

ЗАТВЕРДЖУЮ
Зав. кафедри

підпис, дата

Кваліфікаційна робота магістра

зі спеціальності 133 "Галузеве машинобудування"
освітня програма "Обладнання хімічних виробництв
і підприємств будівельних матеріалів"

Тема роботи: Газофракціонуюча установка. Розробити та модернізувати пропанову колону

Виконав:
студент групи ХМ.м-21с
Шах Артем Дмитрович

підпис

Залікова книжка

№ _____

Кваліфікаційна робота магістра
захищена на засіданні ЕК

з оцінкою _____

" ____ " _____ 20 ____ р.

Підпис голови
(заступника голови) комісії

Керівник:

канд. техн. наук, доцент

Михайловський Я.Е.

підпис, дата

ЗМІСТ

	С.
ВСТУП	3
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ	5
2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	13
2.1 Опис технологічної схеми виробництва	13
2.2 Теоретичні основи процесу	16
2.3 Опис конструкції проектного апарата	23
2.4 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата	25
2.5 Гідравлічні розрахунки	38
2.6 Вибір допоміжного обладнання	40
3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	45
3.1 Вибір конструкційних матеріалів	45
3.2 Розрахунки на міцність та стійкість	47
4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА	52
4.1 Обґрунтування компонування основного та допоміжного обладнання	52
4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання	56
5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ	62
5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу	62
5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання	63
6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ	68
6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів	68
6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора	71
ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	75
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	76
ДОДАТКИ	

ВСТУП

Газові суміші, які ми спостерігаємо в природі або отримуємо в індустрії, зазвичай складаються з різних газових компонентів. Це відбувається через різні природні процеси та виробничі діяльності. У природі велика кількість різних газів, і вони можуть утворювати складні суміші. Найвідомішим природним газом є метан, але також зустрічаються етан, пропан, бутан та інші гази. Склад газу залежить від геологічних умов та джерела видобутку [1].

Виробництво нафти і природного газу включає в себе видобуток, очищення та обробку сирової нафти і природного газу. Під час цих процесів утворюються різні побічні продукти і газові суміші, які можуть містити вуглеводні різних складів [1].

Поділ газової суміші на окремі компоненти або фракції є важливим процесом у багатьох галузях, включаючи промисловість, нафтогазову галузь, хімічну промисловість, аналітичну хімію і багато інших. Необхідність такого поділу, зазвичай, обумовлена декількома факторами [1, 2]:

1. *Виробничі потреби.* Одні гази або компоненти можуть бути важливі для конкретного процесу або виробничої діяльності. Наприклад, метан може бути виділений з природного газу для використання у якості джерела енергії, а інші гази можуть мати специфічні виробничі застосування.
2. *Технологічні вимоги.* Деякі технологічні процеси вимагають чистоти і конкретного складу газової суміші. Наприклад, в аналітичній хімії важливо виділити окремі компоненти для точного вимірювання.
3. *Екологічні аспекти.* У виробництві та експлуатації деяких газів можуть виникати екологічні проблеми. Поділ газових сумішей може бути необхідним для зменшення викидів забруднюючих речовин у навколишнє середовище.
4. *Бажана чистота продукту.* У деяких випадках важливо отримати гази або компоненти певної чистоти. Наприклад, у медичній галузі необхідно мати гази високої чистоти для медичних процедур.

5. *Законодавчі вимоги.* Законодавство може встановлювати обмеження на вміст деяких компонентів у газових сумішах, що використовуються в певних галузях.

Газофракціонуюча установка входить до складу газобензинових, газопереробних, нафтохімічних і хімічних заводів. Для переробки на установку надходить сировина - широка фракція легких вуглеводнів (ШФЛУ). Поділ вуглеводневої суміші здійснюється ректифікацією в колонних апаратах.

Даний проект є комплексним завданням, що узагальнює знання, які були отримані при вивченні професійно-орієнтованих і спеціальних дисциплін магістерської освітньої програми «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» [3]. Метою даної кваліфікаційної роботи є теоретичне обстеження газофракціонуючої установки, отримання навичок щодо проектування пропанової колони, а також пропонування новизни (модернізація) проектної розробки.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ [2, 4–6]

Процеси виділення цільових компонентів і поділу газових сумішей базуються на відмінностях у фізичних константах компонентів, таких як температура кипіння, тиск тощо. Основними методами є:

1. *Фракційна дистиляція.* Цей метод використовує різницю в температурі кипіння компонентів. Газову суміш нагрівають у високу колонну, де різні компоненти випаровуються і конденсуються на різних її рівнях. Це дозволяє відокремити компоненти з різними температурами кипіння.

2. *Адсорбція.* У цьому процесі газова суміш проходить через адсорбційний матеріал, який вибирає певні компоненти на основі їхньої афінності до матеріалу. Після цього компоненти можуть бути вилучені з матеріалу для подальшого використання.

3. *Холодильники і компресори.* Деякі гази можуть бути відокремлені шляхом охолодження до температур, на яких вони конденсуються у рідку форму. Після цього рідка фракція може бути виділена.

4. *Різного роду хімічні реакції.* Деякі гази можуть бути піддані хімічним реакціям, що дозволяє їх перетворити у бажані продукти.

Зазначені методи та технології використовуються в нафтохімічній та хімічній промисловостях для виділення та використання різних вуглеводневих компонентів з газових сумішей.

Газофракціонування – це процес, який спрямований на поділ індивідуальних легких вуглеводнів або вуглеводневих фракцій високої чистоти з нафтозаводських або попутних газів. Цей процес є важливим у нафтогазовій промисловості і дозволяє виділити окремі компоненти з газових сумішей для подальшого їх використання.

Газофракціонування зазвичай базується на відмінностях у температурі кипіння різних вуглеводнів. Установки для газофракціонування можуть включати в себе колонни та інші спеціальні пристрої, які створюють різницю у температурі і тиску для того, щоб окремі компоненти випаровувалися та

конденсувалися на різних рівнях установки. Цей процес дозволяє отримати вуглеводні різних чистот і фракцій, які можуть бути використані для виробництва пального, хімічних продуктів, пластмас і багатьох інших виробів.

Класичні газофракціонуючі установки складаються з наступних укрупнених блоків:

1 блок – це виділення вуглеводнів C_3 і вище. Цей блок включає процеси виділення більш важких вуглеводнів (C_{3+}) з газоподібної сировини. Це може бути досягнуто через конденсацію, компресію або абсорбцію. Після цього виділення можна отримати попутні гази з більш високим вмістом більш важких вуглеводнів, які можуть бути використані для подальших процесів.

2 блок – деетанізація сировини. Деетанізація – це процес видалення етану (C_2H_6) з газової сировини. Це важливо для отримання вищих вуглеводнів (C_{3+}) у більшій концентрації.

3 блок – ректифікація рідких вуглеводнів. Ректифікація є ключовим етапом у газофракціонуванні. Вона використовується для поділу рідких вуглеводнів на окремі компоненти на основі різниці у температурі кипіння. Це дозволяє отримати окремі фракції вуглеводнів у високій чистоті.

4 блок – очищення сировини і готової продукції. Цей блок включає в себе процеси очищення як газової сировини перед подачею її на подальшу обробку, так і готової продукції перед її зберіганням або використанням. Очищення може включати в себе видалення домішок, сірки, вологи та інших нечистот, які можуть впливати на якість продукції та роботу обладнання.

Ці блоки разом утворюють комплексну систему газофракціонування, яка дозволяє отримувати вуглеводні високої чистоти для різних цілей в нафтохімії та хімічній промисловості.

В результаті газофракціонування формуються різні види вуглеводневих компонентів, які можуть мати широкий спектр використання в різних галузях індустрії та побуту. Нижче наведено докладний огляд цих фракцій та їх можливих застосувань:

1. *Метанова фракція.* Метан є основним компонентом природного газу та одним з найважливіших вуглеводнів. Він може бути використаний як паливо для генерації електроенергії та опалення, а також як сировина для виробництва різних хімічних продуктів, включаючи нафтохімічні синтети.

2. *Пропанова фракція.* Пропан широко використовується як побутовий скраплений газ для опалення і готування їжі. Також він може бути використаний в якості хладагента в системах кондиціонування повітря і як пальне для двигунів внутрішнього згоряння.

3. *Бутанова фракція.* Бутан також використовується як побутовий зріджений газ для опалення і готування їжі. Він є важливим компонентом для виробництва синтетичного каучуку, який використовується в виробництві автомобільних шин, упаковки та інших виробів.

4. *Пентанова фракція.* Пентан може бути використаний в процесах піролізу і ізомеризації на нафтопереробних заводах для виробництва більш важких вуглеводнів або хімічних продуктів.

Ці фракції представляють важливий економічний та технологічний ресурс для різних галузей промисловості та відіграють ключову роль у задоволенні енергетичних і хімічних потреб суспільства.

Нафто- і газопереробні заводи використовують різні фізичні процеси для поділу вуглеводневих газів на індивідуальні або вузькі технічні фракції. Вибір конкретної схеми та послідовності цих процесів залежить від кількох факторів:

- склад вихідної газової суміші – склад вихідної сировини визначає, які конкретні компоненти треба виділити і які фракції потрібно отримати;
- вимоги до чистоти продукції – якщо виробництво вимагає високої чистоти продукції, то процеси поділу повинні бути налаштовані для ефективного видалення домішок та інших компонентів;
- необхідний асортимент товарного продукту – залежно від цільового використання, заводи можуть виробляти різні фракції вуглеводнів для власного використання або на продаж.

Основні фізичні процеси, які застосовуються для поділу вуглеводневих газів, включають:

- конденсація – при охолодженні газової суміші до низьких температур деякі компоненти можуть переходити в рідкий стан і виділятися у вигляді конденсату;
- компресія – за допомогою компресорів газову суміш можна стиснути до високого тиску, що дозволяє виділити певні фракції;
- ректифікація – цей процес включає в себе повторну конденсацію і випаровування компонентів вуглеводневої суміші для поділу їх за температурою кипіння;
- абсорбція – полягає в розчиненні певних компонентів газової суміші у рідині, що дозволяє виділити бажані фракції.

Ці фізичні процеси можуть використовуватися окремо або в поєднанні, залежно від потреб та вимог виробництва. Кінцева схема поділу і параметри процесів визначаються заводом на підставі конкретних умов та вимог до кінцевої продукції.

Процес фракційної перегонки, який використовується в ректифікаційних колонах, є ключовим методом для розділення вуглеводнів у нафто- та газопереробці. Основна ідея цього процесу полягає в тому, щоб використовувати різницю у температурі кипіння компонентів для їх поділу.

Важливим аспектом успішної роботи установки фракційної перегонки є високий ступінь поділу газової і рідкої фаз. Це досягається за допомогою системи ректифікаційних колон. Кількість таких колон визначається кількістю компонентів, які необхідно розділити. У загальному випадку, щоб поділити багатокомпонентну суміш на окремі компоненти, потрібно $n - 1$ ректифікаційні колони, де n – це кількість компонентів.

Пояснимо це на прикладі: якщо у вас є суміш з трьох різних вуглеводнів (A , B і C), то для їхнього розділення вам знадобиться дві ректифікаційні колони. Перша колона буде використовуватися для розділення A від B і C , а друга – для розділення B і C один від одного.

Звісно, складність і кількість колон може змінюватися в залежності від складу суміші і конкретних умов процесу, але загальний принцип полягає в тому, щоб використовувати послідовні ректифікаційні колони для досягнення бажаного розділення компонентів.

Обґрунтування новизни проектної розробки

Використання тарілчастих колон для ректифікації є дуже ефективним і дозволяє досягти чіткого поділу складних сумішей вуглеводнів. Однак, вибір конкретного типу тарілки має бути обґрунтованим і враховувати ряд важливих факторів. Нижче наведено кілька ключових моментів, які слід враховувати при виборі типу тарілки для ректифікаційної колони:

1. Великі виробничі потужності. Тарілчасті колони, зазвичай, застосовуються на великих виробничих потужностях, де потрібно велике обсягове розділення і обробка великої кількості сировини.

2. Широкий діапазон навантажень. Такі колони повинні бути здатні працювати ефективно в умовах змінного навантаження по парі та рідині. Це важливо для забезпечення стабільності процесу і уникнення переповнення або недостатньої наповненості колони.

3. Чіткість погонорозділення. Тарілчасті колони повинні забезпечувати високий ступінь чіткості розділення компонентів суміші. Це особливо важливо при виробництві високочистих продуктів.

4. Мінімізація витрат і капіталовкладень. Вибір типу тарілки повинен спрямовуватися на мінімізацію експлуатаційних витрат і питомих капіталовкладень. Важливо забезпечити ефективну роботу колони за найнижчих можливих витрат.

У кожному конкретному виробничому випадку вибір типу тарілки повинен бути обґрунтованим і враховувати всі вищезазначені аспекти, а також специфічні потреби та обмеження виробництва.

При аналізі конструкцій тарілчастих колон, зазвичай враховують наступні критерії:

- продуктивність – тарілчаста колона повинна мати достатню продуктивність для обробки великої кількості сировини і виготовлення необхідної кількості продукту;
- гідравлічний опір – підрахунок гідравлічного опору допомагає забезпечити ефективний процес ректифікації та визначити оптимальні параметри роботи колони;
- ефективність при різних навантаженнях – важливо мати можливість працювати з різними режимами роботи колони і забезпечувати високу ефективність при різних навантаженнях;
- діапазон робочих навантажень – тарілчаста колона повинна працювати ефективно в широкому діапазоні робочих навантажень, щоб бути універсальною;
- опір однієї практичної тарілки – розрахунки опору для окремої тарілки допомагають вибрати оптимальний дизайн для конкретної колони;
- можливість роботи з агресивними і забрудненими середовищами – у випадку роботи з агресивними хімічними середовищами, матеріали тарілок і їх покриття повинні бути стійкими до корозії;
- простота конструкції – прості конструкції, зазвичай, легше виготовляти, монтувати і обслуговувати, що важливо для ефективності та надійності;
- металоємність – металоємність тарілок також важлива, оскільки вона може впливати на витрати на матеріали.

Залежно від типу контактних елементів, можна виділити різні варіанти тарілок, такі як ковпачкові, ситчасті, клапанні, струменеві, провальні тощо.

У базовому варіанті пропанової колони у якості внутрішніх контактних пристроїв застосовувались клапанні тарілки. Заміна клапанних тарілок на ковпачкові обґрунтована наступними перевагами:

1. **Підвищена ефективність поділу.** Ковпачкові тарілки відомі своєю високою ефективністю у поділі рідких і газових фаз. Вони забезпечують кращий масообмін і поділ компонентів у порівнянні з клапанними тарілками. Це може призвести до підвищення якості та чистоти продукції.
2. **Зменшення енергоспоживання.** Ковпачкові тарілки можуть працювати при менших температурах і тисках, що може призвести до зменшення енергоспоживання процесу ректифікації.
3. **Можливість оптимізації процесу.** Ковпачкові тарілки легше налаштовуються і можуть бути оптимізовані для конкретних умов та вимог, що дозволяє підвищити продуктивність і якість.
4. **Довший термін служби.** Ковпачкові тарілки можуть бути менш схильні до зносу і забруднення, що може підвищити їх термін служби і зменшити час, потрібний для обслуговування та ремонту.
5. **Можливість роботи при високих навантаженнях.** Ковпачкові тарілки можуть працювати під високими навантаженнями і при цьому залишати високу ефективність, що дозволяє оптимізувати виробничий процес.

Економічне обґрунтування новизни проекту

Застосування ковпачкових капсульних тарілок у складі пропанової колони виявляється ключовим чинником для перспектив досягнення значущого економічного ефекту, підвищення стійкості та надійності функціонування колони в цілому, особливо в умовах змінних навантажень в широкому діапазоні. Це сприяє досягненню високої продуктивності та ефективності в процесах ректифікації. На жаль, вона супроводжується деяким збільшенням гідравлічного опору, але в контексті ректифікаційних процесів, ця недолік втрачає свою істотність.

Недоліком ковпачкових капсульних тарілок може бути їх відносно високий гідравлічний опір. Підвищення гідравлічного опору призводить до підвищення

тиску і температури кипіння рідини в кип'ятильнику колони. Однак, у виробничих умовах ректифікації, це може бути змінним параметром, який можна легко контролювати та адаптувати для забезпечення оптимальних умов роботи апарату та досягнення максимальної продуктивності.

2 ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

2.1 Опис технологічної схеми виробництва

Під час деструктивної переробки нафти (наприклад, крекінгу або крекінгу газу) вуглеводневі гази, такі як пропан, пропілен, бутан і бутилен, утворюються як побічний продукт. Установки для деструктивної переробки нафти, зазвичай, мають спеціальні газосепаратори або фракціонаційні колонки, які використовуються для виділення цих газів із рідини, бензину і води.

Проте, не завжди усі вуглеводневі гази можуть бути повністю відділені від бензину. Деяка кількість легких вуглеводнів (наприклад, пропан і бутан) може залишатися в бензині як домішки. Це може бути важливою проблемою в контексті якості бензину і екологічних нормативів, оскільки ці легкі вуглеводні можуть впливати на октанове число бензину і викиди шкідливих речовин у повітря.

