.$$

Загальний гідравлічний опір у верхній частині колони становить:

$$\Delta p' = \Delta p'_{заг} \cdot N'_{д}, \qquad (2.53)$$

$$\Delta p' = 584{,}5 \cdot 16 = 9352 \text{ Па}.$$

Проводимо розрахунки для нижньої частини колони.

Швидкість пари в отворах тарілки:

$$\omega_{отв} = \frac{0{,}54}{0{,}0514} = 10{,}5 \text{ м/с}.$$

Гідравлічний опір сухої тарілки:

$$\Delta p_{сух} = 1{,}82 \cdot \frac{2{,}85 \cdot 10{,}5^2}{2} = 286 \text{ Па}.$$

Опір, зумовлений силами поверхневого натягу:

$$\Delta p_{\sigma} = \frac{4 \cdot 18{,}5 \cdot 10^{-3}}{0{,}004} = 18{,}5 \text{ Па}.$$

Об'ємна витрата рідини:

$$V_p = \left(\frac{G_D \cdot R}{M_D} + \frac{G_F}{M_F} \right) \cdot \frac{M_{ср}}{\rho_p};$$

$$V_p = \left(\frac{1049 \cdot 3{,}08}{78{,}8} + \frac{4200}{87{,}8} \right) \cdot \frac{88{,}5}{3600 \cdot 786} = 2{,}78 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Висота шару над зливною перегородкою:

$$\Delta h = \left(\frac{2,78 \cdot 10^{-3}}{1,85 \cdot 0,73 \cdot 0,5} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,026 \text{ м.}$$

Висота пароріднинного шару:

$$h_{пр} = 0,04 + 0,026 = 0,066 \text{ м.}$$

Опір парорідинного шару на тарілці:

$$\Delta p_{пр} = 1,3 \cdot 0,066 \cdot 786 \cdot 9,81 \cdot 0,5 = 331 \text{ Па.}$$

Загальний гідравлічний опір тарілки у верхній частині колони:

$$\Delta p''_{заг} = 286 + 18,5 + 331 = 635,5 \text{ Па.}$$

Загальний гідравлічний опір у нижній частині колони становить:

$$\Delta p'' = \Delta p''_{заг} \cdot N''_{д}, \qquad (2.54)$$

$$\Delta p'' = 635,5 \cdot 13 = 8261,5 \text{ Па.}$$

Проведемо перевірку на виконання умов нормальної роботи тарілки в нижній частині колони, де гідравлічний опір є вищим, ніж у тарілки розташованій у верхній частині:

$$1,8 \cdot \frac{\Delta p''}{\rho_p \cdot g} = 1,8 \cdot \frac{635,5}{786 \cdot 9,81} = 0,15.$$

Це підтверджує правильність прийнятої раніше відстані між тарілками $H_т = 400$ мм, оскільки $0,15 < 0,4$.

Перевіримо рівномірність роботи тарілок:

$$w_{о\ мін} = 0,67 \cdot \sqrt{\frac{9,81 \cdot 786 \cdot 0,066}{1,82 \cdot 2,85}} = 6,6 \text{ м/с} < 10,5 \text{ м/с.}$$

Отже, тарілки працюватимуть усіма отворами.

Загальний гідравлічний опір колони складе:

$$\Delta p = \Delta p' + \Delta p''; \qquad (2.55)$$

$$\Delta p = 9352 + 8261,5 = 17613,5 \text{ Па}.$$

2.4 Вибір допоміжного обладнання [12]

Розрахуємо насос для подачі вихідної суміші. Для всмоктуючого і напірного трубопроводів приймаємо однакову швидкість течіння рідини, як дорівнює $w = 2$ м/с.

Діаметр трубопроводу визначаємо за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \qquad (2.56)$$

де V – об'ємна витрата суміші, що подається в колону.

$$V = \frac{4200}{3600 \cdot 803} = 1,45 \cdot 10^{-3} \ \frac{м^3}{с};$$

$$d = \sqrt{\frac{1,45 \cdot 10^{-3}}{0,785 \cdot 2}} = 0,030 \text{ м}.$$

Приймаємо стандартизований діаметр трубопроводу 32 мм.

