

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему: Автоматизація технологічного процесу поділу суміші бензол-толуол (комплексна тема).

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи КАС-41
спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

(шифр і назва спеціальності)

(підпис)	Дідух В.С.
(підпис)	Купина В-М.М.

Керівник

(підпис)	Козбур І.Р.
----------	-------------

Нормоконтроль

(підпис)	Козбур І.Р.
----------	-------------

Завідувач кафедри

(підпис)	Савків В.Б.
----------	-------------

Рецензент

(підпис)	Корольок Р.І.
----------	---------------

Тернопіль
2026

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« ____ » _____ 2026р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Дідух Василь Степанович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація технологічного процесу поділу суміші бензол-толуол.
(комплексна тема).

Керівник роботи ст. викл. Козбур І.Р.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджена наказом ректора від « 14 » травня 2026 року № 4/9-231.

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики та вимоги, технології розділення вуглеводневих сумішей ДСТУ 8777:2018 «Толуол нафтовий. Технічні умови».
ДСТУ ГОСТ 31906:2019 «Толуол нафтовий. Технічні умови». ДСТУ 2436.2:2018 (ISO 5272:1979, MOD) «Вуглеводні ароматичні бензольного ряду»

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

- 1) Аналітична частина;
- 2) Проектна частина;
- 3) Спеціальна частина;
- 4) Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Презентація кваліфікаційної роботи аркушів формату А4

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Спеціальна частина</i>	<i>ст. викл. Козбур І.Р.</i>		
<i>Безпека життєдіяльності,</i>	<i>доц. Сенчишин В.С.</i>		
<i>основи хорони праці</i>			

« » 20 p.

[illegible]

(підпис)

(прізвище та ініціали)

(підпис)

(прізвище та ініціали)

Міністерство освіти і науки України
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« ____ » _____ 2026р.

З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
(шифр і назва спеціальності)
студенту Купина Вячеслав-Марк Михайлович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Автоматизація технологічного процесу поділу суміші бензол-толуол.
(комплексна тема).

Керівник роботи ст. викл. Козбур І.Р.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджена наказом ректора від « 14 » травня 2026 року № 4/9-231.

2. Термін подання студентом завершеної роботи 26 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Технічні характеристики та вимоги, технології розділення
вуглеводневих сумішей ДСТУ 8777:2018 «Толуол нафтовий. Технічні умови».
ДСТУ ГОСТ 31906:2019 «Толуол нафтовий. Технічні умови». ДСТУ 2436.2:2018
(ISO 5272:1979, MOD) «Вуглеводні ароматичні бензольного ряду»

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

- 1) Аналітична частина;
- 2) Проектна частина;
- 3) Спеціальна частина;
- 4) Безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Презентація кваліфікаційної роботи аркушів формату А4

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Спеціальна частина</i>	<i>ст. викл. Козбур І.Р.</i>		
<i>Безпека життєдіяльності,</i>	<i>доц. Сенчишин В.С.</i>		
<i>основи хорони праці</i>			

« » 20 p.

[illegible]

(прізвище та ініціали)

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

У бакалаврській кваліфікаційній роботі була розроблена ректифікаційна установку для поділу суміші бензол-толуол з наступними параметрами: витрата дистиляту - 3.94 т/год.; витрата кубового залишку - 6.06 т/год.; робоче флегмове число - 2.12; число теоретичних тарілок (усього - 23, з них верхніх - 7, нижніх - 16), діаметр колони - 1,8 м; висота колони - 14.1 м; ефективність усереднена тарілки - верхня частина колони - 0.45, у нижня частина колони - 0.41; число тарілок усього - 38, з них верхні - 16, нижні - 22; гідравлічний опір тарілок, - верхня частина колони - 385.9 Па, нижня частина колони - 485.3 Па.

У спроектованій системі керування ректифікаційною установкою передбачено контроль наступних технологічних параметрів:

Рівні вхідного і вихідного продуктів.

Температурні режими для підігрівної пари.