Очищення бензину від залишкових вуглеводнів може потребувати додаткових обробок або фракціонації, які спрямовані на виділення цих компонентів. Це може бути важливим етапом у виробництві якісного бензину з високим октановим числом і зменшенням впливу на навколишнє середовище.

Нестабільний газовий бензин, який містить розчинені в ньому легкі вуглеводні гази, може бути проблемою при зберіганні, транспортуванні і використанні, особливо в автомобільних двигунах. Ці гази можуть випаровуватися легше, ніж бензин, і утворювати газові пробки у паливній системі, що може призвести до нестабільної роботи двигуна і зниження ефективності пального споживання.

Для отримання стабільного бензину і виділення окремих вуглеводнів, таких як пропан, бутан, пентан і гексан, застосовують газодифузійні установки. Ці установки використовують принцип фракціонації, де різні компоненти розділяються на основі їх фізичних і хімічних властивостей, таких як температура кипіння. На виході отримуються окремі фракції, які можуть бути використані як окремі вуглеводні для різних цілей або змішані для отримання

стабільного бензину. Технологічна схема газофракціонуючої установки представлена на рис. 2.1.

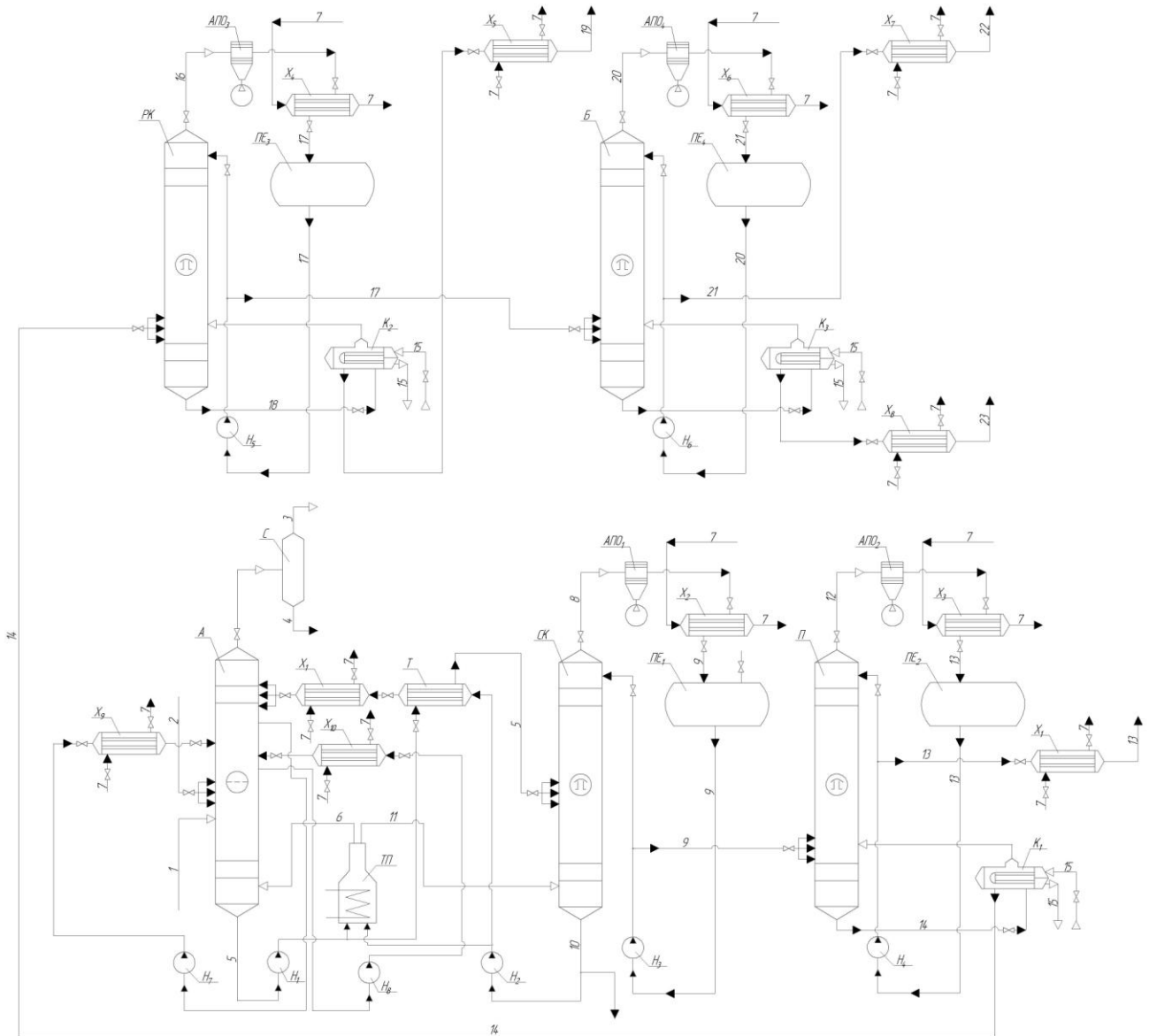


Рисунок 2.1 – Технологічна схема газофракціонуючої установки:

А – фракціонуючий абсорбер; С – сепаратор-краплевіддільник; Т - теплообмінник; X_{1-10} – холодильники; ТП – трубчаста піч; H_{1-8} – насоси; СК – стабілізаційна колона; $АПО_{1-4}$ – апарати повітряного охолодження; K_{1-3} – підігрівачі-кип’ятильники; $ПЄ_{1-4}$ – приймальні ємності; П – пропанова колона; РК - ректифікаційна колона; Б – бутанова колона

Принцип роботи даної установки полягає у наступному. Нестабільний бензин і компримований жирний газ надходять в середню частину фракціонуючого абсорбера. Фракціонуючий абсорбер – це спеціальна установка, призначена для розділення різних компонентів, на яких ґрунтується принцип абсорбції. Із верхньої частини абсорбера виходить сухий газ. Це газ, який був очищений від більш легких вуглеводнів, таких як пропан і бутан, під час проходження через абсорбер.

Потім сухий газ подається в заводську паливну мережу для подальшого використання. Також відбувається відокремлення конденсату від сухого газу за допомогою сепаратора. Абсорбер також обладнаний системою циркуляційних зрошень, яка використовується для видалення тепла, що виникає під час абсорбції. Це може включати в себе відпарювання легких вуглеводнів, щоб забезпечити необхідну теплову енергію для процесу.

Деетанізований бензин підігрівається в теплообміннику. Підігрів зазвичай потрібний для підвищення температури бензину, щоб полегшити процес стабілізації. Після підігріву бензин подається в стабілізаційну колону. Стабілізаційна колона – це спеціальна фракціонаційна установка, призначена для відділення легких вуглеводнів (пропану, бутану, пентану) від бензину.

У верхній частині стабілізаційної колони утворюється рефлюкс, що складається з парів пропану, бутану і пентану. Цей рефлюкс конденсується в апараті повітряного охолодження, де він охолоджується до рідкого стану. У результаті цього утворюється рідина, яка містить пропан, бутан і пентан.

Частина стабільного бензину, який виходить з нижньої частини колони, забирається насосом. Цей бензин є стабільним і придатним для використання в різних галузях (також у якості автомобільного бензину). Частина стабільного бензину після нагріву в трубчастій печі подається «гарячим струменем» під нижню тарілку колони. Цей процес допомагає забезпечити необхідну теплову енергію для процесу стабілізації і відділення пропану, бутану і пентану від бензину.

Процес відділення пропанової фракції від бутан-пентанової є ключовим процесом, який ми досліджуємо в даному кваліфікаційному проекті. Тому

розглянемо цей процес більш детально. Пропанова колона або, як її ще називають, депропанізатор – це колонний апарат, призначений для відділення пропану від бутану і пентану в вуглеводневому потоці. Процес фракціонування базується на різниці у температурі кипіння цих речовин. Пари пропану, які утворилися під час розділення, піддаються конденсації в апараті повітряного охолодження. Це допомагає охолодити пари і перетворити їх у рідку фазу (рефлюкс). Основна кількість пропанової рідкої фракції подається на зрошення стабілізаційної колони. Зрошення використовується для додаткового відділення пропану від інших легких вуглеводнів, що можуть залишатися в бензині.

Частина продукту з кип'ятильника спрямовується в наступну ректифікаційну колону для подальшого розділення бутанової фракції від пентанової. Бутан і пентан мають різницю у температурі кипіння, що також дозволяє їх відокремлювати.

2.2 Теоретичні основи процесу [5–8]

Ректифікація – це процес масообмінного поділу рідкої суміші на окремі компоненти шляхом багатоступеневого взаємодії парової і рідкої фаз. Цей процес базується на різниці у температурах кипіння компонентів суміші. У ректифікаційній колоні відбувається поступове збагачення легких (низькокиплячих) компонентів у верхній (зміцнювальній) частині колони і збагачення важких (висококиплячих) компонентів у нижній (вичерпній) частині колони. Це досягається через повторні ступені поділу а перегону, де пари виходить з рідини, а рідина стає більш концентрованою на певних компонентах.

Ректифікація використовується для розділення компонентів вуглеводневих сумішей, а також у багатьох інших процесах, де важливо визначити окремі компоненти рідини чи газу за їхніми фізичними властивостями. Цей процес є важливим у хімічній промисловості, нафтогазовій галузі та інших сферах для виробництва чистих продуктів з вуглеводневих сумішей і видалення домішок.

Процеси низькотемпературної ректифікації (НТР) зріджених газів використовуються для поділу суміші газів на компоненти за допомогою багатоступінчастої колони з різними температурами і тисками. Давайте розглянемо цей процес більш детально. Початкова суміш газів, яка містить різні компоненти з різними температурами кипіння, піддається конденсації, зазвичай за допомогою охолоджувача. Це призводить до утворення зрідженого конденсату.

Зріджений конденсат подається в ректифікаційну колону. Ця колона має багато тарілок або інших структурних елементів, які дозволяють парові і рідині взаємодіяти і обмінюватися масами. У середній частині колони зріджений конденсат подається на тарілку живлення. Тут відбувається контакт між рідиною і паром, і відбувається фракціонування компонентів. З верхньої частини ректифікаційної колони відводять газ низькокиплячого компонента, оскільки в цій частині колони відбувається концентрація легколетючих компонентів. З нижньої частини колони відводиться рідина, яка складається з висококиплячих компонентів. Ця рідина може бути піддана додатковій обробці або використовуватися як кубовий залишок.

Рушійна сила процесу ректифікації базується на різниці між робочою і рівноважною концентраціями речовини в рідкій і паровій фазах при даній температурі і тиску. Цей принцип відображає основний механізм відділення компонентів в процесі ректифікації.

Робоча концентрація речовини в рідкій фазі – це концентрація речовини у рідині, яка є в ректифікаційній колоні на певному рівні. Вона може бути зміненою шляхом контакту рідини з паром у колоні.

Рівноважна концентрація речовини – це концентрація, яка б мала місце при даній температурі і тиску без подальших змін у розподілі речовини між рідкою і паровою фазами.

Коли робоча концентрація речовини в рідкій фазі перевищує рівноважну концентрацію при даній температурі, речовина переходить у парову фазу. Цей процес називається випарюванням.

З іншого боку, коли концентрація речовини в паровій фазі перевищує рівноважну концентрацію при даній температурі, речовина конденсується і переходить в рідку фазу. Цей процес називається конденсацією.

Ця нерівноважна рівновага між рідкою і паровою фазами сприяє ефективному відділенню компонентів в ректифікаційній колоні, забезпечуючи збагачення парової фази легкими компонентами і рідкої фази важкими компонентами. Цей процес допомагає виробляти продукти з визначеною чистотою і концентрацією, що важливо в багатьох галузях промисловості.

Описана схема ректифікаційної колони з використанням тарілчастих апаратів (див. рис. 2.2) є досить типовою. Вхідна суміш (F) з концентрацією низькокиплячого компонента (X_F) надходить в середню частину ректифікаційної колони. Це може бути суміш рідких компонентів, яку необхідно розділити. Верхній продукт (D) з високою концентрацією низькокиплячого компонента (X_D) забирається з дефлегматора. Дефлегматор – це частина колони, де відбувається конденсація парів і повернення флегми (утворена конденсована рідина) назад в колону для утворення більш концентрованої флегми.

Збіднений компонентом залишок (W) з концентрацією (X_W) відводиться в якості нижнього продукту з кубовипарника. Кубовипарник – це частина колони, де пари утворюються з рідкого компонента. Утворені пари піднімаються по колоні, контактуючи з рідиною на тарілках від 1 до n. На кожній тарілці відбувається обмін масами і теплом між паровою і рідкою фазами. Флегма (Ф) – це утворений конденсат, що повертається у верхню частину колони, де вона служить для створення додаткового контакту між фазами для подальшого розділення компонентів.

У цьому процесі ректифікації основна ідея полягає в тому, що пари компонентів піднімаються вгору і взаємодіють з рідиною на тарілках, де вони конденсуються і повертаються вниз для подальшого розділення. Така колона дозволяє збагачувати верхній продукт (D) легкими компонентами і відділяти важкі компоненти у нижньому продукті (W).

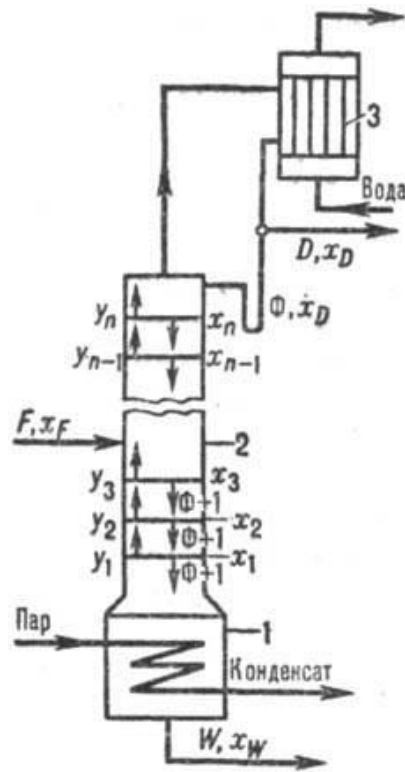


Рисунок 2.2 – Ректифікаційна установка безперервної дії:
1 – кубовипарник; 2 – колона; 3 – конденсатор (дефлегматор)

Матеріальний баланс ректифікаційної колони.

За потоками та легколетким компонентом відповідно:

$$G_F = G_D + G_W; \quad G_F x_F = G_D x_D + G_W x_W, \quad (2.1)$$

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

Тепловий баланс ректифікаційної колони.

Прихід тепла:

- з теплоносієм в кип'ятильнику Q_K ;
- з вихідною сумішшю Q_F ;
- з флегмою Q_Φ .

Витрата тепла:

- з парами, які надходять з колони в дефлегматор Q_G ;
- із залишком Q_W ;
- втрати в навколишнє середовище Q_Π .

Таким чином, рівняння теплового балансу запишеться у вигляді:

$$Q_K + Q_F + Q_{\Phi} = Q_G + Q_W + Q_{\Pi}. \quad (2.2)$$

Взаємозв'язок між концентрацією легколетких компонентів (ЛЛК) у газовій фазі і концентрацією ЛЛК у рідині на кожному рівні колони має певну співвідношеність. Ця співвідношеність визначається через робочу лінію, і вона грає важливу роль у ректифікаційних процесах.

Робоча лінія – це графічне вираження залежності між концентрацією ЛЛК у газовій фазі і концентрацією ЛЛК у рідині для конкретного рівня колони. Ця лінія вказує, яким чином ЛЛК переходять від рідини до пари. Графік робочої лінії допомагає визначити оптимальні умови для досягнення бажаної концентрації ЛЛК у верхньому продукті колони.

Умови адіабатичного режиму, коли не відбувається обмін теплом з навколишнім середовищем, можуть виникати в деяких ректифікаційних процесах. Це спрощує обчислення та дозволяє краще керувати процесом.

Загалом, робоча лінія і умови адіабатичного режиму є важливими аспектами для розуміння і оптимізації ректифікаційних процесів, що використовуються для розділення сумішей рідин на їхні складові компоненти на основі різниці в їхніх фізичних властивостях.