Визначаємо критерій Рейнольдса для рідини у трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_p}{\mu}, \qquad (2.57)$$

$$\text{Re} = \frac{2 \cdot 0,032 \cdot 803}{2,65 \cdot 10^{-4}} = 193932.$$

Це означає, що режим турбулентний.

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

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

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

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

Для зони, що є автомодельною по відношенню до Re:

$$\lambda = 0,11 \cdot e^{0,25}, \qquad (2.58)$$

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

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

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

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

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

Для напірної лінії: вентиль прямоточний $\xi_1 = 0,65$; 3 коліна з кутом 90° $\xi_2 = 3 \cdot 1,1 = 3,3$; 1 кожухотрубний теплообмінник $\xi_3 = 3,05$; вихід з труби $\xi_3 = 1$.

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

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

Втрату напору у всмоктуючій лінії знаходимо за рівнянням:

$$h_{П.ВС.} = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma\xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \qquad (2.59)$$

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

$$h_{П.ВС.} = \left(0,03 \cdot \frac{3}{0,032} + 2,7\right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 1,1 \text{м}.$$

Втрата напору в напірній лінії:

$$h_{П.НАП.} = \left(0,03 \cdot \frac{7}{0,032} + 8\right) \cdot \frac{2^2}{2 \cdot 9,81} = 3,0 \text{ м}.$$

Загальні втрати напору:

$$h_{П} = h_{П.ВС.} + h_{П.НАП.}; \tag{2.60}$$

$$h_{П} = 1,1 + 3,0 = 4,1 \text{м}.$$

Знаходимо напір насосу за рівнянням:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_{ж} \cdot g} + H_{Г} + h_{П}, \tag{2.61}$$

де $(P_2 - P_1)$ – різниця тисків у апараті та в ємності, із якої подається рідина. У нашому випадку, враховуючи, що тиск у колоні атмосферний, ця різниця дорівнює 0 МПа;

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

$$H = 5 + 4,1 = 9,1 \text{ м}.$$

Корисну потужність насосу визначаємо за рівнянням:

$$N_{П} = \rho_{р} \cdot g \cdot V \cdot H, \tag{2.62}$$

$$N_{П} = 803 \cdot 9,81 \cdot 1,45 \cdot 10^{-3} \cdot 9,1 = 104 \text{Вт}.$$

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

$$N = \frac{N_{П}}{\eta_{пер} \cdot \eta_{н}}, \tag{2.63}$$

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

$$N = \frac{104}{1 \cdot 0,6} = 173 \text{ Вт}.$$

Вибираємо відцентровий насос марки НМШ 8-25-8,5/25-5 із наступними параметрами: об'ємна подача насосу 8,5 м^3/год.; напір насосу 25 м; потужність, яку потребляє насосом 7,5 кВт; частота обертів 1450 об/хв.

Далі розрахуємо ємність для вихідної суміші. Виходимо з 6–8 годинного резерву робочого часу, а також з урахуванням коефіцієнту заповнення $\psi = 0,8...0,85$.

Розрахунковий об'єм ємності складе:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}; \qquad (2.64)$$

$$V_{EP} = \frac{4200 \cdot 6}{0,85 \cdot 803} = 36,9 \text{ м}^3.$$

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

$$H = \frac{V_{EP}}{0,785 \cdot D^2}, \qquad (2.65)$$

$$H = \frac{36,9}{0,785 \cdot 3,6^2} = 3,6 \text{ м}.$$

3 Розрахунки апарата на міцність та герметичність [13]

3.1 Визначення товщини циліндричної обичайки та кришки

Робочу температуру середовища приймаємо 105°С, а робочу температуру стінки приймаємо на 5°С меншою, тобто 100°С. Робочий тиск в апараті атмосферний, тобто становить 0,1 МПа.