Температурні режими для ректифікаційної колони по повному об'єму.

Температурні режими для дефлегматора та конденсатора-охолоджувача готового продукту.

Витратні характеристики по надходженню вихідної суміші і видаленню готового продукту.

Керування проходить у наступних пунктах регулювання:

Керування температурними характеристиками підігрівачів і охолоджувачів за рахунок регулювання витратними характеристиками пари та охолоджуючої води відповідно.

Пункти регулювання температури нагріву за рахунок подачі пари, - нагрівник кип'ятильник вхідної суміші, нагрівник кип'ятильник кубового залишку.

Пункти регулювання температури охолодження, - дефлегматор у верхній частині колони, конденсатор-охолоджувач готового продукту.

Система керування розроблена на базі процесорного блоку MCU.

ABSTRACT

In the bachelor's qualification work, a rectification unit was designed for the separation of a benzene-toluene mixture with the following parameters: distillate flow rate - 3.94 t/h; bottom residue flow rate - 6.06 t/h; working reflux ratio - 2.12; number of theoretical plates (total - 23, of which 7 are upper, 16 are lower), column diameter - 1.8 m; column height - 14.1 m; average plate efficiency - in the upper part of the column - 0.45, in the lower part of the column - 0.41; total number of actual plates - 38, of which 16 are upper, 22 are lower; hydraulic resistance of the plates - in the upper part of the column - 385.9 Pa, in the lower part of the column - 485.3 Pa.

The designed control system of the distillation unit provides for the control of the following technological parameters:

- Levels of input and output products.

- Temperature regimes for heating steam.

- Temperature regimes for the distillation column over the entire volume.

- Temperature regimes for the reflux condenser and the condenser-cooler of the finished product.

- Flow characteristics for the incoming feed mixture and the removal of the finished product.

- Control is carried out at the following control points:

- Control of the temperature characteristics of the heaters and coolers by adjusting the flow characteristics of steam and cooling water, respectively.

- Points for regulating the heating temperature by supplying steam - the heater-boiler of the incoming mixture, the heater-boiler of the bottom residue.

- Points for regulating the cooling temperature - the reflux condenser in the upper part of the column, the condenser-cooler of the finished product.

- The control system is developed on the basis of the MCU processor unit.

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	6
ABSTRACT	7
ЗМІСТ	8
ВСТУП.....	11
1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА	16
1.1 Теоретичні основи розроблювального процесу	16
1.1.1 Термодинамічні основи та механізм процесу ректифікації.....	16
1.2. Основні технологічні схеми для проведення розроблювального процесу ..	25
1.2.1 Ректифікація періодичної дії.....	25
1.2.2 Неперервна ректифікація.....	26
1.2.3 Екстрактивна й азеотропна ректифікація	30
1.3. Типове устаткування проектованої установки.....	34
1.3.1 Барботажні колони	37
1.3.2 Насадочні колони	37
1.3.3 Апарати плівкового типу.....	41
1.3.4 Відцентрові ректифікатори	44
1.4 Тарілчасті колони	45
1.4.1 Ковпачкові колони	45
1.4.2 Сітчасті колони.....	47
1.5 Характеристики отримуваних речовин.....	50
1.5.1 Бензол	50
1.5.2 Фізичні властивості бензолу рідкого.	52
1.5.3 Хімічні властивості	53
1.5.4 Виробництво.	55
1.5.5 Застосування	57
1.5.6 Толуол нафтовий. Основні відомості:.....	59
1.5.7 Одержання:	60
1.5.8 Застосування:	60