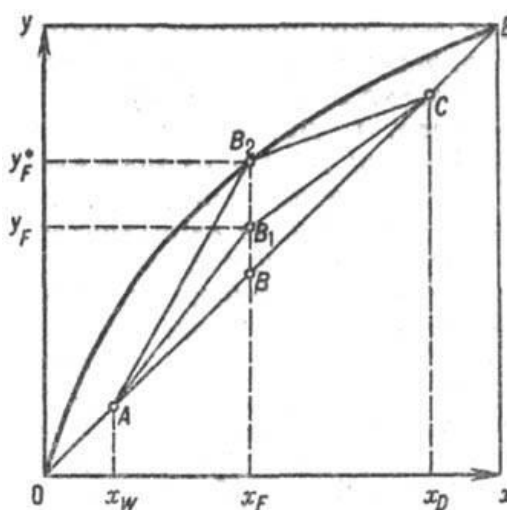


Рисунок 2.3 – Положення робочих ліній на $y - x$ діаграмі

Так, робоча лінія є дійсно ключовим поняттям у ректифікаційних процесах, оскільки вона надає важливу інформацію щодо зміни концентрації легколетких компонентів (ЛЛК) під час їхнього проходження через колону. Розуміння робочої лінії дозволяє оптимізувати роботу ректифікаційної колони, керуючи умовами процесу для досягнення бажаних концентрацій і виходів продуктів:

$$y = x \frac{R}{R+1} + \frac{x}{R+1}, \quad (2.3)$$

де $R = \Phi/D$ – флегмове число.

Рівняння робочої лінії для вичерпної частини ректифікаційної колони визначає залежність концентрації легколетких компонентів у парові фазі від їхніх концентрацій у рідині, коли газова фаза переходить у рідину через масообмін і дифузію.

У вичерпній частині колони, де ще не введено живлення і де рідина піддається подальшій концентрації і очищенню, робоча лінія грає ключову роль у визначенні того, які зміни в концентраціях різних компонентів відбуваються внаслідок масообміну і дифузії між газовою і рідкою фазами. Це важливо для розуміння та керування процесом розділення компонентів у колоні.

Рівняння робочої лінії враховує різницю в молярних теплотах випаровування компонентів і їхню взаємодію під час подальшого проходження через колону. Це допомагає аналізувати та оптимізувати процес перетворення рідини в пар та визначати оптимальні умови для досягнення бажаних концентрацій у вихідному продукті.

$$y = x \frac{R+f}{R+1} + x_w \frac{1-f}{R+1}, \quad (2.4)$$

де $f = F/D$.

Так, аналіз робочих ліній на діаграмі є важливим інструментом для визначення оптимальних умов роботи ректифікаційного процесу та для підвищення ефективності виділення певних компонентів у суміші. Ця діаграма надає важливу інформацію про залежність концентрацій компонентів у рідині та газовій фазі на різних рівнях колони. Інженери та оператори можуть використовувати цю діаграму для оптимізації процесу, встановлення оптимальних параметрів, таких як тиск і температура, і визначення, як досягти бажаної концентрації компонентів у вихідному продукті. Вона також допомагає спростити контроль над процесом і забезпечити стабільну та ефективну роботу ректифікаційної колони.

Ця діаграма особливо корисна у хімічному виробництві та інших галузях промисловості, де ректифікаційні процеси використовуються для розділення і очищення різних речовин. Вона дозволяє досягнути кращих результатів і знизити витрати енергії та ресурсів, що є важливими аспектами в промисловому виробництві.

Мінімальна кількість теоретичних тарілок в колоні визначається за допомогою рівняння Фенске-Андервуда:

$$N_{\min} = \frac{\lg\left(\frac{X_{di} \cdot X_{wj}}{X_{dj} \cdot X_{wi}}\right)}{\lg\left(\frac{K_i}{K_j}\right)}, \quad (2.5)$$

де X_{di}, X_{dj} – мольна концентрація легкого і важкого ключового компонента в дистилляте відповідно;

X_{wi}, X_{wj} – молярна концентрація легкого і важкого ключового компонента в кубовому залишку відповідно;

K_i, K_j – константа фазового рівноваги легкого і важкого ключового компонента відповідно.

А число теоретичних тарілок в колоні знаходять по залежності:

$$N = 1,7 \cdot N_{\min} + 0,7. \quad (2.6)$$

Внутрішній діаметр колони може бути розрахований за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{сек}}{\pi \cdot w'}}, \quad (2.7)$$

де $V_{сек}$ – максимальний секундний обсяг парів, що проходять через перетин колони, м³/с;

w' – робоча швидкість парів у повному перерізі колони, м/с.

2.3 Опис конструкції проектного апарата

У нашому випадку сировиною, що переробляється є нестабільна суміш вуглеводнів. Їх масова витрата становить 50000 кг/год. Таким чином, для проведення заданого процесу ми використовуємо ректифікаційну колону з ковпачковими тарілками (рис. 2.4). Основна частина колони – це вертикальний корпус, який виготовляється з міцних матеріалів, таких як сталь або інші відповідні матеріали. Корпус має циліндричну форму.

Усередині корпусу розміщені ковпачкові тарілки, які встановлюються горизонтально і розташовані на певній відстані одна від одної по всій висоті колони. Кожна тарілка має велику ковпачкову ділянку по центру і отвори чи прорізи на периметрі.

Ковпачкові тарілки забезпечують високу ефективність масообміну між газовою і рідкою фазами. Оскільки вони мають прорізи чи отвори, рідина і пара мають багато точок контакту, що сприяє швидкому і ефективному масообміну. Ковпачкові тарілки мають конструкцію, яка дозволяє рідині легше пройти через них. Це зменшує гідродинамічний опір і дозволяє підтримувати стабільний рівень рідини на тарілках при високих різницях тиску і температури.

Ковпачкові тарілки можуть бути легко адаптовані для регулювання і оптимізації процесу ректифікації. Змінюючи розмір і конструкцію прорізів чи отворів на тарілках, можна контролювати рівень розділення різних компонентів і підвищувати продуктивність.

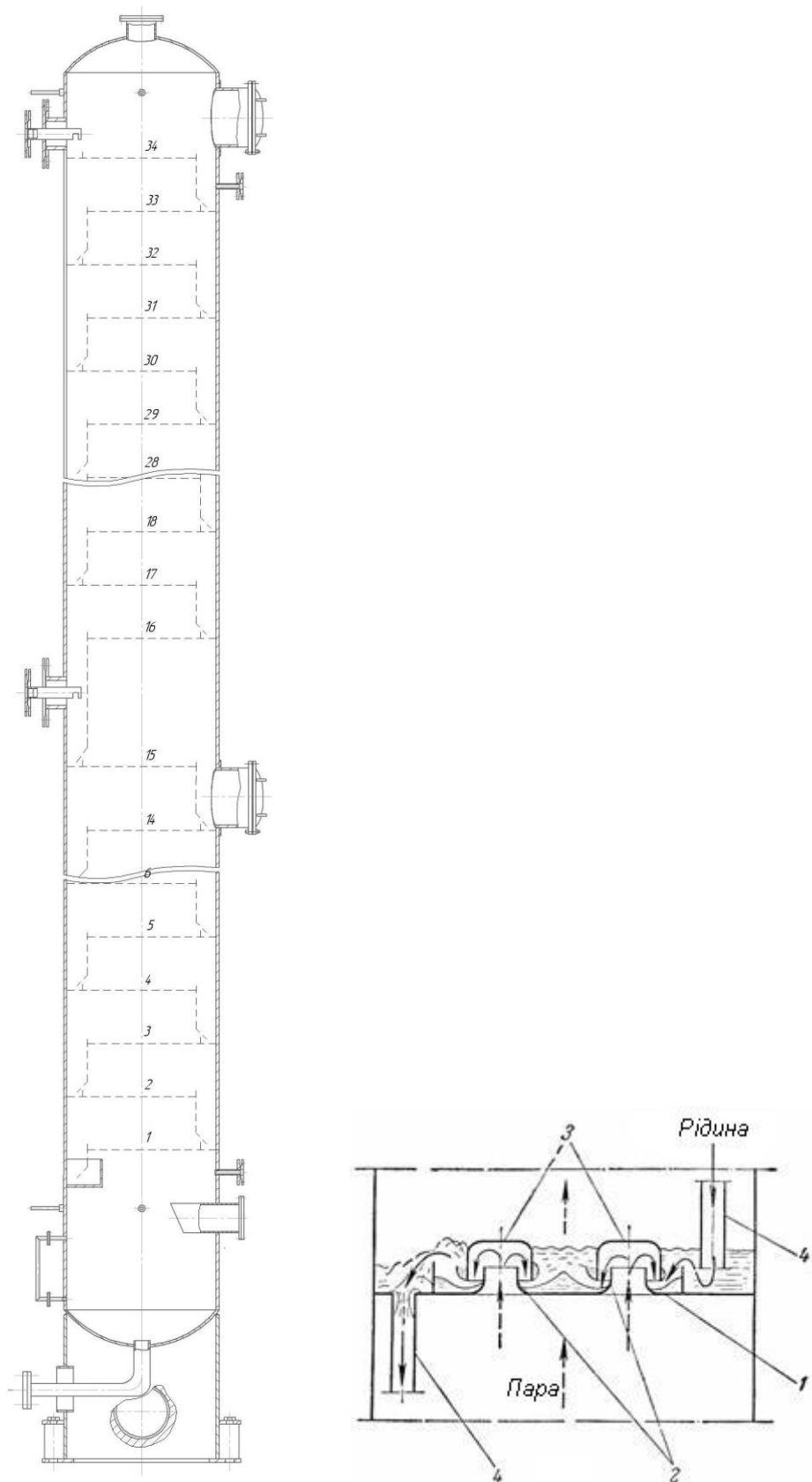


Рисунок 2.4 – Схема тарілчастої ректифікаційної колони
та ескіз ковпачкової тарілки з основними потоками:

1 – полотно; 2 – газові патрубки; 3 – ковпачки; 4 – зливні трубки

Ковпачкові тарілки є стійкими до ударів і видають високий рівень надійності в експлуатації. Це важливо, оскільки ректифікаційні процеси можуть включати різкі зміни тиску і температури. Також обрані тарілки мають конструкцію, яка запобігає заплінюванню і забрудненню внутрішніх каналів. Це дозволяє підтримувати ефективну роботу колони без необхідності частого обслуговування та очищення.

Таким чином, проектувана пропанова колона штуцером живлення умовно поділена на дві основні частини – зміцнюючу (концентраційну) та вичерпну (відгінну). Колона працює під збільшеним тиском, що допомагає зберігати речовини у рідкому стані при підвищених температурах.

У верхній частині колони відбувається відділення пропанової фракції, яка має більшу концентрацію пропану, від фракції C_{4+} , яка містить бутан і пентан. Частина бутану може бути присутня в верхньому продукті, і частина пропану – в нижньому продукті, але основний розділ відбувається між ними.

2.4 Технологічні розрахунки та визначення конструктивних розмірів апарата [5, 9]

Вихідні дані до розрахунку: Продуктивність за сировиною 50000 кг/год. Склад сировини (% мол.): CH_4 – 0,4; C_2H_6 – 0,7; C_3H_8 – 37,5; $n-C_4H_{10}$ – 42,7; $n-C_5H_{12}$ – 18,7. Вміст $n-C_4H_{10}$ у дистилаті не більше, ніж 1 % мол., вміст C_3H_8 у кубовому залишку не більше, ніж 4 % мол. Сировина подається в колону за температури $80^\circ C$, початкова температура води в конденсаторі $15^\circ C$.

Таблиця 2.1 – Склад вуглеводневої сировини

Компонент	Молекулярна маса, M_i	Концентрація X_{f_i} , мол. дол.	$M_i \cdot X_{f_i}$	Концентрація $x_{f_i} = \frac{M_i \cdot X_{f_i}}{\sum M_i \cdot X_{f_i}}$, мас. дол.	Витрати	
					g_{f_i} , кг/год.	G_{f_i} , кмоль/год.
CH_4	16	0,004	0,064	0,00116	58,1776	3,6361
C_2H_6	30	0,007	0,21	0,00382	190,895	6,36317
C_3H_8	44	0,375	16,5	0,3	14998,9	340,884
$n-C_4H_{10}$	58	0,427	24,77	0,45	22512,9	388,154
$n-C_5H_{12}$	72	0,187	13,46	0,245	12239,1	169,988
Σ	–	1,0	55,00	1,0	50000	909,025

Таблиця 2.2 – Матеріальний баланс пропанової колони

Компонент	Дані по сировині					
	Концентрація x_{f_i} , мас. дол.	Витрати		Концентрація $X_{f_i} = \frac{G_{f_i}}{G_f}$, мол. дол.	$M_i \cdot X_{f_i}$	
		$g_{f_i} = g_f \cdot x_{f_i}$, кг/год.	$G_{f_i} = \frac{g_{f_i}}{M_i}$, кмоль/год.			
CH ₄	0,00116	58,1776	3,6361	0,004	0,064	
C ₂ H ₆	0,00382	190,895	6,36317	0,007	0,21	
C ₃ H ₈	0,3	14998,9	340,884	0,375	16,5	
n-C ₄ H ₁₀	0,45	22512,9	388,154	0,427	24,77	
n-C ₅ H ₁₂	0,245	12239,1	169,988	0,187	13,46	
Σ	1,0	50000	909,025	1,0	$M_f = 55,00$	
Дані по дистилату						
Компонент	Ступінь вилучен- ня ϕ_{d_i} , мол. дол.	Витрати		Концентрація		$M_i \cdot X_{d_i}$
		$G_{d_i} = G_{f_i} \cdot \phi_{d_i}$, кмоль/год.	$g_{d_i} = G_{d_i} \cdot M_i$, кг/год.	$x_{d_i} = \frac{g_{d_i}}{g_d}$, мас. дол.	$X_{d_i} = \frac{G_{d_i}}{G_d}$, мол. дол.	
CH ₄	1,0	3,6361	58,2	0,004	0,011	0,176
C ₂ H ₆	1,0	6,36317	190,9	0,013	0,019	0,57
C ₃ H ₈	0,96	327,25	14399	0,968	0,959	42,196
n-C ₄ H ₁₀	0,01	3,88	225	0,015	0,011	0,638
n-C ₅ H ₁₂	0	0	0	0	0	0
Σ	–	341,13	≈ 14873	1,0	1,0	$M_d = 43,58$
Дані по кубовому залишку						
Компонент	Ступінь вилучен- ня ϕ_{w_i} , мол. дол.	Витрати		Концентрація		$M_i \cdot X_{w_i}$
		$G_{w_i} = G_{f_i} \cdot \phi_{w_i}$, кмоль/год.	$g_{w_i} = G_{w_i} \cdot M_i$, кмоль/год.	$x_{w_i} = \frac{g_{w_i}}{g_w}$, мас. дол.	$X_{w_i} = \frac{G_{w_i}}{G_w}$, мол. дол.	
CH ₄	0	0	0	0	0	0
C ₂ H ₆	0	0	0	0	0	0
C ₃ H ₈	0,04	13,64	600,16	0,017	0,024	1,056
n-C ₄ H ₁₀	0,99	384,27	22287,66	0,634	0,677	39,266
n-C ₅ H ₁₂	1,0	169,988	12239,14	0,348	0,299	21,528
Σ	–	567,9	≈ 35127	1,0	1,0	$M_w = 61,85$

Матеріальний баланс пропанової ректифікаційної колони, відповідно умов поділу, наведено в табл. 2.2.

Тиск у колоні. Приймаємо, що температура дистилату в ємності зрощення на 12°C перевищує початкову температуру води, що охолоджує:

$$t_0 = t_g + 12, \quad (2.8)$$

$$t_0 = 15 + 12 = 27^\circ \text{C} = 300\text{K}.$$

Тиск в ємності для зрошення колони визначаємо методом поступового наближення за рівнянням рівноваги фаз:

$$\sum_1^4 k_i x'_{Di} = 1 \quad (2.9)$$

При цьому підбираємо таке значення тиску, при якому константи фазового рівноваги для температури 300К після підстановки їх у це рівняння перетворюють його на тотожність.

Таким тиском буде:

$$p_0 = 1,39 \cdot 10^6 \text{ Па (13,9 ат)}.$$

Константи фазової рівноваги тут і надалі визначаються за номограмою.

Таблиця 2.3 – Розрахунок тиску

Компонент дистиллят	k_i при $T_0 = 300 \text{ К}$ и $p_0 = 1,39 \cdot 10^6 \text{ Па}$ (13,9 ат)	$x'_{Di} = y'_{Di}$ (из табл. 1.2)	$k_i x'_{Di}$
CH ₄	11,55	0,011	0,127
C ₂ H ₆	2,56	0,019	0,049
C ₃ H ₈	0,86	0,96	0,826
n-C ₄ H ₁₀	0,27	0,01	0,003
Сума	—	1,0	1,004 ≈ 1,0

Із урахуванням гідравлічних втрат у трубопроводі від колони до ємності зрошення, тиск вгорі колони приймаємо на 0,02 МПа більше, тобто $1,39 + 0,02 = 1,41$ МПа.

Температуру верху колони визначаємо методом поступового наближення за рівнянням рівноваги фаз:

$$\sum_1^4 \frac{y'_{Di}}{k_i} = 1 \quad (2.10)$$

Шляхом підбору такого її значення, при якому константи фазової рівноваги для тиску 1,41 МПа, будучи підставлені на це рівняння, перетворюють його на тожність. Така температура становить 306 К.