Розрахунковий тиск для апаратів з робочим надлишковим тиском P > 0,07 МПа відповідно до рекомендацій наведених у [13] складе:

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

Приймаємо стандартне значення 0,25 МПа.

Пробний при гідравлічному випробуванні тиск згідно [13] складе:

$$P_{пр}=\max\begin{Bmatrix}1,5Pp[\sigma]_{20}/[\sigma]\\ Pp+0,3\end{Bmatrix}, \quad (3.2)$$

де $[\sigma]_{20}$,$[\sigma]$ – допустиме напруження для матеріалу корпусу при розрахунковій температурі і температурі 20°С, згідно [13]:

$$[\sigma]_{20}=160 \text{ МПа}, \ [\sigma]=152 \text{ МПа}.$$

$$P_{пр}=\max\begin{Bmatrix}1,5\cdot 0,25\cdot 140/132\\ 0,25+0,3\end{Bmatrix}=\max\begin{Bmatrix}0,43\\ 0,55\end{Bmatrix}=0,55 \text{ МПа}.$$

Розрахункове значення для модуля поздовжньої пружності для матеріалу корпусу:

$$E_{20}=2\cdot 10^5 \text{ МПа}, \ E=2\cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Коефіцієнт проточності зварного шва, згідно [13], складе: φ=0,9.

Товщина стінки циліндричної обичайки, навантаженої внутрішнім надлишковим тиском:

$$S_к = \frac{P_{пр} \cdot D}{2 \cdot [\sigma] \cdot \varphi_р - P_{пр}}, \quad (3.3)$$

$$S_к = \frac{0,55 \cdot 1,0}{2 \cdot 152 \cdot 0,9 - 0,55} = 0,002 \text{ м.}$$

Виконавча товщина стінки:

$$S \geq S_К + C, \quad (3.4)$$

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

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

де C_1 – прибавка на корозію і ерозію, при проникності П = 0,1 мм/рік та терміні служби колони τ=15 років складе

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

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

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

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

$$C = 1,5 + 0 + 0 = 1,5 \text{ мм.}$$

$$S = 0,002 + 0,0015 = 0,0035 \text{ м.}$$

Приймаємо S=0,004 м = 4 мм.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск:

$$[p] = \frac{2[\sigma]\varphi_p(s-c)}{D+(s-c)}, \quad (3.6)$$

$$[p]=\frac{2\cdot 152\cdot 0,9\cdot(0,004-0,0015)}{1,0+(0,004-0,0015)}=0,68\,\text{МПа}$$

Умова міцності має вигляд:

$$P < [P]: 0,55\ \text{МПа} < 0,68\ \text{МПа}.$$

Умова міцності виконується.

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

$$S_R=\frac{P_p R}{2[\sigma]\cdot\varphi-0,5P_p}, \qquad (3.7)$$

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

$$S_R=\frac{0,55\cdot 1,0}{2\cdot 152\cdot 0,9-0,5\cdot 0,55}=0,002\ \text{м}.$$

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

$$C = 1,5 + 0 + 0 = 1,5\ \text{мм}.$$

$$S = 0,002 + 0,0015 = 0,0035\ \text{м}.$$

Приймаємо S=0,004 м = 4 мм.

Допустимий внутрішній надлишковий тиск:

$$[p]=\frac{2(S-C)\varphi[\sigma]}{D+0,5(S-C)}, \qquad (3.8)$$

$$[p]=\frac{2\cdot(0,004-0,0015)\cdot 0,9\cdot 152}{1,0+0,5\cdot(0,004-0,0015)}=0,68\quad\text{МПа},$$

що більше пробного, а отже, умова міцності виконується.