1.5.9 Упакування.	62
1.5.10 Транспортування.	62
1.5.11 Зберігання.	62
2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА	63
2.1 Технологічна схема поділу суміші бензол-толуол	63
2.2 Технологічний розрахунок апарата	66
2.2.1 Матеріальний баланс колони	66
2.2.2 Перерахування масових часток	67
2.2.3 Розрахунок робочого флегмового числа.....	67
2.2.4 Розрахунок фізико-хімічних параметрів процесу колони	68
2.2.5 Розрахунок діаметру колони.....	71
2.2.6 Визначення тангенса кута нахилу	72
2.2.7 Визначення висоти колони. Розрахунок висоти насадки методом BETT:..	73
2.2.8 Гідравлічний опір шару зрошуваної насадки.	74
2.2.9 Розрахунок патрубків.....	75
2.2.10 Розрахунок кип'ятильника.....	76
2.2.11 Висновок розділу.....	80
2.3 Опис технологічної схеми розробленої ректифікаційної установки безперервної дії	81
2.4 Компоновка системи автоматизованого управління і контролю технологічним процесом розділення суміші бензол-толуол в ректифікаційні колони	84
2.4.1 Функціональний склад MCU2.....	90
2.5 Розробка схем електричних принципових автоматичної системи управління і контролю технологічним процесом розділення суміші бензол-толуол в ректифікаційні колони	95
2.5.1 Модуль одноплатного контролера MCU4-5.....	95
2.5.1.1 Призначення.....	95
2.5.1.2 Технічні характеристики	96
2.5.1.3 Склад.....	97

2.5.2 Модуль RS2-1	99
Склад одноплатного контролера RS 2-1	100
2.5.3 Модуль АЦП 18 розрядів×18 каналів PCU18	101
3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА.....	104
3.1 Програмування модуля RS2-1 у режимі slave-пристрою промислової мережі MODBUS	104
3.2 Алгоритм обчислення контрольного циклічного коду (CRC16)	108
3.3 Програмування мережної адреси.....	110
4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ	111
4.1 Правила безпеки при експлуатації обладнання , що проектується.....	111
4.2 Розробка заходів які зменшують небезпеку виникнення вибухів і пожеж в цеху що проектується.	112
4.3 Розрахунок евакуаційних шляхів із виробничих приміщень (дільниці) цеху що проектується.	114
ВИСНОВОК.....	119

ВСТУП

Комплексна автоматизація та механізація виробничих потужностей хімічної галузі є пріоритетним завданням інженерії. Це зумовлено високим рівнем складності та кінетичною швидкістю протікання хіміко-технологічних процесів (ХТП), їхньою підвищеною чутливістю до флуктуацій параметрів заданого технологічного регламенту, а також токсичністю, вибухо- та пожежонебезпекою робочих середовищ.

Ключові проблеми автоматизації галузі:

1. Дефіцит релевантних даних, недостатній обсяг первинної інформації щодо динаміки високоскладних ХТП у реальному часі.
2. Аналітичні обмеження, труднощі під час агрегації та крос-верифікації наявних масивів даних, що ускладнює проведення системного якісного аналізу та подальшу оптимізацію техніко-економічних показників підприємства.

Роль та ефективність сучасних АСУ ТП. Інтеграція сучасних автоматизованих систем керування технологічними процесами (АСУ ТП) спрямована на мінімізацію ризиків виробничого травматизму, зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище та забезпечення суворой відповідності критеріям систем менеджменту якості [1–5].

Впровадження засобів автоматизації як у безперервні, так і в періодичні процеси синтезу масових продуктів, спеціальних хімікатів, органічних та неорганічних сполук дозволяє:

- Знизити собівартість кінцевої продукції шляхом оптимізації витрат сировини та енергоресурсів.
- Максимізувати загальну ефективність обладнання (OEE).

- Сформуванати єдиний інформаційний простір, де виробничі метрики є верифікованим базисом для прийняття операційних та стратегічних управлінських рішень.

Функціональні переваги впровадження автоматизованих систем:

- Прецизійне регулювання, підвищення точності стабілізації параметрів процесу для забезпечення відповідності якісних характеристик продукту вимогам технологічного регламенту.
- Предиктивна надійність, моніторинг технічного стану основного технологічного устаткування за допомогою спеціалізованого програмно-апаратного забезпечення, що дає змогу прогнозувати відмови та оптимізувати графіки планово-попереджувальних ремонтів (ППР).