Таблиця 2.4 – Розрахунок температури верху колони

Компоненті дистиллята	k_i при $T_D=306$ К и $\pi_D=1,41 \cdot 10^6$ Па (14,1 ат)	$x'_{Di} = y'_{Di}$ (табл. 1.2)	$\frac{y'_{Di}}{k_i}$
CH ₄	12,2	0,01098	0,000900244
C ₂ H ₆	2,8	0,01922	0,00686436
C ₃ H ₈	1	0,96	0,96
n-C ₄ H ₁₀	0,3	0,01	0,033333333
Сумма		1,000203 ≈ 1,0	1,001097 ≈ 1,0

Враховуючи гідравлічний опір тарілок, приймаємо тиск в нижній частині колони на 0,04 МПа більше тиску π_D , тобто 1,41+0,04=1,45 МПа.

Температуру низу колони визначаємо методом поступового наближення за рівнянням рівноваги фаз:

$$\sum_3^5 k_i x'_{Ri} = 1 \quad (2.11)$$

Шляхом підбору такого її значення, при якому константи фазової рівноваги для тиску 1,45 МПа, будучи підставлені на це рівняння, перетворюють його на тожність. Така температура становить 353 К.

Таблиця 2.5 – Розрахунок температури низу колони

Компоненти залишку	k_i при $T_R=353$ К и $\pi_R=1,45 \cdot 10^6$ Па (14,5 ат)	x'_{Ri} (табл. 1.2)	$k_i x'_{Ri}$
C ₃ H ₈	2,62	0,04168	0,10920
n-C ₄ H ₁₀	1,12	0,6642	0,74390
n-C ₅ H ₁₂	0,5	0,29412	0,14705
Сумма	—	1,0000	1,00016 ≈ 1,0

Режим мінімального зрошення є другим з граничних теоретичних можливих, у якому число теоретичних тарілок у колоні дорівнює нескінченості. Так само, як і при розрахунку колони для розподілу бінарної суміші, у випадку багатокомпонентної системи необхідно визначити мінімальне флегмове число або мінімальне парове число.

Визначення мінімального флегмового числа r_{\min} для зміцнюючої частини колони будемо вести за рівняннями Андервуда методом поступового наближення, знаючи склад вихідної сировини, мольну частку відгону та склади верхнього та нижнього продуктів колони.

За рівнянням Андервуда:

$$\sum_1^5 \frac{\alpha_i c_i'}{\alpha_i - \varphi} = e' \quad (2.12)$$

методом підбору знаходимо параметр φ , беручи значення для компонентів системи при середній температурі в колоні $T = 353$ К та значення c_i' .

Задамося значенням $\varphi = 1,52$, що лежить між величинами відносних летючостей $\alpha_3 = 2,37$ та $\alpha_4 = 1$ пропану та бутану, які розподілені між верхнім та нижнім продуктами колони, та проведемо розрахунок за написаним вище рівнянням.

Мінімальне флегмове число. Цей показник роботи колони знаходиться з рівняння Андервуда:

$$r_{\min} = \sum_1^4 \frac{\varphi y_{Di}'}{\alpha_i - \varphi} \quad (2.13)$$

$$r_{\min} = 1,52 \left(\frac{0,011}{20 - 1,52} + \frac{0,019}{5,82 - 1,52} + \frac{0,96}{2,37 - 1,52} + \frac{0,01}{1 - 1,52} \right) = 1,695$$

Мінімальне парове число для зміцнюючої частини:

$$-s_{\min} = \frac{\frac{D}{G} + (1 - e') - \frac{R}{G}}{\frac{R}{G}} = \frac{0,364 \cdot 1,695 + (1 - 0,17) - 0,636}{0,636} = -1,275$$

$$S_{\min} = 1,3$$

Робоче флегмове число $r = 2$ по усій висоті зміцнюючої частини колони приймаємо постійним.

Робоче парове число для відгінної частини:

$$s = \frac{r \frac{D}{G} + (1 - e') - \frac{R}{G}}{\frac{R}{G}} = \frac{0.364 \cdot 2 + (1 - 0.17) - 0.636}{0.636} = 1.45 \quad (2.14)$$

Теплові (енергетичні) баланси.

При відомих різних рівнів колони тисках і температурах розрахуємо коефіцієнти відносної летючості компонентів, значення яких використовуються в усіх подальших розрахунках. За еталонний компонент, тобто компонент із відносною летючістю, що дорівнює одиниці, прийmemo бутан (четвертий компонент вихідної системи).

Тиск живильної секції колони прийmemo рівним середньоарифметичному:

$$\pi_f = \frac{\pi_D + \pi_R}{2} = \frac{1.41 \cdot 10^6 + 1.45 \cdot 10^6}{2} = 1.44 \cdot 10^6 \text{ Па (14,4 ат)}$$

Коефіцієнт відносної летючості для будь-якого компоненту обчислюємо за такою формулою:

$$\alpha_i = \frac{k_i}{k_4} \quad (2.15)$$

Для зміцнюючої частини колони знаходимо середнє значення коефіцієнт відносної летючості за такою формулою:

$$\alpha_{i \text{ ср}} = 0,5 (\alpha_{iD} + \alpha_{iF}) \quad (2.16)$$

Для відгінної частини колони знаходимо середнє значення коефіцієнта відносної летючості за такою формулою:

$$\alpha_{i \text{ ср}} = 0,5 (\alpha_{iF} + \alpha_{iR}) \quad (2.17)$$

Таблиця 2.6 – Розрахунок параметрів для пропанової колони

Компонент	Змішувача частина					Відгінна частина		
	k_i при $T_f=353$ К, $\pi_f=1,45 \cdot 10^6$ Па (14,8 ат)	α_{if} при $T_f=353$ К, $\pi_f=1,45 \cdot 10^6$ Па (14,8 ат)	k_i при $T_D=314$ К, $\pi_D=1,43 \cdot 10^6$ Па (14,6 ат)	α_{iD} при $T_D=314$ К, $\pi_D=1,43 \cdot 10^6$ Па (14,6 ат)	α_i ср	k_i при $T_R=383$ К, $\pi_R=1,47 \cdot 10^6$ Па (15 ат)	α_{iR} при $T_R=383$ К, $\pi_R=1,47 \cdot 10^6$ Па (15 ат)	α_i ср
CH ₄ . . .	14,6	19,8	12,2	36,95	28,375	15,8	14,1	16,95
C ₂ H ₆ . . .	4,28	5,8	2,8	8,3	7,05	5,35	4,75	5,275
C ₃ H ₈ . . .	1,73	2,35	1	2,8	2,575	2,62	2,3	2,325
n-C ₄ H ₁₀ . . .	0,72	0,98	0,3	0,95	0,965	1,12	0,95	0,965
n-C ₆ H ₁₂ . . .	0,255	0,375	0,11	0,38	0,3775	0,5	0,442	0,4085

Мольну частку відгону e' вихідної сировини та складу фаз при температурі 353 К та тиску 1,45 МПа розраховуємо аналітичним методом Трегубова за формулами:

$$\sum_1^5 x'_i = \sum_1^5 \frac{c'_i}{1 + e' (k_i - 1)} = 1 \quad (2.18)$$

$$\sum_1^5 y'_i = \sum_1^5 k_i x'_i = 1 \quad (2.19)$$

Шляхом підбору такого значення e' , за якого задовольняються ці рівності. Таким значенням мольної частки відгону буде $e' = 0,17$. Результати розрахунків зведено у табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Розрахунки мольної частки відгону e'

Компоненти сировини	Склад сировини c'_i	k_i при $T_f=353$ К, $\pi_f=1,45 \cdot 10^6$ Па (14,8 ат) (табл. 1.6)	$1 + e' (k_i - 1)$ ($e' = 0,17$)	$x'_i = \frac{c'_i}{1 + e' (k_i - 1)}$	$y'_i = k_i x'_i$
CH ₄	0,004	14,6	3,312	0,00120	0,01763
C ₂ H ₆	0,007	4,28	1,5576	0,00449	0,01923
C ₃ H ₈	0,375	1,73	1,1241	0,33360	0,57713
n-C ₄ H ₁₀	0,427	0,72	0,9524	0,44834	0,32281
n-C ₆ H ₁₂	0,187	0,255	0,87335	0,21411	0,0546
Сумма	1,0000	—	—	0,9984 \approx 1	0,99140159 \approx 1

Число теоретичних тарілок колони та її частин. Мінімальне число теоретичних тарілок в колоні визначається за рівнянням Фенске-Андервуда в розрахунку на те, що легким ключовим компонентом за умовами поділу є пропан (C_3H_8), а важким ключовим – бутан (C_4H_{10}):

$$N = \frac{\lg \frac{y'_{D3} x'_{R4}}{x'_{R3} y'_{D4}}}{\lg \frac{\alpha_3}{\alpha_4}} = \frac{\lg \frac{0,96 \cdot 0,734}{0,0417 \cdot 0,01}}{\lg \frac{2,35}{1}} = 8,699 \text{ тарілки} \quad (2.20)$$

Число теоретичних тарілок в колоні знаходимо за рівнянням:

$$N = 1,7 \cdot N_{\min} + 0,7; \quad (2.21)$$

$$N = 1,7 \cdot 8,699 + 0,7 = 15,49.$$

Числа теоретичних тарілок в зміцнюючій та відгінній частинах колони визначаються на основі емпіричної формули Керкбрайда:

$$\begin{aligned} \lg \frac{N_r}{N_s} &= 0,206 \lg \left(\frac{R'}{D'} * \left(\frac{x'_{T.K.}}{x'_{L.K.}} \right) \left(\frac{x'_{R.L.K.}}{x'_{L.L.K.}} \right)^2 \right) \\ &= 0,206 * \lg \left(\frac{63,58}{36,42} * \frac{64}{36} * \left(\frac{0,127 + 0,049}{0,294} \right)^2 \right) = 0,0095 \end{aligned}$$

Звідки маємо:

$$N_r = 1,012 N_s$$

Оскільки з проведеного вище розрахунку $N_r + N_s = 17$, розв'язання двох послідовних рівнянь дає $N_r = 9$, $N_s = 8$.

$$\begin{aligned} M_{V_m} &= \sum_1^5 M_i y'_{mi} \quad (\text{поток } V_m) \\ M_{g_k} &= \sum_1^5 M_i x'_{ki} \quad (\text{поток } g_k) \\ M_D &= \sum_1^4 M_i y'_{Di} \quad (\text{поток } D \text{ и } g_0) \end{aligned}$$

Для визначення ентальпій потоків розрахуємо їх середні молекулярні маси. Необхідні розрахунки зводимо у табл. 2.8.

Таблиця 2.8 – Розрахунки середніх молекулярних мас потоків

Компоненти сировини	M_i	Потоки D и g_D		Поток g_K		Поток V_m	
		y_{Di}^f	$M_i y_{Di}^f$	x_{Ki}^f	$M_i x_{Ki}^f$	y_{mi}^f	$M_i y_{mi}^f$
C_2H_6	30	0,01922	0,577	0,0017	0,051	0,008	0,234
C_3H_8	44	0,96	42,24	0,372	16,368	0,57	25,08
$n-C_4H_{10}$	58	0,01	0,58	0,56	32,48	0,375	21,75
$n-C_5H_{12}$	72			0,07	5,04	0,047	3,384
Сумма	—	$0,9986 \approx 1$	$M_D = 43,57$	$1,00387 \approx 1$	$M_{g_K} = 53,94$	$1,003 \approx 1$	$M_{V_m} \approx 50,5$

Користуючись графіком ентальпій сумішей легких вуглеводів за температурами, тисками (для парів) та молекулярним масам потоків, знаходимо ентальпії останніх (у ккал/кг) і перераховуємо їх у кДж/кмоль. У результаті отримаємо:

$$Q_D = 542 \cdot 43,57 = 23614 \text{ кДж/кмоль};$$

$$q_K = 318 \cdot 53,94 = 17152 \text{ кДж/кмоль};$$

$$Q_m = 622 \cdot 50,5 = 34411 \text{ кДж/кмоль};$$

$$q_0 = 213 \cdot 43,57 = 9280 \text{ кДж/кмоль}.$$

Відомо, що при роботі колони з повним конденсатором-холодильником, флегма що стікає з верхньої тарілки, є гарячим зрошенням на верху колони, так оскільки температура флегми $T_1 = T_D$. У разі роботи колони з парціальним конденсатором, флегма утворюється в останньому. Кількість гарячого зрошення верха колони визначається за формулою:

$$g_1 = g_0 \frac{Q_D - q_0}{Q_D - q_D} \quad (2.22)$$

За графічною залежністю знаходимо $q_D = 226 \cdot 43,57 = 9846 \text{ кДж/кмоль}$.

$$q_1 = 91 \cdot (23614 - 9280) / (23614 - 9846) = 94,7 \text{ кДж/кмоль.}$$

Діаметр колони. Найбільш навантаженим за парою перетином колони буде перетин під нижньою тарілкою, воно і приймається за розрахункове.

Внутрішній діаметр колони розраховуємо за формулою:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot V_{сек}}{\pi \cdot w'}}, \quad (2.23)$$

де $V_{сек}$ – максимальний секундний обсяг парів, що проходять через перетин колони, $\text{м}^3/\text{с}$;

w' – робоча швидкість парів у повному перерізі колони, $\text{м}/\text{с}$.

Секундний обсяг парів в розрахунковому перерізі колони при температурі $t_w = 112^\circ \text{C}$ і тиску $P_w = 1,49 \text{ МПа}$ визначаємо за формулою:

$$V_{сек} = \frac{G_{V0} \cdot 22,4 \cdot (t_w + 273) \cdot 0,1 \cdot Z}{3600 \cdot 273 \cdot P_w}; \quad (2.24)$$

$$V_{сек} = \frac{1196,3 \cdot 22,4 \cdot 321 \cdot 0,1 \cdot 0,8}{3600 \cdot 273 \cdot 1,43} = 0,48 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

Граничну швидкість парів в розрахунковому перерізі знаходимо за формулою:

$$w = C \cdot \sqrt{\frac{\rho_p - \rho_n}{\rho_n}}, \quad (2.25)$$

де ρ_p , ρ_n – густини рідини та пари в розрахунковому перерізі, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Маючи на увазі, що дистилят колони практично повністю складається з пропану, знайдемо його густину в рідкому та пароподібному станах при температурі та тиску на верху колони: $\rho_p = 460 \text{ кг/м}^3$, $\rho_n = 34 \text{ кг/м}^3$.

Приймаючи відстань між тарілками колони $h_m = 400 \text{ мм}$ за графіком знайдемо значення коефіцієнта $C = 0,054$.

$$w = 0,054 \cdot \sqrt{\frac{460 - 34}{34}} = 0,191 \text{ м/с.}$$

Тоді внутрішній діаметр колони дорівнюватиме:

$$D = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,48}{3,14 \cdot 0,191}} = 1,789 \text{ м.}$$

Згідно нормального ряду діаметрів приймаємо діаметр пропанової колони $D = 1800 \text{ мм}$.

Число робочих тарілок у колоні.

Для визначення ККД тарілки розраховуємо комплекс $w \cdot \sqrt{\rho_n}$:

$$w \cdot \sqrt{\rho_n} = 0,191 \cdot \sqrt{34} = 1,11.$$

ККД тарілки визначаємо за графічною залежністю: $\eta_T = 0,5$.

Тоді число робочих тарілок дорівнюватиме:

- в зміцнюючій частині

$$N_{BP} = \frac{N_r}{\eta_T}; \tag{2.26}$$

$$N_{BP} = \frac{9}{0,5} = 18 \text{ шт.}$$

- у відгінній частині

$$N_{HP} = \frac{N_s}{\eta_T}; \quad (2.27)$$

$$N_{HP} = \frac{8}{0,5} = 16 \text{ шт.}$$

Загальна кількість робочих тарілок у колоні:

$$N_P = N_{BP} + N_{HP}; \quad (2.28)$$

$$N_P = 18 + 16 = 34.$$

Висота колони.

На підставі практичних даних відстань між кришкою колони та її верхньою тарілкою приймається $h_1 = 1,0 \text{ м}$; відстань між днищем і нижньою тарілкою $h_4 = 1,5 \text{ м}$ (задля забезпечення трьох-чотирьох хвилинного запасу кубової рідини внизу колони).

Таким чином, висота зміцнюючої частини складе:

$$h_2 = (N_{BP} - 1) \cdot h_T; \quad (2.29)$$

$$h_2 = (18 - 1) \cdot 0,4 = 6,8 \text{ м.}$$

Висота відгінної частини:

$$h_3 = (N_{HP} - 1) \cdot h_T; \quad (2.30)$$

$$h_3 = (16 - 1) \cdot 0,4 = 6,0 \text{ м.}$$

Також по висоті колони передбачено встановлення 5 оглядових люків. Самий верхній люк встановлено над самою верхньою тарілкою, а 4 інших більш-менш рівномірно розміщені по висоті колони. Відстань між тарілками в місцях установки люків складає 600 мм. Також секція живлення, куди подається вихідна суміш на розділення, має висоту 1200 мм. Таким чином, до розрахунку загальної висоти колони слід додати $h_5 = 1,5\text{ м}$.