3.2 Розрахунок опори апарату

Визначимо навантаження порожнього апарату на опору по формулі:

$$Q_{ап} = M_{ап} \cdot g; \quad (3.9)$$

де $M_{ап}$ – маса порожнього апарату;

$$M_{ап} = M_{к} + M_{дн} + M_{кр} + M_{т} + M_{фл}, \quad (3.10)$$

де $M_{к}$, $M_{дн}$, $M_{кр}$, $M_{т}$, $M_{фл}$ – відповідно маси корпусу, днища, кришки, тарілок, фланців і арматури

$$M_{к} = H \cdot \pi \cdot D \cdot s \cdot \rho, \quad (3.11)$$

де ρ – щільність матеріалу корпусу ρ=7800 кг/м^3;

$$M_{к} = 16{,}1 \cdot 3{,}14 \cdot 1{,}0 \cdot 0{,}004 \cdot 7800 = 1577 \text{ кг}$$

$$M_{дн} = M_{кр} = F \cdot s \cdot \rho, \quad (3.12)$$

де F – площа внутрішньої поверхні еліптичного днища (кришки) F=1,16 м^2;

$$M_{дн} = M_{кр} = 1{,}16 \cdot 0{,}004 \cdot 7800 = 36 \text{ кг.}$$

Маса тарілок:

$$M_{т} = N \cdot m_{т}, \quad (3.13)$$

де $m_{т}$ = 41,5 кг – маса однієї тарілки.

$$M_{т} = 29 \cdot 41{,}5 = 1204 \text{ кг.}$$

Масу фланців і арматури приймемо рівною $M_{фл}$=1000 кг.

Маса порожнього апарату:

$$M_{ап} = 1577 + 2 \cdot 36 + 1204 + 1000 = 3853 \text{ кг;}$$

$$Q_{ап} = 3853 \cdot 9{,}81 = 37798 \text{ Н}.$$

Навантаження апарату на опору під час гідравлічних випробувань:

$$Q_{ап}^{и} = (M_{ап} + M_{в}) \cdot g\,, \tag{3.14}$$

де $M_в$ – маса залитої в апарат води.

$$M_{в} = V \cdot \rho_{в}\,, \tag{3.15}$$

де V – об’єм апарату

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H = \frac{3{,}14 \cdot 1{,}0^2}{4} \cdot 16{,}1 = 12{,}6\,\text{м}^3;$$

$$M_{в} = 12{,}6 \cdot 1000 = 12600\,\text{кг};$$

$$Q_{ап}^{и} = (3853 + 12600) \cdot 9{,}81 = 161404 \text{ Н}.$$

Виходячи з $Q_{max}=Q_{ап}$ і $Q_{min}=Q_{ап}$, за таблицями [13] вибираємо циліндричну опору третього типу: 3-1000-30-15-350.

4 Монтаж та ремонт апарату

4.1 Монтаж тарілчастої ректифікаційної колони [14]

Монтажні роботи є важливою частиною загального процесу будівництва підприємства або його окремих об'єктів. Вони виконуються як під час будівництва нових об'єктів, так і під час реконструкції та ремонту існуючих. У випадках реконструкції та ремонту, монтаж передує демонтажу обладнання.

Для проведення монтажних робіт обладнання на майданчиках оснащуються необхідними вантажопідйомними механізмами і пристосуваннями. Це можуть бути канати, троси, стропи, блоки, поліспасти, різні види талей, лебідки, а також вантажопідйомні машини і механізми. Важливо, щоб такі талярно-транспортні засоби були простими у виготовленні, зручними для транспортування, монтажу, перестановки і демонтажу, а також забезпечували безпеку під час роботи.

Монтаж важкого обладнання на фундамент може здійснюватися двома способами. Перший – повністю зібраним обладнанням або великими блоками, шляхом нарощування або підрощування, дозволяє забезпечити швидкість і ефективність монтажу. Другий – поступове збирання обладнання на місці, що дозволяє легше пристосуватися до особливостей монтажного майданчика та уникнути проблем з доставкою та розміщенням великогабаритних компонентів.