Специфіка хімічних виробництв полягає у застосуванні різноманітних технологічних схем, що базуються на глибоких якісних перетвореннях речовин, зміні їхнього фазового стану, хімічного складу та внутрішньої структури. Це вимагає гнучких, надійних та високоточних рішень у сфері промислової автоматизації [6–9].

Хімічні методи виробництва дозволяють застосовувати різноманітну сировину, включаючи різні відходи. Деякі підприємства хімічної промисловості, що використовують гірськохімічну сировину, здійснюють його переробку, а також видобуток, що істотно ускладнює структуру таких підприємств і організацію виробничого процесу.

Оскільки в результаті хімічних перетворень міняється стан речовин і цілеспрямовано отримуються продукти, що володіють спеціально заданими властивостями, високі вимоги стосуються якості сировини, а також підготовці сировинної бази. Тому правильна організація технічного контролю використовуваної сировини на підприємствах хімічної промисловості має величезне значення.

Ряд виробництв хімічної промисловості характеризується значним споживанням теплової, а також електричної енергії, це визначає підвищені вимоги до організації якісного енергопостачання підприємства для забезпечення його чіткого й безперебійного функціонування.

Специфіка експлуатації та автоматизації хіміко-технологічних комплексів.

Функціонування об'єктів хімічної галузі пов'язане з постійним обігом ексергетично небезпечних та токсичних речовин, а також реалізацією технологічних процесів в умовах екстремальних температур і високих тисків. Зазначені чинники обумовлюють підвищені вимоги до систем промислової безпеки, охорони праці та охорони навколишнього середовища (EHS), що робить інтеграцію високонадійних систем автоматизації критично необхідною умовою експлуатації шкідливих виробництв [10–14].

Фактор безперервності виробничих процесів. Більшість ХТП інтегровані у єдині безперервні потокові схеми на рівні як окремих технологічних цехів, так і всього промислового комплексу.

Безперервний характер виробництва вимагає:

- Логістичної синхронізації, безперебійного та збалансованого забезпечення матеріально-сировинними ресурсами для запобігання дестабілізації режимів.
- Специфічного менеджменту, особливої організації праці оперативного та ремонтного персоналу, орієнтованої на цілодобовий моніторинг і швидке реагування.

Апаратурне оформлення та завдання контролю

Характерною ознакою сучасного хімічного устаткування є використання герметичних реакційних апаратів безперервної або періодичної дії. Оскільки пряме візуальне спостереження за фазовими перетвореннями, кінетикою реакцій та станом внутрішніх елементів обладнання є неможливим, виникає потреба у суцільній інструментальній ідентифікації процесів.

[Герметичне обладнання] —> [Неможливість візуального контролю] —> [Необхідність впровадження АСУ ТП]

У зв'язку з цим сучасні АСУ ТП хімічних виробництв вирішують такі ключові завдання [15–19]:

1. Дистанційний моніторинг, детектування та реєстрація параметрів стану середовища (температура, тиск, витрата, компонентний склад) за допомогою первинних вимірювальних перетворювачів.
2. Матеріальний облік, точне кількісне вимірювання витрат сировини, проміжних напівфабрикатів та готової продукції на всіх етапах переробки.
3. Технічна діагностика, безперервний автоматизований контроль справності вузлів обладнання, що є інформаційною основою для реалізації стратегій технічного обслуговування за фактичним станом і проведення регламентних ремонтних робіт.

Складність, а також різноманітність хіміко-технологічних процесів і технологічного устаткування, наявність складних систем автоматизованого керування технологічними процесами (АСУ ТП) підприємств хімічної промисловості пред'являють високі кваліфікаційні вимоги до обслуговуючого персоналу.