Отже, робоча висота колони складе:

$$H_p = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5; \quad (2.31)$$

$$H_p = 1,0 + 6,8 + 6,0 + 1,5 + 1,5 = 16,8\text{ м}.$$

Діаметри штуцерів.

Для всіх потоків по входу-виходу продуктів в проектуваному апараті приймаємо стандартний штуцер із приварним фланцем встик і тонкостінним патрубком.

Згідно рекомендацій приймаємо швидкість руху рідини в трубопроводі $w_p = 1,5 \dots 2\text{ м/с}$, а швидкість руху пари $w_n = 25\text{ м/с}$. Діаметр штуцера визначаємо за формулою:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \rho \cdot w}}, \quad (2.32)$$

де G – масова витрата потоку, кг/с;

w – швидкість руху рідини або пари в трубопроводі, м/с.

Патрубок подачі вихідної сировини:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 50000}{3600 \cdot 0,785 \cdot 460 \cdot 2}} = 0,139\text{ м},$$

приймаємо штуцер $D_y = 150\text{ мм}$.

Патрубок виходу кубової рідини:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 50000 \cdot 0,636}{3600 \cdot 3,14 \cdot 420 \cdot 2}} = 0,116 \text{ м},$$

приймаємо штуцер $D_y = 150$ мм.

Патрубок подачі зрошення:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 50000 \cdot 0,364}{3600 \cdot 3,14 \cdot 540 \cdot 1,5}} = 0,089 \text{ м},$$

приймаємо штуцер $D_y = 100$ мм.

Патрубки входу і виходу парів:

$$d_u = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,371}{3,14 \cdot 25}} = 0,137 \text{ м},$$

приймаємо штуцер $D_y = 150$ мм.

2.5 Гідравлічні розрахунки [10]

За рекомендаціями гідравлічний опір тарілок колони розраховуємо за формулою:

$$\Delta P_K = \Delta P_H \cdot N_B, \quad (2.33)$$

де ΔP_H – гідравлічний опір тарілки верхньої та нижньої частин колони, Па.

Повний гідравлічний опір однієї тарілки розраховуємо за формулою:

$$\Delta P = \Delta P_C + \Delta P_P + \Delta P_\sigma, \quad (2.34)$$

де ΔP_c – опір сухої тарілки, Па;

ΔP_p – опір шару рідини, Па;

ΔP_σ – опір за рахунок поверхні натягу, Па.

Опір сухої тарілки розраховується як:

$$\Delta P_{сн} = \frac{\xi * \omega^2 * \rho_{пн}}{2 * F_c^2} \quad (2.35)$$

де ξ – коефіцієнт опору сухих тарілок, $\xi = 5,4$;

F_c – відносний вільний переріз тарілки, $F_c = 0,109$.

$$\Delta P_{сн} = \frac{5,4 * 0,161^2 * 38}{2 * 0,109^2} = 223 \text{ Па}$$

Тоді опір сухої тарілки складе:

$$\Delta P_{рн} = \rho_{рн} g h_0 \quad (2.36)$$

$$\Delta P_{рн} = 460 * 9,81 * 0,043 = 194 \text{ Па}$$

Прийmemo за розрахункові значення поверхневого натягу рідини для верхньої та нижньої частини колони:

$$\sigma_n = 3,7 * 10^{-3} \frac{\text{Н}}{\text{м}}$$

Гідравлічний опір, обумовлений силами поверхневого натягу, для верхньої та нижньої частини колони:

$$\Delta P_{сн} = \frac{4\sigma_n}{d_{отв}} = \frac{4 * 3,7 * 10^{-3}}{0,003} = 4,93 \text{ Па.}$$

Тоді повний опір однієї тарілки верхньої та нижньої частин колони:

$$P_n = 223 + 194 + 4,93 = 421,93 \text{ Па}$$

Повний гідравлічний опір ректифікаційної колони:

$$\Delta P_K = 421,93 \cdot 34 = 14345,62 \text{ Па.}$$

2.6 Вибір допоміжного обладнання [11, 12]

Розрахунок і вибір насоса для подачі флегми в пропанову колону (на рис. 2.1 поз. Н₄). Для всмоктуючого та нагнітаючого трубопроводів приймемо однакову швидкість витікання рідини, що дорівнює $w = 2,5$ м/с.

Діаметр трубопроводу розраховується за рівнянням:

$$d = \sqrt{\frac{V}{0,785 \cdot w}}, \quad (2.37)$$

де V – об’ємна витрата рідини що перекачується насосом, м³/с.

$$V = \frac{G}{\rho_P}, \quad (2.38)$$

де G – масова витрата рідини що перекачується насосом, кг/с.

$$V = \frac{8,83}{540} = 0,0164 \frac{\text{м}^3}{\text{с}}.$$

$$d = \sqrt{\frac{0,0164}{0,785 \cdot 2,5}} = 0,091 \text{ м.}$$

Приймаємо діаметр трубопроводу 100 мм.

Знаходимо критерій Рейнольдса для рідини в трубопроводі:

$$\text{Re} = \frac{w \cdot d \cdot \rho_P}{\mu}, \quad (2.39)$$

$$\text{Re} = \frac{2,5 \cdot 0,1 \cdot 540}{0,019} = 7105.$$

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

Тоді:

$$e = \frac{\Delta}{d} = \frac{2 \cdot 10^{-4}}{0,1} = 0,002. \quad (2.40)$$

Далі одержимо:

$$\frac{1}{e} = 500; \quad 560 \cdot \frac{1}{e} = 280000; \quad 10 \cdot \frac{1}{e} = 5000; \quad (2.41)$$

Коефіцієнт гідравлічного тертя визначаємо за наступною формулою:

$$\lambda = \frac{64}{\text{Re}}; \quad (2.42)$$

$$\lambda = \frac{64}{7105} = 0,009$$

Знаходимо суму коефіцієнтів місцевих опорів окремо для всмоктуючої та нагнітаючої ліній.

Для всмоктуючої лінії:

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

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2, \quad (2.43)$$

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

Для нагнітаючої лінії:

- 1) вентиль прямоточний $\xi_1 = 0,65$;
- 2) 3 коліна з кутом 90° $\xi_2 = 3 \cdot 1,1 = 3,3$;
- 3) вихід з труби $\xi_3 = 1$.

$$\Sigma \xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3, \quad (2.44)$$

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

Втрачений напір у всмоктуючій лінії визначаємо за такою формулою:

$$h_{П.ВС.} = \left(\lambda \cdot \frac{l}{d_E} + \Sigma \xi \right) \cdot \frac{w^2}{2 \cdot g}, \quad (2.45)$$

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

$$h_{П.ВС.} = \left(0,009 \cdot \frac{12}{0,1} + 2,7 \right) \cdot \frac{2,5^2}{2 \cdot 9,81} = 1,2 \text{ м.}$$

Втрачений напір у нагнітаючій лінії визначаємо як:

$$h_{П.НАГ.} = \left(0,009 \cdot \frac{8}{0,1} + 4,95 \right) \cdot \frac{2,5^2}{2 \cdot 9,81} = 1,8 \text{ м.}$$

Загальні втрати напору:

$$h_{\Pi} = h_{\Pi.ВС.} + h_{\Pi.НАГ.}; \quad (2.46)$$

$$h_{\Pi} = 1,2 + 1,8 = 3,0 \text{ м.}$$

Визначаємо напір насосу за рівнянням:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\rho_p \cdot g} + H_{\Gamma} + h_{\Pi}, \quad (2.46)$$

де $(P_2 - P_1)$ – різниця тисків в апараті та ємності, з якої подається рідина.

У нашому випадку цю різницю приймаємо $(P_2 - P_1) = 0,1 \text{ МПа}$;

H_{Γ} – геометрична висота підйому рідини.

$$H = \frac{0,1 \cdot 10^6}{540 \cdot 9,81} + 10 + 3,0 = 31,8 \text{ м.}$$

Корисну потужність насосу знаходимо за рівнянням:

$$N_{\Pi} = \rho_p \cdot g \cdot Q \cdot H; \quad (2.47)$$

$$N_{\Pi} = 540 \cdot 9,81 \cdot 0,0164 \cdot 31,8 = 2755 \text{ Вт.}$$

Потужність, що повинна розвиватися електродвигуном насосу на вихідному валу при встановленому режимі роботи:

$$N = \frac{N_{\Pi}}{\eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{н}}}, \quad (2.48)$$

де $\eta_n, \eta_{пер}$ – коефіцієнти корисної дії відповідно насоса та передачі від електродвигуна до насосу. Прийmemo $\eta_n = 0,6$ и $\eta_{пер} = 1$, та отримаємо:

$$N = \frac{2755}{1 \cdot 0,6} = 4592 \text{ Вт.}$$

Зробимо свій вибір на користь відцентрового насосу марки X80/60 з такими характеристиками: об'ємна подача насоса 80 м³/год.; напір насоса 60 м; потужність, що використовується насосом 10,0 кВт; частота обертання 64 об/хв.

Розрахунок та вибір ємності для дистиляту (на рис. 2.1 поз. ПЄ₂). Розрахунок об'єму ємності для зберігання дистиляту, враховуючи необхідний резерв часу на одну годину роботи та коефіцієнт заповнення $\psi = 0,8$.

Розрахунковий об'єм ємності:

$$V_{EP} = \frac{G \cdot \tau}{\psi \cdot \rho}, \quad (2.49)$$

де G – загальна витрата дистиляту, $G = 14873$ кг/год.;
 τ – резерв робочого часу, $\tau = 1$ год.

$$V_{EP} = \frac{14873 \cdot 1}{0,8 \cdot 540} = 34,4 \text{ м}^3.$$

Задаємося діаметром ємності $D = 3,2$ м, тоді її висота буде складати:

$$H = \frac{V_{EP}}{0,785 \cdot D^2}; \quad (2.50)$$

$$H = \frac{34,4}{0,785 \cdot 3,2^2} = 4,28 \text{ м.}$$

3 ПРОЕКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Вибір конструкційних матеріалів [13, 14]

При виборі матеріалів для виготовлення хімічних апаратів та машин дуже важливо враховувати різні фактори, такі як механічні властивості, технологічність, хімічна стійкість і теплопровідність. Стандарти та нормативи, такі як ДСТУ 3-17-191-2000, допомагають визначити вимоги до матеріалів у конкретних умовах експлуатації.

Для хімічних процесів, які можуть викликати корозію або інші хімічні реакції, часто використовуються спеціальні корозійностійкі матеріали, такі як нержавіюча сталь або спеціалізовані полімери. Крім того, важливо враховувати температурний режим і тиск, з якими апарат або машина буде працювати, оскільки це може впливати на вибір матеріалу.

Загалом, правильний вибір матеріалу для виготовлення апаратів і машин є критичним для забезпечення безпеки та ефективності хімічних процесів і технологічних виробництв.

Механічні властивості матеріалу, такі як межа міцності, відносне подовження, твердість і ударна в'язкість, мають велике значення, оскільки апарати і машини можуть піддаватися механічному навантаженню або тиску. Температура також може суттєво впливати на ці властивості. Оскільки багато хімічних апаратів мають складну геометрію, зварювання є основним методом з'єднання компонентів. Тому важливо, щоб матеріал був добре зварюваним, і зварювальні роботи виконувалися з високою якістю.

Одні з найбільш важливих властивостей для матеріалів, призначених для хімічних апаратів, це їхній стійкість до корозії. Хімічні реакції з робочим середовищем можуть виснажити матеріал, тому необхідно вибирати матеріали, які можуть стійко переносити хімічну агресію.

Для деяких додаткових процесів важливо враховувати теплопровідність матеріалу, оскільки це може впливати на теплообмін в апаратах. Робочий

температурний діапазон також визначається характеристиками матеріалу. Деякі матеріали підходять для низьких температур, інші – для високих.

Із огляду на вищезазначені критерії, для виготовлення основних деталей та вузлів пропанової колони вибираємо сталь 09Г2С.

Сталь 09Г2С має наступні переваги:

1. Міцність і довговічність. Ця сталь має досить високу межу міцності і відносно подовження, що робить її відмінним вибором для виготовлення конструкцій, які піддаються механічному навантаженню.

2. Зварюваність. Сталь 09Г2С зазвичай легко зварюється і здатна піддаватися зварювальним роботам з високою якістю. Це важливо для хімічних апаратів, які зазвичай складні за формою і мають складні з'єднання.

3. Корозійна стійкість. Хоча сталь 09Г2С може бути менш стійкою до корозії порівняно з деякими іншими матеріалами, вона може бути захищена від корозії за допомогою покриття або спеціальних легованих виділень.

4. Технологічність. Сталь 09Г2С зазвичай доступна і має досить низьку вартість порівняно з іншими матеріалами, що робить її привабливим вибором з точки зору ефективності виробництва.

Вибір вуглецевої сталі марки Вст3 для виготовлення частин колонного апарату, які не контактують з робочим середовищем, може бути раціональним рішенням. Вуглецева сталь має кілька переваг у таких випадках:

1. Міцність. Вуглецева сталь має досить високу межу міцності, що робить її стійкою до механічних навантажень та деформацій.

2. Доступність і вартість. Вуглецева сталь, зазвичай, є доступною і має низьку вартість порівняно з деякими іншими матеріалами.

3. Зварюваність. Вуглецеву сталь легко зварювати, що дозволяє створювати складні форми та з'єднання без значних ускладнень.

4. Технологічність. Цей матеріал зазвичай є досить технологічним у виготовленні деталей та компонентів, що не контактують з робочим середовищем.

Для виготовлення прокладок в хімічному обладнанні використання фторопласту-4 (PTFE) є відмінним вибором. Фторопласт-4 володіє високою стійкістю до багатьох хімічних речовин. Це робить його ідеальним матеріалом для використання в хімічному обладнанні, де важлива стійкість до корозії. Фторопласт-4 може витримувати високі температури без деформації або розкладання, що робить його придатним для використання в різних термічних умовах. Також він має низький коефіцієнт тертя, що сприяє зменшенню зносу і забезпечує довгий термін служби прокладок. Цей матеріал є добрим ізолятором і не проводить електрику, що важливо в деяких хімічних процесах і умовах.

Фторопласт-4 є непроникним для багатьох речовин, що робить його безпечним для використання в контакті з продуктами, та має високу стійкість до впливу ультрафіолетового випромінювання та вологості, що робить його довговічним матеріалом.

3.2 Розрахунки на міцність та стійкість [15]

Розрахунок товщини стінки циліндричної обичайки колони.

Розрахункова схема циліндричної обичайки представлена на рис. 3.1.

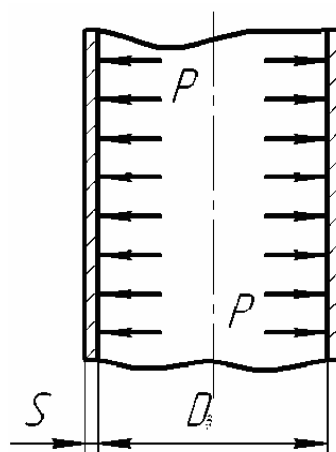


Рисунок 3.1 – Розрахункова схема циліндричної обичайки пропанової колони

Знаходимо величину нормативного допустимої напруги для сталі 09Г2С при розрахунковій температурі: $\sigma^* = 176$ МПа.

Допустиме напруження:

$$[\sigma] = \sigma^* \cdot \eta, \quad (3.1)$$

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

$$[\sigma] = 176 \cdot 1 = 176 \text{ МПа.}$$

Допустиме напруження при гідравлічних випробуваннях:

$$[\sigma]_{II} = \frac{\sigma_T^{20}}{1,1}, \quad (3.2)$$

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

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

Далі визначаємо розрахунковий тиск:

$$P_p = P + P_G, \quad (3.3)$$

де $P = 1,45 \text{ МПа}$ – робочий тиск;

P_G – гідростатичний тиск середовища.

Гідростатичний тиск середовища:

$$P_G = g \cdot \rho_p \cdot H_p; \quad (3.4)$$

$$P_G = 9,81 \cdot 540 \cdot 16,8 = 0,09 \text{ МПа.}$$

$$P_p = 1,45 + 0,09 = 1,54 \text{ МПа.}$$

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

$$P_H = \max \left\{ \frac{1,25 \cdot P_P \cdot [\sigma]_{20}}{[\sigma]}, P_P + 0,3 \right\}, \quad (3.5)$$

де $[\sigma]_{20} = \sigma_{20}^* = 170 \text{ МПа}$ – допустиме напруження сталі 09Г2С при температурі 20°C ($\eta = 1$).

$$P_H = \max \left\{ \frac{1,25 \cdot 1,54 \cdot 170}{176} = 1,85 \text{ МПа}, 1,54 + 0,3 = 1,84 \text{ МПа} \right\} = 1,85 \text{ МПа}.$$

Розрахункова товщина циліндричної обичайки:

$$S_P^H = \max \left\{ \frac{P_P \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - P_P}, \frac{P_H \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_H - P_H} \right\}, \quad (3.6)$$

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

$$S_P^H = \max \left\{ \frac{1,54 \cdot 1800}{2 \cdot 1 \cdot 176 - 1,54} = 7,9 \text{ мм}, \frac{1,85 \cdot 1800}{2 \cdot 1 \cdot 254,4 - 1,85} = 6,6 \text{ мм} \right\} = 7,9 \text{ мм}.$$

Виконавча товщина циліндричної обичайки:

$$S_H \geq S_P^H + c, \quad (3.7)$$

де c – прибавка до розрахункових товщин конструктивних елементів:

$$c = c_1 + c_2 + c_3, \quad (3.8)$$

де c_1 – прибавка для компенсації корозії та ерозії;

c_2 – прибавка для компенсації мінусового допуску;

c_3 – технологічна прибавка.