Тарілчасту ректифікаційну колону поставляють на монтажний майданчик у максимально готовому стані. Якщо транспортування повністю зібраного апарата неможливе, його доставляють у вигляді максимально великих блоків. Завод-виготовлювач перед відправкою на монтажну ділянку повинен здійснити контрольну збірку апарата, а також нанести необхідні маркери для складання та контролю.

Монтаж колонного апарату проводиться безпосередньо на монтажні штуцери, які розташовані вище центру ваги, за допомогою вантажопідйомних механізмів, таких як стрілові крани, щогли тощо. Стропування апарата

здійснюється за його верхню частину, а для забезпечення його додаткової стабільності в горизонтальному положенні використовують кутики або швелери.

Важливою частиною процесу монтажу є контроль за правильністю складання апарата та забезпеченням його стійкості під час підняття та фіксації на монтажних штуцерах. Ретельна підготовка і використання вантажопідйомних механізмів допомагають уникнути можливих пошкоджень апарату під час монтажу та забезпечити безпеку робітників.

Ступінь складності встановлення колонного апарату в проектне положення залежить від його габаритних розмірів, маси та висоти фундаменту. Ці параметри визначаються для кожного проекту окремо і впливають на вибір оптимального способу підйому.

У практиці застосовуються два основні способи підйому: ковзання і поворот навколо шарніру. З огляду на велику масу проектованого колонного апарату, його підйом здійснюється за допомогою двох щоголів, що забезпечує зручність та надійність процесу встановлення на фундамент. Перед підйомом апарат розташовують якомога ближче до фундаменту, а щогли встановлюються по обидва боки фундаменту, вертикально або злегка похило.

Нахил щогл визначається довжиною самого апарату, його розташуванням відносно фундаменту, розташуванням і висотою щогл та обраною схемою стропування. Важливо враховувати ці фактори для забезпечення безпеки під час підйому та стабільного розташування апарату на фундаменті.

Комплексний аналіз габаритних характеристик, маси та розташування колонного апарату допомагає визначити оптимальну стратегію монтажу та встановлення, забезпечуючи ефективність і безпеку процесу.

Після перевірки надійності та функціонування всіх механізмів та обладнання, розпочинається процес підйому апарату. Для цього до опорної частини апарату прикріплюють один або два відтяжних троси, кінці яких

намотують на барабани лебідок. За допомогою вантажопідйомних механізмів апарат починає рухатись, при цьому його опорна частина ковзає по спеціально підготовленій підставці, такі як візки або металеві листи.

Після підняття апарату від землі його встановлюють у вертикальне положення та піднімають над рівнем фундаменту. Потім апарат плавно опускають на анкерні болти і проводять контроль відхилень від вертикальності. Анкерні болти затягують, щоб забезпечити стабільне положення апарату.

Особливу увагу приділяють ретельній перевірці колонного апарату на фундаменті, оскільки навіть незначні відхилення від вертикального положення можуть спричинити значні втрати стійкості та порушення роботи внутрішніх контактних пристроїв, таких як клапанні тарілки. Для тарілчастої ректифікаційної колони максимально допустиме відхилення від вертикальності складає 0,1% висоти апарату, але не більше 15 мм. Забезпечення правильної вертикальності є важливим етапом монтажу з метою забезпечення нормальної роботи апарату та його компонентів.

Апарат кріпиться до фундаменту за допомогою фундаментних болтів і заливається бетонною сумішшю, щоб забезпечити його надійне закріплення. Після встановлення апарату на фундамент перевіряється, чи відповідає його розташування у просторі проектному плану, а також контролюються відхилення від вертикальності та горизонтальності, щоб переконатись, що вони знаходяться в межах допустимих значень. Вимоги до точності монтажу зазвичай встановлюються на основі паспорта обладнання та монтажних інструкцій. Починаючи з встановлення опорної частини обладнання на проектну висоту, фактичний рівень опорної поверхні та горизонтальність апарату визначаються за допомогою нівеліру.