Сучасні й надійні системи автоматизації широко впроваджуються рядом хімічних виробництв, серед них:

- автоматизація хімічного виробництва неорганічних речовин (АСУ ТП хімічного виробництва сірчаної кислоти, АСУ ТП хімічного виробництва суперфосфату, АСУ ТП хімічного виробництва аміаку, АСУ ТП хімічного виробництва аміачної селітри);
- автоматизація хімічного виробництва органічних речовин (АСУ ТП хімічного виробництва ацетилену, АСУ ТП хімічного виробництва бутадієну, АСУ ТП хімічного виробництва стиrolу з етилбензолу);
- автоматизація хімічного виробництва полімерів і еластомірів (АСУ ТП хімічного виробництва поліетилену високого тиску, АСУ ТП хімічного

виробництва поліпропілену, АСУ ТП хімічного виробництва бутадієн-стирольного латексу);

- автоматизація виробництва хімічних волокон (АСУ ТП хімічного виробництва віскозного волокна, АСУ ТП хімічного виробництва поліамідного волокна - капрону);
- автоматизація хімічного виробництва гумових виробів (АСУ ТП хімічного виробництва автомобільних шин, АСУ ТП хімічного виробництва гумових технічних виробів);
- автоматизована система керування технологічними процесами (АСУ ТП) переробки пластмас.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Теоретичні основи розроблювального процесу

1.1.1 Термодинамічні основи та механізм процесу ректифікації.

Ректифікація – це масообмінний процес розділення гомогенних рідких сумішей, який полягає у багаторазовому протитоковому контакті нерівноважних парової та рідкої фаз. Процес супроводжується частковим випаровуванням рідкої фази та частковою конденсацією парової фази і традиційно реалізується у вертикальних колонних апаратах (ректифікаційних колонах) [20–24].

Фізико-хімічна сутність процесу базується на двосторонньому масообміні між фазами, що мають різну температуру:

- З рідкої фази у парову переважно переходять легколетючі (низькокиплячі) компоненти (ЛЛК), внаслідок чого парова фаза збагачується ними по висоті апарата.
- З парової фази у рідку переважно конденсуються важколетючі (висококиплячі) компоненти (ВЛК).

Внаслідок багаторазового повторення цих актів фазового переходу парова фаза, яка виходить із кубової (нижньої) частини колони, на виході з верху колони практично повністю складається з ЛЛК.

Після повної конденсації цієї пари у дефлегматорі утворюється дистилат (ректифікат) – цільовий продукт, а також флегма – частина конденсату, що повертається у колону для зрошення контактних пристроїв (тарілок або насадки) та забезпечення взаємодії з висхідним потоком пари. Парова фаза в кубі колони генерується за рахунок підведення тепла та часткового випаровування кубового залишку, який є практично чистим ВЛК [25–29].

Аналіз процесу за допомогою ізобарної діаграми фазової рівноваги ($t-x,y$). Механізм послідовного розділення бінарної суміші та зміну концентрацій фаз описують за допомогою фазової діаграми кипіння та конденсації у координатах «температура – склад» ($t-x,y$).

Алгоритм фазових перетворень можна представити у вигляді такої послідовності ступенів зміни стану:

1. Первинне випаровування. При нагріванні вихідної бінарної суміші початкового складу x_1 до температури кипіння t_1 утворюється перша рівноважна парова фаза, склад якої відповідає точці b на лінії насиченої пари (y_1). Ця парова фаза суттєво збагачена ЛЛК ($y_1 = x_2 > x_1$).
2. Конденсація та повторне кипіння. Повна конденсація цієї пари дає рідку суміш нового складу x_2 . При підведенні тепла до одержаного конденсату і досягненні температури кипіння t_2 утворюється нова парова фаза (точка d), концентрація ЛЛК в якій зростає до значення x_3 .
3. Каскадування процесу. Послідовне чергування операцій дефлегмації (часткової конденсації) та випаровування утворює ступінчастий процес, що дозволяє у кінцевому результаті отримати дистилат із заданою високою мольною часткою низькокиплячого компонента.