Приймаємо, що $c_2 = c_3 = 0$. Прибавку для компенсації корозії та ерозії визначаємо за рівнянням:

$$c_1 = \Pi \cdot \tau, \quad (3.9)$$

де $\Pi = 0,12 \frac{\text{мм}}{\text{год}}$ – проникність матеріалу;

$\tau = 10 \text{ років}$ – термін служби апарату.

У результаті отримуємо:

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

$$S_{\text{ц}} = 7,9 + 1,8 = 9,7 \text{ мм}.$$

Приймаємо $S_{\text{ц}} = 10 \text{ мм}$.

Розрахунок товщини стінки еліптичного днища пропанової колони.

Розрахункова схема еліптичного днища представлена на рис. 3.2.

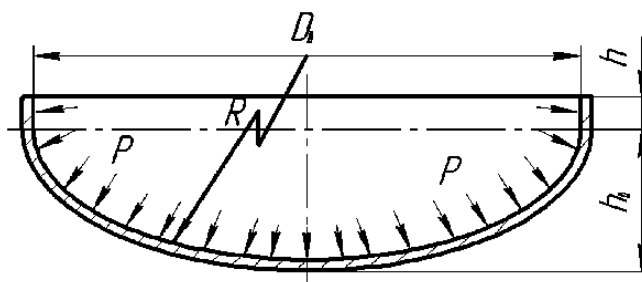


Рисунок 3.2 – Розрахункова схема еліптичного днища пропанової колони

Розрахункова товщина еліптичного днища:

$$S_p^{\text{э}} = \max \left\{ \frac{P_p \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma] - 0,5 \cdot P_p}, \frac{P_{II} \cdot D}{2 \cdot \varphi \cdot [\sigma]_{II} - 0,5 \cdot P_{II}} \right\}, \quad (3.10)$$

$$S_p^{\text{э}} = \max \left\{ \frac{1,54 \cdot 1800}{2 \cdot 1 \cdot 176 - 0,5 \cdot 1,54} = 7,9 \text{ мм}, \frac{1,85 \cdot 1800}{2 \cdot 1 \cdot 254,4 - 0,5 \cdot 1,85} = 6,6 \text{ мм} \right\} = 7,9 \text{ мм}.$$

Виконавча товщина еліптичного днища:

$$S_{\text{э}} \geq S_p^{\text{э}} + c, \quad (3.11)$$

$$S_{\text{э}} = 7,9 + 1,8 = 9,7 \text{ мм}.$$

Так само, приймаємо $S_{\text{э}} = 10 \text{ мм}$.

4 БУДІВЕЛЬНО-МОНТАЖНА ЧАСТИНА

4.1 Обґрунтування компоновання основного та допоміжного обладнання [17]

Правильне розміщення обладнання є дуже важливим, і напрямку відображає ключові аспекти безпечної і ефективної експлуатації промислових об'єктів, зокрема, хімічних заводів та виробництва нафти та газу.

Наведемо декілька конкретних порад та вказівок:

1. *Зони обслуговування та демонтажу.* Розділіть промисловий об'єкт на зони, які забезпечують зручний доступ для обслуговування та можливість демонтажу обладнання при ремонтах. Важливо також передбачити безпечний доступ до апаратів і деталей, щоб персонал міг виконувати свої обов'язки без ризику для здоров'я та безпеки.

2. *Мінімізація трубопроводів.* Спроектуйте трубопроводи так, щоб мінімізувати їхню довжину та кількість з'єднань, що можуть бути джерелом витоків або негерметичності. Це також допоможе зменшити опір руху робочих середовищ і енергозатрати на транспортування.

3. *Кліматичні та санітарні умови.* Враховуйте кліматичні умови регіону, де розташований об'єкт, і забезпечуйте необхідну терморегуляцію для підтримання оптимальних температур. Також важливо дотримуватися санітарних норм і забезпечувати чистоту виробничих приміщень та обладнання.

4. *Безпека і охорона праці.* Дотримуйтеся всіх вимог з техніки безпеки та охорони праці, включаючи правила щодо вогнезахисту, електробезпеки, обладнання захисними пристроями тощо. Забезпечуйте обладнання необхідними засобами індивідуального захисту для працівників.

5. *Ефективність та надійність.* Проектуйте обладнання та системи так, щоб забезпечити найвищу ефективність і надійність їхньої роботи. Це включає в себе регулярний технічний огляд та плановий ремонт обладнання.

Забезпечення дотримання цих технологічних вимог допоможе зменшити ризик аварій, покращити продуктивність і забезпечити безпечні умови для персоналу та навколишнього середовища.

Обираючи варіант розташування обладнання на відкритому майданчику, ми враховуємо ряд ключових факторів, які дозволять забезпечити оптимальні умови для газопереробного виробництва. Використання відкритого майданчика дозволяє нам раціонально розташувати обладнання та інфраструктуру, що може сприяти значній економії при будівництві нашого підприємства. Відкритий майданчик забезпечує зручний доступ для монтажу нового обладнання та проведення ремонтних робіт. Це дозволить нам ефективно виконувати роботи з технічного обслуговування та знизити витрати на них.

Компоновка на відкритому майданчику дозволяє ефективно розсіювати викиди газів та тепловиділення, що сприяє зменшенню їхнього впливу на навколишнє середовище та забезпечує дотримання екологічних норм. Відкритий майданчик дозволяє ефективно контролювати вибухи та пожежі, які можуть виникнути на ГПЗ. Ізольована локація об'єкта сприяє зниженню ризику поширення небезпеки. Також відкритий майданчик залишає простір для майбутнього розширення виробничих потужностей та об'єктів, що сприяє динамічному розвитку підприємства.

При обранні розташування обладнання на відкритому майданчику, важливо дотримуватися рекомендацій та керуватися технічними нормами і стандартами безпеки. Ось докладніші вказівки щодо розташування обладнання:

1. Розміщення важкого обладнання. Бажано розташовувати важке і габаритне обладнання на позначці землі, оскільки це забезпечить стійкість та надійність під час експлуатації. Важливо враховувати необхідність високопрочних опорних конструкцій.

2. Використання залізобетонних опор. Для опорних пристроїв рекомендується використовувати типові конструкції залізобетону. Вони відомі своєю міцністю та стійкістю до навантажень і погодних умов.

3. Максимізація несучої здатності стінок. Для великогабаритних апаратів можна максимально використовувати несучу здатність їхніх стінок. Це може включати встановлення етажерок, сходів і майданчиків для обслуговування. Такий підхід дозволить оптимізувати простір і полегшити доступ до обладнання.

4. Розташування на нульовій позначці щодо фундаменту. Усе обладнання слід розміщувати на нульовій позначці щодо загального (групового) фундаменту. Це спрощує процес монтажу та обслуговування.

5. Індивідуальні фундаменти для окремих об'єктів. Ємності, насоси і теплообмінне обладнання, які вимагають додаткової стійкості і стабільності, можуть бути розташовані на індивідуальних фундаментах. Це забезпечить надійну підтримку для цих об'єктів.

Також розміщення обладнання на відкритих майданчиках має враховувати ряд важливих вимог та рекомендацій з метою забезпечення безпеки, зручності обслуговування та ефективності робочих процесів:

Проходи та безпека. Передбачте наявність проходів між обладнанням, щитами і конструкціями таким чином, щоб забезпечити безпечний доступ для обслуговування обладнання, рух людей і транспорту. Мінімальна ширина проходів між найвиступнішими частинами обладнання, щитами і конструкціями повинна бути не менше 1 метра. Це сприяє запобіганню заторам і забезпечує швидкий доступ у разі аварій.

Вібрація та шум. Технологічне обладнання, яке створює вібрацію і шум на робочих місцях, рекомендується встановлювати на спеціальних фундаментах і амортизаторах. Це допомагає знизити вплив вібрації та шуму на працівників і забезпечує комфортні умови роботи.

Групування обладнання. Під час розміщення обладнання рекомендується виділяти групи апаратів, які мають спільні ознаки або призначення. Це сприяє організації робочих зон і полегшує обслуговування. Наприклад, апарати однієї технологічної лінії можуть бути розташовані поруч для зменшення витрат часу на переміщення працівників.

Враховуючи ці вимоги та рекомендації, можна створити безпечну та ефективну робочу обстановку на відкритому майданчику, що сприятиме надійній роботі обладнання та підвищить загальну продуктивність.

Проектування трубопроводів є важливим етапом в процесі створення хімічного обладнання та інженерних систем для транспортування і обробки різних речовин. Виправлення трубопроводів має бути грамотно відпрацьоване для забезпечення безпеки, ефективності та надійності експлуатації.

Під час розробки схеми трубопроводів важливо враховувати фізико-хімічні властивості речовин, які будуть транспортуватися, а також дані, отримані на етапі розрахунку апаратного оформлення процесу. Це дозволяє правильно підібрати матеріали труб, їх діаметри, тиск та температурний режим.

Залежно від призначення та характеристик перекачуваних речовин, трубопроводи поділяються на групи. Це важливо для визначення вимог до матеріалів та безпекових заходів. Зокрема, група I включає трубопроводи для небезпечних речовин, група II – для менш небезпечних, і група III – для інших речовин.

При трасуванні трубопроводів важливо враховувати низку факторів, таких як ефективність, безпека, зручність обслуговування і т. д. Пряма прокладка "від штуцера до штуцера" допускається лише у виняткових випадках, коли інші варіанти неможливі. Шлангові труби слід прокладати так, щоб вони були якнайкоротшими і не перетинали обслуговуючі майданчики апарату.

Треба враховувати технологічні особливості об'єкта і процесу. Наприклад, шланги мають бути розташовані з урахуванням можливих вібрацій та впливу токсичних речовин.

Правила трасування трубопроводів є важливими для забезпечення безпеки та ефективності експлуатації систем транспортування різних речовин:

1. Розміщення в одному пучку. Трубопроводи мають бути розташовані в одному пучку, де перетини труб мають просту форму, такі як горизонтальні або вертикальні ряди. Це дозволяє легше обслуговувати фланцеві з'єднання та інші пристрої.

2. Гарячі трубопроводи. Гарячі трубопроводи, які працюють при підвищених температурах, мають бути розміщені на відстані 3-5 діаметрів труби. Для компенсації температурних напружень на довгих гарячих трубопроводах може бути необхідно використовувати П-подібні ділянки.

3. Запобігання гідравлічним ударам. Для запобігання гідравлічним ударам на довгих трубопроводах слід передбачити можливість відведення рідини з мішків. На газопроводах також необхідно встановлювати дренажні трубки для відведення конденсату.

4. Теплоізоляція. При необхідності, трубопроводи повинні бути теплоізовані. Це допомагає підтримувати температурний режим роботи і запобігає втраті тепла.

4.2 Проведення монтажних та ремонтних робіт основного технологічного обладнання [18, 19]

Монтаж пропанової ректифікаційної колони з ковпачковими тарілками – це складний та важливий етап будівництва, який вимагає дотримання високих стандартів якості та безпеки.

Підготовчі роботи. Перш за все, здійснюється підготовка робочого майданчика. Він повинен бути рівним, міцним і забезпечувати безпечний доступ для робітників і обладнання.

Постачання обладнання. Кожен компонент колони, включаючи ковпачкові тарілки, труби, фланці, насоси, резервуари та інше обладнання, постачається на будівельний об'єкт і перевіряється на відсутність пошкоджень.

Монтаж ковпачкових тарілок. Ковпачкові тарілки встановлюються внутрішньо в колоні. Їх розташування і кількість зазвичай визначаються проектом і технічними специфікаціями. Ковпачкові тарілки служать для збагачення і розподілу парово-рідкого потоку для ефективного ректифікаційного процесу.

Підключення трубопроводів. Трубопроводи для подачі сировини, відведення продуктів і рідини, а також для подачі допоміжних речовин і теплоносіїв підключаються до колони та іншого обладнання.

Електромонтажні роботи. Встановлення і підключення необхідної електричної апаратури для керування та моніторингу процесу ректифікації.

Пусконалагоджувальні роботи. Після завершення монтажу, обладнання перевіряється на правильну роботу, тестується і налаштовується для роботи в режимі ректифікації.

Безпека і охорона праці. Під час монтажу дотримуються всіх правил безпеки і вимог щодо охорони праці. Робочі повинні мати відповідне захисне обладнання і навчання.

Документація та сертифікація. Заповнюється необхідна технічна документація, і обладнання проходить процес сертифікації, якщо це необхідно.

Введення в експлуатацію. Після успішного монтажу та пусконалагодження колона готова до введення в експлуатацію.

Монтаж колонного апарату за допомогою щогол методом ковзання є досить поширеним і надійним способом підняття та розміщення важкого обладнання. Важливо дотримуватися правильної послідовності та методів для забезпечення безпеки та ефективності процесу. Апарат розташовується якнайближче до фундаменту, що спрощує процес підйому. Щогли встановлюються по обидва боки від фундаменту, і їх висота і нахил визначаються враховуючи розташування та розміри апарату, а також метод стропування.

Стропи (спеціальні ліфтингові троси або стропи) правильно розташовуються і фіксуються на апараті. Вони повинні бути розраховані на вагу і габарити апарату. Апарат піднімається за допомогою щоголів та крана. Під час підйому необхідно забезпечити рівномірний і контрольований підйом апарату.

Після підняття апарату за допомогою щоголів, він обертається або ковзається в потрібне положення. Цей процес також вимагає точності і контролю. Після розміщення апарату в потрібному положенні виконується перевірка фіксації і правильності розташування. Всі стропи та підпори мають бути надійно закріплені.

Цей опис процесу підняття та розміщення колонного апарату надзвичайно важливий для забезпечення безпеки та ефективності монтажних робіт. Він показує послідовність дій та методи, які використовуються для встановлення важкого обладнання на фундаменті.

Після підняття апарату до потрібної висоти, його фіксують на фундаменті за допомогою фундаментних болтів. Фундаментні болти зазвичай вбивають у фундамент, і після цього на них намотують гайки для надійного кріплення. Для забезпечення горизонтальності або вертикальності апарату, в деяких випадках можуть використовувати тонкі металеві підкладки. Ці підкладки розміщуються під опорними частинами апарату для компенсації нерівностей.

Після кріплення апарату до фундаменту проводиться вивірка на вертикальність та горизонтальність. Це може виконуватися за допомогою теодолітів або інших точних вимірювальних інструментів. Після досягнення необхідної точності апарату за допомогою вивірки, анкерні болти затягуються для надійного закріплення.

Якщо апарат монтується ізоляцією, то для вивірки вертикальності і горизонтальності використовують репери, які намотують на бобишки, що припаяні до корпусу апарату. Це дозволяє забезпечити точність монтажу навіть при використанні ізоляції.

Після всіх вимірів і вивірок підливають фундамент бетонною сумішшю, яка фіксує апарат на фундаменті і забезпечує стабільність. Після закінчення монтажу та закріплення апарату на фундаменті установлюють контактні пристрої.

Монтаж ректифікаційних тарілок є важливою складовою частиною процесу побудови ректифікаційної колони. Це технологічно складний процес, який вимагає точності та уважності. Перед початком монтажу тарілок необхідно перевірити площину підстав або секцій колони. Місцеві випучини і кривизна не повинні перевищувати 4 мм, оскільки це може вплинути на правильне розташування та функціонування тарілок.

Якщо апарат встановлюється при горизонтальному положенні, тарілки повинні бути встановлені строго вертикально. Їх положення може перевірятися за допомогою схилу та міток, нанесених на внутрішніх стінках апарату. В цьому випадку апарат доводиться повертати навколо осі на 90° для перевірки точності розташування.

Монтаж тарілок рекомендується починати з нижньої частини і продовжувати вгору. Це допомагає забезпечити більше простору для робочих всередині апарату та скорочує час риштування. Під час монтажу звертайте особливу увагу на правильне зварювання опорних елементів і нероз'ємних деталей, таких як кишені, зливи, диски та інші. Зварювання повинно відповідати технічним вимогам. Прокладки можуть використовуватися для забезпечення герметичності з'єднань.

Після збирання тарілок їх поверхню можна обробити для забезпечення герметичності. Також важливо перевірити, чи не виникає витоків під час випробування на герметичність. Важливо враховувати параметри монтажу, такі як відстань між сусідніми тарілками, висоту тарілок, відхилення по кроку між ними та інші геометричні параметри. Усі ці параметри повинні відповідати встановленим стандартам та вимогам.