При підготовці колонного апарату до ремонту спочатку знижують тиск усередині колони до атмосферного рівня, видаляють вуглеводні та пропарюють колону водяною парою. Це допомагає видалити залишки токсичних сполук, забезпечуючи нижчу концентрацію шкідливих та горючих речовин, щоб не

перевищувати гранично допустимі концентрації (ГДК). Після пропарювання колону промивають водою. У деяких випадках цикл пропарювання і промивки може повторюватись кілька разів.

Промивання колони водою має додаткову перевагу, а саме - сприяє швидшому процесу охолодження. Проте, важливо пам'ятати, що ремонтні роботи не можуть розпочинатись, якщо температура промивної води перевищує 50°С.

Після процедури пропарювання та промивання колону необхідно від'єднати від усіх апаратів та комунікацій за допомогою глухих заглушок, які кріпляться на фланцевих з'єднаннях штуцерів. Установку кожної заглушки та подальше її зняття слід обов'язково зареєструвати в спеціальному журналі. Це дозволить вести облік проведених процедур та забезпечити належний контроль над ремонтними роботами.

4.2 Ремонт основних вузлів ректифікаційної колони [14, 15]

Процес ремонту апарата розпочинається з його відкривання, що повинно відбуватись відповідно до жорстких правил. Першим кроком є відкриття верхнього люка, але перед цим необхідно протягом певного часу подавати водяну пару в апарат. Це зроблено з метою уникнення можливого підсосу повітря, що може створити небезпечну вибухонебезпечну суміш. Після цього почергово (зверху вниз) відкриваються інші люки. Обов'язково дотримуватись заборони одночасного відкриття верхнього і нижнього люків. Також не дозволяється спочатку відкривати нижній люк, а потім верхній, оскільки це може призвести до сильного притоку повітря в колону через різницю температур, що може спричинити утворення небезпечної вибухонебезпечної суміші.

Після відкриття люків, в колоні проводиться провітрювання на певний проміжок часу. По закінченні провітрювання необхідно здійснити аналіз проб повітря, що були взяті з різних висот в колоні. Це важливий крок, оскільки

перед тим, як розпочати роботи всередині колони, необхідно переконатися, що концентрація шкідливих газів не перевищує норм, встановлених санітарними нормами.

Далі необхідно провести ретельний зовнішній і внутрішній огляд корпусу колони, з метою виявлення можливих дефектів, що виникли під час експлуатації апарату, таких як механічні пошкодження, тріщини, корозія та інші. У разі необхідності, для проведення огляду всієї поверхні корпусу, внутрішні пристрої або їх частину можна розібрати. Наприклад, для доступу до тарілок, на рівні яких відсутні люки, розбирають проходи на вище розташованих тарілках. Цей процес дозволяє здійснити більш докладний огляд та забезпечити якісний ремонт апарату.

Суцільнозварні колонні апарати під час ремонту не розбираються повністю. В процесі ремонту виконується демонтаж лише внутрішніх пристроїв колони.

Залежно від характеру виявленого дефекту, встановлюється метод ремонту корпусу. Наприклад, нещільні зварні шви видаляються, очищаються і знову зварюються за допомогою відповідного електрода. Особливу увагу приділяють правильному перекриванню нових і старих швів, оскільки це має вирішальне значення для міцності та надійності з'єднання.

Пошкоджені штуцери і люки вирізаються і замінюються новими, причому обов'язково встановлюються посилювальні кільця. Бажано, щоб кільця нових штуцерів мали трохи більший діаметр, ніж старі, оскільки це дозволяє їх приварювати в новому місці з більшою міцністю та надійністю.

Під час кожного ремонту вимірюють фактичну товщину стінки корпусу експлуатованого апарату. Найбільш зношені ділянки корпусу колони вирізаються, а на їх місце вставляються нові ділянки, які зварюються на місці з'єднання. Важливо уникати вирізання великих ділянок корпусу, оскільки це може призвести до послаблення його перерізу та порушення стійкості. Тому перед вирізанням дефектної ділянки ця область посилюється за допомогою

спеціальних підпорок або стійок, щоб забезпечити стабільність та міцність конструкції.