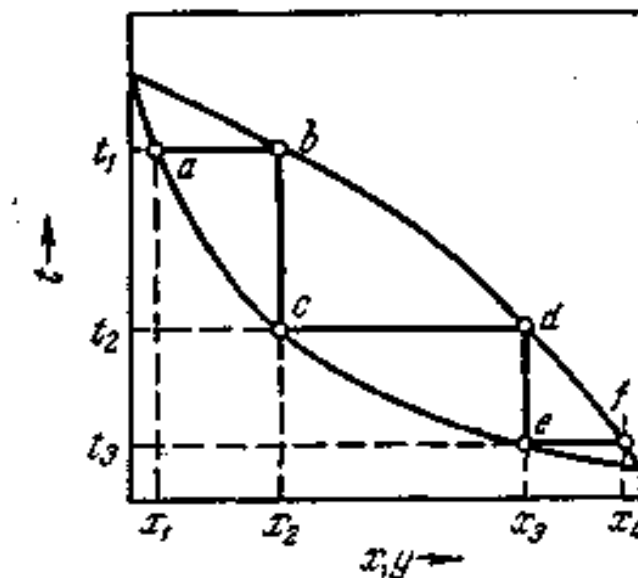


Рисунок 1.1 – Діаграма t - x,y .

Апаратурно-технологічна реалізація та термодинамічні умови ректифікації. Аналогічно до процесу збагачення парової фази, рух у зворотному напрямку за діаграмою фазової рівноваги – починаючи від складу рідкої фази x_4 – через послідовні цикли дефлегмації та випаровування дозволяє виділити

кубовий залишок, який практично повністю складається з висококиплячого компонента (ВЛК) [30–32].

Порівняльний аналіз багатоступінчастих систем та колонних апаратів. У спрощеному вигляді каскадний процес багаторазового випаровування можна реалізувати у багатоступінчастій випарній установці:

- Перший ступінь, здійснюється первинне випаровування вихідної бінарної суміші.
- Наступні ступені, рідка фаза, що залишається після сепарації парового потоку на попередньому етапі, послідовно подається на випаровування у кожен наступний ступінь каскаду.

За аналогічним принципом функціонує і каскад багаторазової конденсації, де парова фаза після відділення сконденсованої рідини (флегми) на поточному етапі спрямовується у наступний ступінь для подальшого охолодження.

Недоліки роздільних багатоступінчастих установок:

- Низький вихід цільового продукту, попри досягнення високої концентрації ЛЛК або ВЛК за великої кількості ступенів, абсолютна маса отриманої фази є незначною відносно її початкового вмісту у суміші.
- Низька енергоефективність, конструкції таких установок є матеріаломісткими (громіздкими) та характеризуються значними втратами теплової енергії у навколишнє середовище.

Економічно доцільніше, повне та чітке розділення гомогенних сумішей досягається у компактних масообмінних апаратах – ректифікаційних колонах.

Термодинамічні умови та кінетика ректифікації [33–35]. Ефективність ректифікаційних колон зумовлена організацією безперервного протитокового руху нерівноважних рідкої та парової фаз у межах одного апарата.

Кінетика процесу базується на таких принципах:

- Рушійна сила процесу, прагнення гетерогенної системи до стану термодинамічної рівноваги викликає інтенсивний тепло- та масообмін у зоні контакту фаз (на тарілках або насадці).

- Перерозподіл компонентів, під час кожного акту міжфазної взаємодії парова фаза збагачується низькокиплячим компонентом за рахунок підведення тепла від конденсації ВЛК, а рідка фаза збагачується висококиплячим компонентом. Многорунове повторення цього циклу забезпечує практично повне розділення вихідного бінарного розчину.

Висновок, градієнт концентрацій і температур (відсутність фазової рівноваги), оптимальна відносна швидкість протитоку фаз, а також забезпечення високої питомої поверхні їхнього багаторузового контакту є фундаментальними й необхідними інженерно-технічними умовами проведення процесу ректифікації.