Глухі місця тарілок та інших внутрішніх пристроїв повинні мати дренажні отвори, розташовані в найнижчих місцях. Це допомагає забезпечити повний злив рідини при припиненні роботи апарату. Тарілка в зборі вважається герметичною, якщо рівень рідини, наливої в тарілку, протягом певного часу не знижується певної величини, і концентрація течі не перевищує допустимі норми.

Підготовка колонного апарату до ремонту є важливим етапом для забезпечення безпеки та ефективності робіт. Під час цього процесу треба виконати:

1. Зниження тиску до атмосферного. Перш ніж розпочати будь-які роботи, необхідно знизити тиск в колоні до атмосферного рівня. Це забезпечить безпечність при подальших операціях і уникне небезпеки викиду робочого середовища.

2. Видалення робочого середовища. Робоче середовище в колоні повинно бути повністю видалене. Це може включати в себе гази, рідини або пари, які працюють у процесі. Видалення робочого середовища допомагає зменшити ризик контакту з шкідливими речовинами.

3. Пропарювання колони водяною парою. Водяна пара використовується для витіснення залишкових парів і газів з колони. Це важливо, оскільки концентрація шкідливих і горючих речовин повинна бути знижена до безпечних рівнів. Пропарювання проводять, вводячи гарячу водяну пару в колону і даючи залишкове робоче середовище.

4. Промивання колони водою. Після пропарювання колону промивають водою. Це сприяє охолодженню колони та видаленню залишкових речовин. Промивання може бути повтореним кілька разів, в залежності від потреби.

5. Заглушки і реєстрація. Після пропарювання і промивання колону від'єднують від всіх апаратів і комунікацій за допомогою глухих заглушок, які встановлюються у фланцевих з'єднаннях штуцерів. Кожну установку заглушки і подальше її зняття слід реєструвати в спеціальному журналі. Це допомагає забезпечити контроль над процесом підготовки колони до ремонту.

Початок ремонту колонного апарату – це критичний момент, і дотримання правил та безпечних процедур має вирішальне значення для запобігання небезпеці та забезпечення успішного ремонту. Люки колонного апарату розкривають послідовно, зверху вниз. Це означає, що спочатку відкривають верхній люк, і лише після того, як він повністю відкритий і апарат провітрюється, можна відкривати наступні люки. Не дозволяйте можливому підсосу повітря при відкриванні люків.

Після провітрювання колони слід взяти проби повітря на різних висотах і проаналізувати їх, щоб переконатися, що концентрація шкідливих газів не перевищує гранично допустимих норм. Це важливо для забезпечення безпеки робочого середовища всередині колони. Після аналізу повітря слід ретельно оглянути зовнішній і внутрішній корпус колони. Приділіть увагу можливим дефектам, таким як механічні пошкодження, тріщини, корозія та інші. Цей огляд допоможе визначити, які роботи потрібно виконати під час ремонту.

Якщо необхідно, для доступу до певних ділянок апарату або для заміни окремих компонентів може бути потрібно розібрати внутрішні пристрої.

Впевніться, що розбірка проводиться обережно і відповідно до інструкцій, і що всі роботи відзначаються в журналі обліку робіт.

Під час розпочатку ремонту завжди дотримуйтеся правил та безпечних практик. Переконайтеся, що всі члени команди розуміють процедури і відомі ризики. Використовуйте необхідне захисне обладнання і додержуйтеся всіх стандартів безпеки.

Ремонт суцільнозварних колон може бути складним і вимагає дотримання великої кількості технічних норм і процедур. Якщо під час огляду було виявлено зношені або пошкоджені деталі, такі як штуцери або люки, їх необхідно вирізати і замінити новими. Під час заміни слід встановлювати зміцнюючі кільця для покращення міцності з'єднань.

Фактичну товщину стінки корпусу апарата слід виміряти і перевірити на відповідність нормам та стандартам. В залежності від ступеня зношеності може знадобитися заміна деяких ділянок корпусу. Нещільнозварні шви або пошкоджені ділянки корпусу слід виправити шляхом вирізування дефектів, зачищення і після цього зварювання нових деталей або ремонтних зварних швів. Дотримання вимог щодо якості зварювання має велике значення для безпеки і надійності апарата.

Під час ремонту дефектних ділянок корпусу може знадобитися зміцнення шляхом встановлення стійок і перетинів, що підтримують міцність та стійкість конструкції. Важливо здійснювати контроль якості зварювання і ремонту, використовуючи методи, такі як магнітна або ультразвукова дефектоскопія. Це допоможе переконатися, що всі зварні шви є надійними і не мають дефектів.

Усі поверхні металу мають бути добре очищені від корозії, фарби або інших дефектів під час ремонту. Це забезпечить максимальну міцність і надійність зварних швів. Під час ремонту слід вимірювати глибину пошкодження деталей і дотримуватися встановлених норм щодо допустимої глибини пошкоджень.

Під час ремонту важливо використовувати якісні матеріали, засоби зварювання та інструменти, щоб забезпечити найкращу якість робіт.

5 АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ

5.1 Опис контрольованих параметрів під час проведення технологічного процесу [20]

Автоматизація виробничих процесів, як відомо, має ряд важливих переваг. Вона значно підвищує продуктивність праці, сприяє поліпшенню технології виробництва та підвищує якість продукції. Також автоматизація сприяє зниженню собівартості виробленої продукції, збільшує продуктивність праці та допомагає зменшити кількість робочої сили, що потребується для виробництва, а також подовжує інтервали міжремонтного обслуговування обладнання.

Газофракціонуюча установка представляє собою безперервний процес, в якому всі основні апарати технологічної схеми з'єднані послідовно. Безперервність виробництва є однією з ключових передумов для автоматизації виробництва. Безперервний процес і автоматизація виробничих операцій є взаємозалежними факторами, оскільки безперервне виробництво стає найбільш ефективним при його комплексній автоматизації.

При проведенні процесу ректифікації в пропановій важливо контролювати чотири основні параметри:

- витрату (F);
- рівень (L);
- температуру (T);
- тиск (P).

Регулювання рівня в кубовій частині системи важливе для запобігання захльобування нижніх тарілок колони. Але при цьому нижні тарілки колони повинні бути належним чином забезпечені сировиною для правильної роботи процесу. Якщо рівень сировини стає занадто високим, це може призвести до надмірного натискання на нижні тарілки, що може викликати аварії та порушення процесу. Щоб запобігти цьому, змінюють витрату виведення сировини з кубової частини системи. На практиці це може означати збільшення або зменшення

витрати сировини, що подається в ректифікаційну колону, залежно від поточних обставин і заданих параметрів. Регулювання цього параметра допомагає підтримувати оптимальний рівень сировини в колоні, забезпечуючи безпеку та ефективну роботу процесу ректифікації.

Контроль рівня також супроводжується контролем тиску і температури, оскільки їх зміна може призвести до аварійних ситуацій або порушень технологічного режиму.

Контроль і сигналізація інших параметрів. Поміж іншими важливими параметрами, які також слід контролювати і сигналізувати про їх стан, включають температуру, витрату, тиск і перепад тиску вихідної сировини, дистиляту та кубового залишку.

При стабільному технологічному режимі існує можливість відмовитися від регулювання за допомогою перепаду тиску і перейти до жорсткого управління за програмою, де задається певна тривалість імпульсів та інтервали між ними. Для цього встановлюють командний прилад.

Загальна ідея автоматизації полягає в тому, що контроль і регулювання параметрів є критичними для забезпечення безпеки та ефективності процесу ректифікації при отриманні технічного пропану і бутану.

5.2 Розроблення системи автоматизованого керування роботою обладнання [20, 21]

Процес ректифікації є одним з основних процесів хімічної технології. Його ефективність визначається складом кінцевого продукту. Залежно від технологічних особливостей, цей кінцевий продукт може бути дистилятом або кубовим залишком. Основною метою управління є забезпечення сталого складу кінцевого продукту. Склад іншого продукту може змінюватися в певних межах через зміни в початковому складі суміші. У подальшому розглядатимемо дистилят як цільовий продукт.

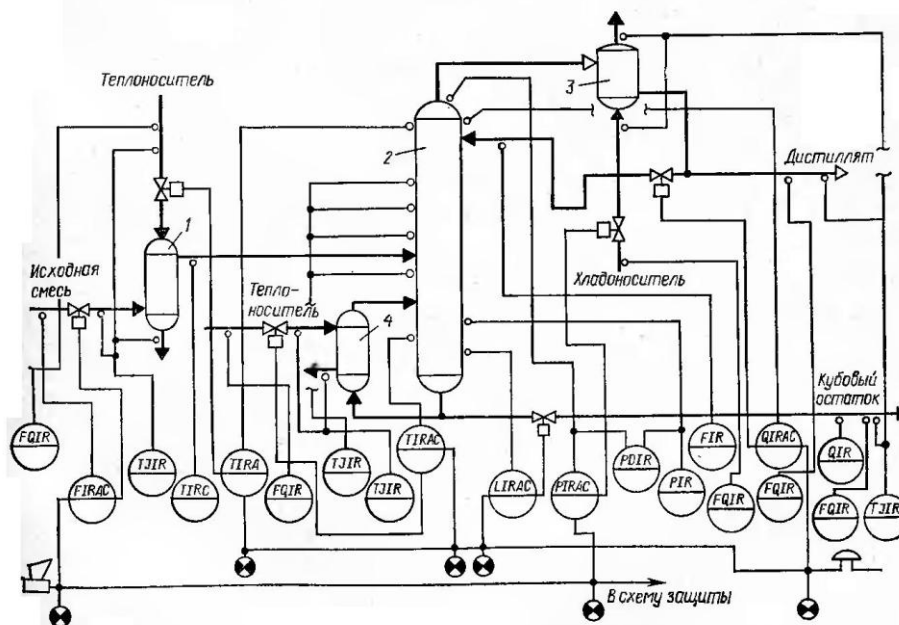


Рисунок 5.1 – Типова схема автоматизації процесу ректифікації:

1 – теплообмінник вихідної суміші; 2 – ректифікаційна колона;

3 – дефлегматор; 4 – кип'ятильник

Ректифікаційна установка є складним об'єктом управління із значним запізненням в часі (наприклад, у деяких випадках вихідні параметри процесу починають змінюватися лише через 1–3 години після зміни параметрів сировини). Вона включає в себе велику кількість параметрів, які характеризують процес, взаємодію між ними, розподіл їх по системі та інші складності.

Ця установка вимагає від операторів інтенсивного контролю і управління через розгалуженість та взаємозалежність процесних параметрів. Успішне управління ректифікаційним процесом вимагає високого рівня фаховості та систематичного моніторингу.

Складність регулювання процесу пояснюється також частотою та амплітудою збурень. В об'єкті відбуваються такі збурення, як зміни початкових параметрів вихідної суміші, а також теплоносіїв і холодоносіїв, зміни властивостей поверхонь теплообміну, відкладення речовин на стінках тощо. Крім того, на технологічний режим ректифікаційних колон, які встановлені під відкритим небом, впливають коливання температури атмосферного повітря.

Концентрація безпосередньо залежить від початкових параметрів вихідної суміші. Зі зміною цих параметрів в процес можуть надходити найсильніші збурення, особливо через канал складу вихідної суміші, оскільки склад визначається попереднім технологічним процесом.

Отже, якщо дистилят є цільовим продуктом, то для досягнення мети управління слід регулювати наступні параметри: витрату вихідної суміші, температуру вихідної суміші, тиск у верхній частині колони, склад рідини в верхній частині колони, температуру і рівень рідини в кубі.

Підходячи до розробки системи автоматизованого управління, першим і важливим кроком є детальне вивчення технологічного процесу. Це включає в себе наступні етапи:

1. Аналіз технологічного процесу. Докладне дослідження всіх аспектів технологічного процесу, включаючи вхідні та вихідні матеріали, послідовність операцій, параметри і обмеження.

2. Виявлення факторів впливу. Визначення ключових факторів, які впливають на характеристики процесу. Це може включати змінні, такі як температура, тиск, витрата, склад сировини тощо.

3. Аналіз взаємозв'язків. Встановлення зв'язків і взаємодій між різними факторами та параметрами процесу. Наприклад, які зміни в одному параметрі можуть впливати на інші аспекти процесу.

4. Визначення цілей і завдань. Сформулювання мети автоматизованого управління і конкретних завдань, які система повинна виконувати. Це може включати покращення ефективності, зниження витрат або забезпечення безпеки.

5. Розробка схеми управління. Основний вихідний пункт – це створення схеми регулювання або управління, яка відповідає поставленим завданням. Ця схема може включати сенсори для вимірювання параметрів, контрольні алгоритми, актуатори для впливу на процес та системи збору і аналізу даних.

6. Розробка програмного забезпечення. На основі схеми управління розробляється відповідне програмне забезпечення, яке виконує необхідні обчислення, приймає рішення та керує актуаторами.

7. Тестування і налагодження. Система автоматизованого управління піддається тестуванню на практиці, і на основі результатів тестів проводяться необхідні корекції і налагодження.

8. Підтримка і оптимізація. Після впровадження системи в експлуатацію важливо забезпечити її постійну підтримку і вдосконалення, щоб забезпечити оптимальну роботу і враховувати зміни в процесі часом.

Пропонований цикл розробки системи автоматизованого управління допомагає забезпечити, що система ефективно виконує поставлені завдання і відповідає вимогам технологічного процесу.

Технічні засоби автоматичного контролю обираються з типової апаратури, яка випускається приладобудівною промисловістю відповідно до технічних характеристик та умов роботи. Це включає в себе такі елементи та прилади:

Сенсори і датчики. Обрані для вимірювання різних параметрів, таких як температура, тиск, рівень, витрата речовини і інші. Наприклад, термометри, манометри, рівнеміри, потокоміри і т. д.

Контрольно-вимірювальні прилади (КВП). Інтегровані пристрої, які забезпечують вимірювання, а також можуть виконувати обчислення та логічні операції для контролю процесу. Наприклад, програмовані контролери логічного керування (ПЛК).

Актuatorи. Механічні пристрої, які впливають на процес згідно з сигналами від контрольно-вимірювальних приладів. Це може бути регулювальний клапан, насос, нагрівач та інші.

Системи збору і аналізу даних. Включають в себе засоби для збору, збереження і аналізу даних з сенсорів і КВП. Це може бути програмне забезпечення для моніторингу та аналізу, а також системи зберігання даних.

Інтерфейси та засоби комунікації. Забезпечують зв'язок між автоматизованою системою керування та операторами, а також з іншими системами управління або мережами передачі даних.

Програмне забезпечення керування. Включає в себе програмне забезпечення для налагодження і контролю системи автоматизованого

управління, включаючи алгоритми регулювання, моніторингу та інтерфейси користувача.

Використання принципу уніфікації в схемі автоматизації дійсно має багато переваг, особливо в умовах вибухо- та пожежонебезпечного виробництва. Однотипні технічні засоби автоматизації дозволяють замінити один пристрій іншим без необхідності внесення значних змін у схему управління. Оператори та технічний персонал знайомі з однотипними приладами, що спрощує їх роботу, навчання та обслуговування. Однотипні прилади можуть мати схожі налаштування та можуть постачатися зі спільними комплектуючими, що спрощує їх впровадження та підтримку. Застосування дешевих і надійних приладів забезпечує економію коштів та забезпечує стабільну роботу системи. Врахування особливостей вибухо- та пожежонебезпечних умов виробництва і вибір пневматичної лінії приладів допомагають забезпечити безпеку та ефективність.

6 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ДОВКІЛЛЯ

6.1 Аналіз небезпечних та шкідливих факторів [22]

Охорона праці на газопереробному заводі (ГПЗ) є надзвичайно важливою для забезпечення безпеки працівників та уникнення аварій та інцидентів. Основні аспекти охорони праці на ГПЗ включають в себе наступні:

1. *Аналіз ризиків та оцінка небезпек.* Проведення аналізу потенційних ризиків та оцінка небезпек допомагають ідентифікувати потенційні загрози для працівників і розробити стратегії їх запобігання.

2. *Внутрішні правила та процедури.* Розроблення і впровадження внутрішніх правил та процедур, що регулюють безпеку та здоров'я працівників, включаючи вимоги до захисту від небезпек хімічних речовин, роботи з вибухонебезпечними матеріалами, інструкції щодо екстрених ситуацій і пожежної безпеки.

3. *Навчання та підготовка працівників.* Забезпечення навчання працівників щодо безпеки на робочому місці, включаючи проходження курсів з першої допомоги, роботи з вогнегасниками та іншими засобами пожежогасіння.

4. *Особистий захист.* Забезпечення працівників відповідними засобами індивідуального захисту (захисний одяг, головні засоби захисту, маски тощо), які необхідні для їх безпеки під час роботи з небезпечними матеріалами та обладнанням.

5. *Контроль за дотриманням стандартів.* Виконання регулярних аудитів та інспекцій, щоб переконатися, що всі норми і стандарти щодо безпеки на ГПЗ дотримуються.