При розгляді ремонтних робіт на ректифікаційних колонах часто приходять до висновку, що найбільш ефективним і менш трудомістким підходом є повна заміна корпусу колони. Це зумовлено декількома факторами, включаючи відсутність можливості ефективного виправлення або відновлення дефектів на зношеному корпусі, а також високу важкодоступність окремих ділянок колони, що ускладнює їх ремонт.

Процес демонтажу зношеної колони зазвичай виконується в зворотному порядку порівняно з процесом монтажу. Це означає, що розбирання починається з верхніх частин і поступово переходить до нижніх. Такий підхід дозволяє ефективно впоратися з демонтажем, забезпечуючи безпеку та збереження інтегритету елементів колони.

Після завершення ремонтних робіт на колоні, включаючи заміну корпусу, необхідно здійснити випробовування, щоб переконатися у її якості та надійності. Зазвичай застосовуються гідравлічні або пневматичні випробовування, під час яких колону піддають високому тиску. Це дозволяє перевірити її міцність, герметичність і відповідність вимогам безпеки перед подальшим використанням. Випробовування є важливою складовою частиною процесу ремонту, оскільки воно допомагає гарантувати оптимальну функціональність і безпеку ректифікаційної колони.

5 Охорона праці

Класифікація приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом [16, 17].

Електричний струм – це спрямований рух заряджених частинок, таких як електрони або іони, через провідник або іншу середу, яка може проводити електричний ток. Він є основною формою перенесення енергії в електричних системах та пристроях.

Електричний струм може мати різні властивості і може бути контрольованим або неконтрольованим. Контрольований електричний струм використовується у пристроях та системах для виконання корисних робіт, таких як освітлення, нагрівання, механічна робота тощо. Неконтрольований електричний струм може бути небезпечним і призводити до ураження людини або пошкодження електронних пристроїв.

Ураження електричним струмом може мати серйозні наслідки для людського організму, включаючи опіки, вогнепальні поранення, порушення ритму серця та навіть смерть. Тому дотримання правил безпеки під час роботи з електроустановками є критично важливим.

Для запобігання ураженням електричним струмом необхідно встановлювати правильні захисні пристрої, заземлення, ізоляцію та дотримуватися безпечних процедур роботи з електричними пристроями. Регулярні перевірки та обслуговування електроустановок також важливі для забезпечення безпеки використання електричної енергії.

Найбільш поширеними наслідками ураження електричним струмом є:

1. Опіки: струм може призводити до опіків на шкірі в місці контакту з джерелом струму.
2. Пошкодження нервової системи: сильний струм може спричинити травму нервової системи, що може призвести до паралічу або інших неврологічних порушень.

3. Пошкодження серцево-судинної системи: ураження електричним струмом може викликати порушення ритму серця, а в деяких випадках навіть серцевий напад.
4. Порушення дихання: струм може впливати на роботу дихальної системи, що може призвести до утруднення дихання або задухи.
5. М’язові травми: ураження струмом може спричинити судоми, зморшкування м'язів та навіть переломи кісток.

Приміщення можна класифікувати за ступенем небезпеки ураження електричним струмом на основі різних факторів, таких як наявність електрообладнання, його потенційна небезпека, умови експлуатації та застосування.

Основні класифікаційні категорії включають:

1. **Низька ступінь небезпеки.** До цієї категорії належать приміщення, де відсутні або мінімальні ризики ураження електричним струмом. Це можуть бути, наприклад, офісні приміщення, де використовуються низьковольтні електричні пристрої та системи, які відповідають стандартам безпеки.
2. **Середня ступінь небезпеки.** Цю категорію становлять приміщення, де існує певний ризик ураження електричним струмом. Сюди входять приміщення з використанням підвищених напруг або присутністю електроустаткування, яке потенційно може створювати небезпеку для людей. У таких приміщеннях необхідні відповідні заходи безпеки, заземлення, ізоляція та захисне обладнання.
3. **Висока ступінь небезпеки.** Ця категорія охоплює приміщення зі значною небезпекою ураження електричним струмом. Такі приміщення можуть включати високовольтні станції, електропідстанції, електрогенеруючі установки та інші місця, де використовуються дуже високі напруги або потужне електроустаткування. Робота в таких приміщеннях вимагає

спеціального навчання, дотримання строгих правил безпеки та використання спеціального захисного обладнання.