6. *Аварійні та пожежні плани.* Розробка планів дій у випадку аварій, пожеж та інших надзвичайних ситуацій для швидкого та безпечного виходу працівників і врятування життів.

7. *Запобігання забруднення навколишнього середовища.* Проведення заходів для запобігання забруднення навколишнього середовища, включаючи відповідне скидання стічних вод і викидів.

8. *Медичний контроль та обстеження.* Проведення регулярних медичних обстежень працівників, особливо тих, які працюють з небезпечними речовинами.

Аналіз шкідливих факторів на газопереробному заводі (ГПЗ) включає в себе оцінку потенційних ризиків і негативних впливів на здоров'я працівників та навколишнє середовище. Для цього проводяться спеціальні оцінки та аудити. Ось деякі шкідливі фактори, які можуть бути враховані в аналізі ГПЗ:

1. Токсичні речовини. Оцінка виділення і розповсюдження токсичних хімічних речовин у повітря і воду. Особливу увагу приділяються сполукам, які можуть викликати отруєння або інші негативні впливи на здоров'я.

2. Вибухонебезпечні речовини. Оцінка вибухонебезпечності газів і речовин, а також умов, що можуть сприяти вибухам і пожежам на заводі.

3. Шум і вібрація. Аналіз рівнів шуму та вібрації, які можуть впливати на слух та фізичний стан працівників.

4. Тиск і температура. Оцінка впливу високого або низького тиску та температури на працівників та процеси виробництва.

5. Забруднення навколишнього середовища. Оцінка викидів і скидів речовин у повітря, воду та ґрунт, що можуть негативно впливати на екологію регіону.

6. Пожежна безпека. Оцінка систем пожежної безпеки та ризику виникнення пожеж на заводі.

Таблиця 6.1 – Гранично-допустимі концентрації вуглеводнів

Сполуки	Формула	ГДК, мг/м ³	НПВ,% об.	ВПВ,% об.
Метан	CH ₄	300	5,0	15,0
Етан	C ₂ H ₆	22	3,0	12,5
пропан	C ₃ H ₈	65	2,1	9,5
Бутан	C ₄ H ₁₀	300	1,5	8,5
Пентан	C ₅ H ₁₂	300	1,4	7,8
Гексан	C ₆ H ₁₄	300	1,2	7,4

Обслуговуючий персонал установки повинен дотримуватися наступних важливих вимог і процедур:

- контроль параметрів технологічного процесу: відповідно до технологічної карти, обслуговуючий персонал повинен надавати пріоритетний перевірку і витриманню параметрів технологічного процесу, таких як тиск, рівень та температура в апаратах;

- забезпечення герметичності обладнання: слід постійно стежити за герметичністю технологічного обладнання та трубопроводів для запобігання витокам речовин та надзвичайним ситуаціям;

- дотримання інструкцій з експлуатації: важливо витримувати всі вимоги та інструкції по експлуатації апаратів, особливо тих, що працюють під тиском, для забезпечення безпеки та ефективності;

- проведення ревізії та ремонту: слід вчасно і систематично проводити роботи з ревізії та ремонту обладнання і трубопроводів відповідно до розкладу, визначеного Положенням про планово-попереджувальні ремонти;

- контроль запобіжних пристроїв: обслуговуючий персонал повинен регулярно перевіряти стан та справність запобіжних пристроїв, які встановлені на апаратах, і вживати заходів для їх правильного функціонування.

- дренаж апаратів: дренаж апаратів слід проводити відповідно до затвердженого графіку, записуючи всі відомості в журнал дренажів. Не допускається скидання нафтопродуктів в каналізацію.

- контроль за станом КВП: обслуговуючий персонал повинен регулярно перевіряти справність контрольно-вимірювальних приладів (КВП) та порівнювати показання первинних приладів з вторинними для відстеження правильності вимірювань.

Дотримання цих вимог та процедур допомагає забезпечити безпеку, надійність та ефективність технологічного процесу на газопереробному заводі.

6.2 Розрахунок потенційно-небезпечного фактора

Система заходів, спрямованих на усунення впливу атмосферної електрики, відома як система блискавкозахисту. Сила струму у каналі блискавки досягає 200 тисяч ампер, а напруга - 1 мільярд вольт. При входженні до об'єкта потенціал, через втрати, зменшується до рівня 30-50 мільйонів вольт. Довжина блискавкового розряду може сягати сотень і тисяч метрів. Тривалість існування блискавкового розряду коливається від 0,1 до 1 секунди. Температура у каналі може досягати від 6000 до 10000 градусів Цельсія.

Виділяють два основних прояви блискавки: первинний (1) і вторинний (2):
1 – прямий удар; 2 – виявлення електростатичної та електромагнітної індукції.

Прямий удар може призвести до руйнування будівель, споруд і обладнання через миттєве нагрівання повітря, різке його розширення і ударну хвилю. Він також може спричинити загоряння горючих матеріалів.

Захист будівель і споруд від удару блискавки залежить від наступних факторів: призначення; інтенсивності грозової діяльності у місцевості їх розташування; передбачуваної кількості ураганів у році відповідно до категорій блискавкозахисту та типу зони захисту.

Інтенсивність грозової активності (годин на рік) визначається за допомогою спеціальної карти або на підставі даних метеостанцій. Дніпропетровська область віднесена до районів, де спостерігається від 60 до 80 годин грозової активності на рік.

Кількість очікуваних ударів блискавки на рік для будівель і споруд, які не обладнані захистом від блискавки, розраховується за допомогою наступної формули [23]:

$$N = \left[(B + 6 \cdot h_x) \cdot (L + 6 \cdot h_x) - 7,7 \cdot h_x^2 \right] \cdot n \cdot 10^{-6}, \quad (6.1)$$

де B – ширина об'єкта, що захищається, м;

L – довжина об'єкта, що захищається, м;

h_x – висота об'єкта з його бокових сторін, м;

n – середня кількість поразок блискавкою 1 кв. км. земної поверхні на рік.

На практиці для захисту будівель і споруд від прямих ударів блискавки найбільше поширення отримали стрижневі та тросові відводи блискавки (рис. 6.1).

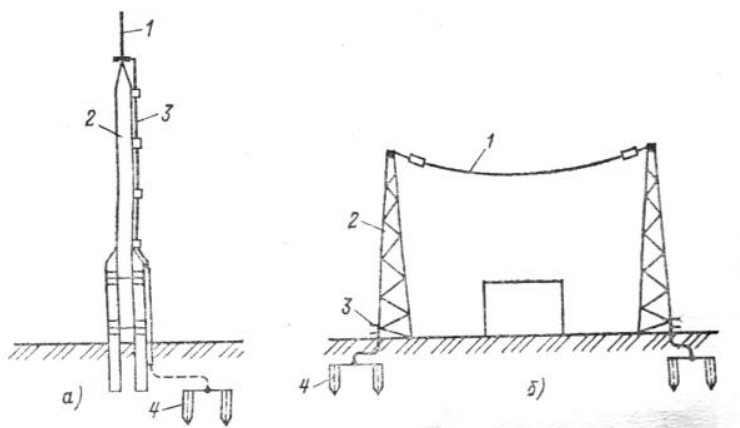


Рисунок 6.1 – Конструкція стрижневого (а) та тросового (б) відводів блискавки:

- 1 – блискавкоприймач, що безпосередньо приймає прямий удар блискавки;
- 2 – несуча конструкція, призначена для встановлення блискавковідводу;
- 3 – струмовідведення, що забезпечує відведення блискавки в землю;
- 4 – заземлювач, що відводить струм блискавки в землю.

Тип, кількість та взаємне розташування блискавковідводів визначають геометричну форму зони захисту. Схематично зона захисту одиничного відводу блискавки наведена на рис. 6.2.

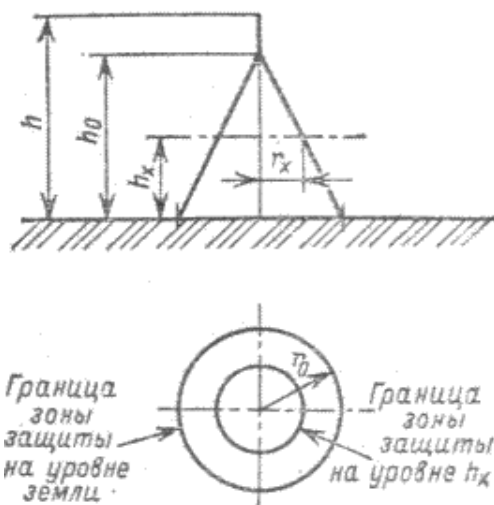


Рисунок 6.2 – Зона захисту одиничного стрижневого блискавковідводу висотою менше 150 м є конусом, вершина якого знаходиться на висоті h_0

Таблиця 6.2 – Розрахунок зони захисту одиничного стрижневого блискавковідведення [23]

Надійність захисту P_3	Висота блискавковідведення h , м	Висота конуса h_o , м	Радіус конуса r_o , м
0,9	від 0 до 100	$0,85h$	$1,2h$
	від 100 до 150	$0,85h$	$[1,2-10^{-3}(h-100)]h$
0,99	від 0 до 30	$0,8h$	$0,8h$
	від 30 до 100	$0,8h$	$[0,8-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)] h$
	від 100 до 150	$[0,8 - 10^{-3}(h - 100)]h$	$0,7h$
0,999	від 0 до 30	$0,7h$	$0,6h$
	від 30 до 100	$[0,7-7,14 \cdot 10^{-4}(h - 30)]h$	$[0,6-1,43 \cdot 10^{-3}(h-30)] h$
	від 100 до 150	$[0,65 - 10^{-3}(h - 100)]h$	$[0,5 - 2 \cdot 10^{-3}(h - 100)]h$

Таблиця 6.3 – Вихідні дані для розрахунку

Геометричні розміри об'єкта, що захищається (ГФУ)		
Довжина	Ширина	Висота (максимальна)
L, м	B, м	h _x , м
30	30	20

Насамперед, визначаємо очікувану кількість уражень блискавкою на рік будівель та споруд за формулою (6.1):

$$N = [(30 + 6 \cdot 20) \cdot (30 + 6 \cdot 20) - 7,7 \cdot 20^2] \cdot 5,5 \cdot 10^{-6} = 0,107 \frac{\text{разів}}{\text{рік}}.$$

Тут середня кількість поразок блискавкою 1 кв. км земної поверхні на рік визначаємо за таблицею залежно від інтенсивності грозової діяльності [23]: при 60–80 годин на рік грозової діяльності $n=5,5$ 1/(км²·год).

Далі ведемо розрахунок основних параметрів блискавковідведення. Відповідно до табл. 6.2 при надійності захисту $P_3=0,9$ та висоті блискавковідводу $h=50$ м отримаємо наступне.

Висота конуса:

$$h_0 = 0,85 \cdot h = 0,85 \cdot 50 = 42,5 \text{ м.}$$

Радіус конуса:

$$r_0 = 1,2 \cdot h = 1,2 \cdot 50 = 60 \text{ м.}$$

Радіус об'єкта, що захищається, визначаємо за формулою [23]:

$$r_x = (1,1 - 0,002 \cdot h) \cdot \left(h - \frac{h_x}{0,85} \right) = (1,1 - 0,002 \cdot 50) \cdot \left(50 - \frac{20}{0,85} \right) = 26,5 \text{ м.}$$

Правильність вибору блискавковідводу перевіряється за допомогою нерівності:

$$\frac{\sqrt{B^2 + L^2}}{2} < r_x. \quad (6.2)$$

$$\frac{\sqrt{30^2 + 30^2}}{2} = 21,2 \text{ м} < 26,5 \text{ м.}$$

Отже, обраний блискавковідвід зможе забезпечити безпеку об'єкта (ГФУ).

ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В даній кваліфікаційній роботі виконано теоретичний аналіз газофракціонуючої установки. Наведені переваги та недоліки контактних пристроїв, які використовуються в колонному обладнанні. Прийнято рішення щодо модернізації пропанової колони шляхом використання ковпачкових тарілок. Ця модернізація дозволяє досягти необхідних показників якості продукту.

Крім того, було розглянуто теоретичні основи процесу ректифікації, вивчено особливості конструкції депропанізатора, обґрунтовано вибір конструкційних матеріалів і наведено їх фізико-механічні та технологічні властивості. Також були виконані технологічні та конструктивні розрахунки, обчислено гідравлічний опір апарату і вибрано необхідне допоміжне обладнання.

Проведеними розрахунками на міцність та стійкість підтвердили механічну надійність та високу конструктивну якість розробленого обладнання, що є обов'язковою передумовою для довготривалої та безперебійної експлуатації даного обладнання. Розглянуто компонування обладнання установки, стисло описані ремонтні роботи тарілчастої ректифікаційної колони.

Розроблена схема автоматизації досліджуваної установки. У розділі «Охорона праці та довкілля» наведено аналіз потенційних небезпек і шкідливостей, що виникають при експлуатації запроектованого апарату, а також розраховано блискавкозахист пропанової колони.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Національна акціонерна компанія “Нафтогаз України”. – Київ, 2009. — <http://www.naftogaz.com>
2. Технологічні основи нафто- та газопереробки: навчальний посібник / В.І. Склабінський, О.О. Ляпощенко, А.Є. Артюхов. – Суми : Сумський державний університет, 2011. – 186 с.
3. Методичні вказівки до виконання магістерської кваліфікаційної роботи зі спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» освітньої програми «Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів» : для студентної, заочної та дистанційної форм навчання / В.І. Склабінський, Я.Е. Михайловський, Р.О. Острога, М.С. Скиданенко. – Суми : СумДУ, 2019. – 53 с.
4. Мамедов Б.Б. Технологічні розрахунки процесів переробки нафти та газу: навчальний посібник. — Луганськ : Вид-во СНУ ім. В. Даля, 2008. – 246 с.
5. Эмирджанов Р.Т. Основы технологических расчетов в нефтепереработке и нефтехимии: учеб. пособие для вузов / Р.Т. Эмирджанов, Р.А. Лемберанский. – Москва, 1989. – 192 с.
6. Курта С.А. Основы нафтохімії / С.А. Курта. – Івано-Франківськ : Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2020. – 193 с.
7. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии / А. Г. Касаткин. – Москва : Химия, 1973. – 752 с.
8. Теплові й масообмінні процеси та обладнання хімічних і нафтогазопереробних виробництв у системах "газ (пара) – рідина" : підручник / Я. Е. Михайловський, А. Є. Артюхов, М. П. Юхименко, Н. О. Артюхова ; за заг. ред. Я. Е. Михайловського. — Суми : СумДУ, 2021. — 391 с.
9. Кузнецов А.А. Расчеты процессов и аппаратов нефтеперерабатывающей промышленности / А.А. Кузнецов, С.М. Кагерманов, Е.Н. Судаков. – 2-е изд., пер. и доп. – Ленинград : Химия, 1974. – 344 с.
10. Машины и аппараты химических производств. Примеры и задачи / Под общ. ред. В. Н. Соколова. – Л. : Машиностроение, 1982. – 384 с.

11. Плановский А.Н. Процессы и аппараты химической и нефтяной технологии / А.Н. Плановский, П.И. Николаев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Химия, 1972. – 494 с.
12. 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.
13. Лазинский А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры / А.А. Лазинский, А.Р. Толчинский. – Ленинград : Машиностроение, 1970. – 752 с.
14. Лазинский А. А. Конструирование сварных химических аппаратов : Справочник / А. А. Лазинский. – Ленинград : Машиностроение, 1981. – 382 с.
15. Расчет и конструирование машин и аппаратов химических производств. Примеры и задачи : Учеб. пособие для студентов вузов / М. Ф. Михалев, Н. П. Третьяков, А. И. Мильченко [и др.]. – Под общ. ред. Михалева М. Ф. – Л. : Машиностроение, 1984. – 301 с.
16. 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.
17. Методичні вказівки до вивчення дисципліни «Проектування хімічних підприємств та основи САПР» / Укл.: О. О. Ляпощенко, В. М. Маренок. – Суми : Вид-во СумДУ, 2008. – 81 с.
18. Фарамазов С. А. Ремонт и монтаж оборудования химических и нефтеперерабатывающих заводов / С. А. Фарамазов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1980. – 312 с.
19. Ермаков В.И. Ремонт и монтаж химического оборудования / В.И. Ермаков, В.С. Шейн. – Л. : Химия, 1981. – 368 с.
20. Кузьменко Н.В. Учебное пособие для студентов по дисциплине «Автоматизация производственных процессов и производств». Часть I. Конспект лекций – Ангарск, 2005 – 77 с.

21. Промислові прилади та засоби автоматизації: Довідник / В.Я. Баранов, Т.Х. Безповська, В.А. Бек та ін.. Київ : Вид-во «Віста», 2017. – 847 с.
22. Основи охорони праці [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.ztec.com.ua/ztec/e-lib/>
23. Денисенко, А.Ф. Охорона праці : конспект лекцій для студ. екон. спец. заочної форми навчання. Ч.2 / А.Ф. Денисенко. — Суми : СумДУ, 2007. — 130 с.