4. **Екстремально висока ступінь небезпеки.** Ця категорія включає найнебезпечніші приміщення, де існує висока й негайна загроза ураження електричним струмом. Такі приміщення можуть бути пов'язані з роботою на високовольтних лініях, електричних шахтах або в умовах небезпеки високого рівня електричної напруги. Вхід до цих приміщень зазвичай допускається лише кваліфікованим фахівцям з додатковим навчанням, використанням спеціального захисного обладнання та дотриманням надзвичайних заходів безпеки.
5. **Особливі умови небезпеки.** Додатково до основних категорій, існують також особливі умови небезпеки, які можуть бути враховані при класифікації приміщень. Наприклад, це можуть бути приміщення зі зберіганням вибухонебезпечних речовин, високої вологості або пилу, де необхідні спеціальні заходи безпеки та обладнання.
6. **Загальні приміщення.** Ця категорія включає приміщення, які не відносяться до попередніх ступенів небезпеки ураження електричним струмом. Вони можуть бути офісними приміщеннями, торговими центрами, громадськими будівлями тощо, де ризик ураження електричним струмом є меншим і контроль за безпекою електроустановок не вимагає особливих заходів.
7. **Побутові приміщення.** Ця категорія охоплює житлові приміщення, включаючи квартири, будинки, гуртожитки тощо. У цих приміщеннях ризик ураження електричним струмом є низьким, але все ж потрібно дотримуватися базових правил безпеки, які стосуються використання електроприладів та розеток.

Класифікація приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом допомагає визначити необхідні заходи безпеки та вимоги до електроустановок в різних типах приміщень. Вона спрямована на забезпечення

безпеки працівників, користувачів та громадськості від потенційних небезпек, пов'язаних з електричним струмом.

Важливо враховувати, що класифікація приміщень за ступенем небезпеки ураження електричним струмом базується на національних та міжнародних стандартах безпеки. Конкретні вимоги та класифікаційні категорії можуть відрізнятися в залежності від країни та сфери застосування. Завжди варто дотримуватися встановлених норм безпеки та звертатися до відповідних директив та рекомендацій для правильної класифікації та застосування заходів безпеки в електротехнічних системах.

Література

1. Процес ректифікації [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00243947_0.html

2. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра / укладачі: Р. О. Острога, М. С. Скиданенко, Я. Е. Михайловський, А. В. Іванія. – Суми : Сумський державний університет, 2019. – 32 с.

3. Иоффе И.Л. Проектирование процессов и аппаратов химической технологи / И.Л. Иоффе. – Л. : Химия, 1991. – 352 с.

4. Плановский А. Н. Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии / А. Н. Плановский, П. И. Николаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия,1972. – 494 с.

5. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – М. : Химия, 1973. – 752 с.

6. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : Учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л. : Химия, 1987. – 576 с.

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

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

9. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин, А. В. Волосникова, С. А. Вяткин [и др.]. – Под общ. ред. Сорокина В. Г. – М. : Машиностроение, 1989. – 640 с.

10. Врагов А. П. Матеріали до розрахунків процесів та обладнання хімічних і газонафтопереробних виробництв: Навчальний посібник / А. П.

Врагов, Я. Е. Михайловський, С. І. Якушко. – За ред. А. П. Врагова. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 170 с.

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

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

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

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

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

16. Основи охорони праці // Тема 17. Електробезпека [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://www.ztec.com.ua/ztec/e-lib/

17. Класифікація приміщень за ступенем ураження електричним струмом [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://studfile.net/preview/7332933/page:23/