Термодинамічні властивості та парціальний тиск компонентів ідеальних бінарних розчинів. Розглянемо бінарну рідку систему, що складається з компонентів *A* та *B*. Фазова поведінка та термодинамічні властивості такої суміші визначаються фізико-хімічною природою її компонентів, температурою та сумарним тиском у системі.

У термодинаміці для спрощення опису міжмолекулярних взаємодій використовують модель ідеального розчину. Головною ознакою ідеальної системи є рівність сил міжмолекулярної взаємодії між однойменними (*A–A*, *B–B*) та різнойменними (*A–B*) молекулами:

$$F_{A-A} = F_{B-B} = F_{A-B}$$

Внаслідок цього інтегральна сила, яка утримує довільну молекулу в рідкій фазі, залишається константною і не залежить від мольного складу розчину. При змішуванні компонентів з утворенням ідеального розчину тепловий ефект дорівнює нулю ($\Delta H_{mix} = 0$), а загальний об'єм системи дорівнює сумі об'ємів чистих компонентів ($\Delta V_{mix} = 0$).

Кінетичне обґрунтування та закон Рауля. З кінетичного погляду, за сталої температури парціальний тиск насиченої пари кожного компонента над розчином залежить виключно від частоти зіткнень його молекул із міжфазною поверхнею рідини, які мають кінетичну енергію, достатню для подолання потенційного бар'єра внутрішнього молекулярного притягання.

Відповідно, частота евакуації молекул у газову фазу є прямо пропорційною їхній концентрації у рідкій фазі. Ця закономірність описується згідно закону Рауля, – парціальний тиск насиченого пару компонентів ідеального розчину (p_i) при певній температурі прямо пропорційний мольній частині у рідкій фазі (x_i) і тиску насиченої пари того ж компонента в чистому вигляді (P_i^0):

За такої температури тиск відповідних компонент зростає пропорційно вмісту його у рідкій суміші (закон Рауля):

$$p_A = P_A x_A \quad (1.1)$$

$$p_B = P_B (1 - x_A) \quad (1.2)$$

За ступенем розчинності компонент сумішей, рідини-суміші ділять на:

- взаєморозчинні у будь-яких співвідношеннях,
- частково розчинні,
- взаємонерозчинні.

Суміші із компонентами взаєморозчинними в будь-яких співвідношеннях поділяють на:

- ідеальні розчини, по закону Рауля;
- нормальні розчини – компонентні рідкі суміші, частково не відповідають закону Рауля, та не утворюють сумішей;
- суміші з температурою кипіння незмінною, азеотропи;
- неідеальні розчини – компонентні рідкі суміші де є значні відхилення від закону Рауля, суміші з температурою кипіння незмінною, азеотропи.

Суміш двох рідких компонент, які є взаєморозчинні у будь-якому співвідношенні, представляють систему, котра складена з двох фаз та двох компонент, тоді за правилами фаз їй притаманні два ступені свободи:

$$C = K - \Phi + 2 = 2 - 2 + 2 = 2 \quad (1.3)$$

Для виконання інженерно-технічних розрахунків процесів масообміну найбільш інформативною є ізобарна діаграма фазової рівноваги в координатах температура – склад ($t-x, y$). Доцільність її використання зумовлена тим, що

більшість процесів дистиляції та ректифікації у промислових апаратах реалізуються в ізобарних умовах, тобто за сталого тиску ($P = \text{const}$). На цій діаграмі по осі абсцис відкладають концентрації низькокиплячого компонента у рідкій (x) та паровій (y) фазах, що відповідають певним рівноважним температурам системи, які відкладені по осі ординат. За допомогою цієї діаграми графічно визначають температури кипіння сумішей різного складу, температури конденсації рівноважних парів, а також графічно відображають траєкторію зміни складів фаз за ступенями розділення ректифікаційної колони.

Згідно закону Дальтона $p_A = P y_A^*$, відповідно:

$$y_A^* = p_A / P = (P_A / P) x_A, \quad (1.4)$$

при

$$P = p_A + p_B = P_A x_A + P_B (1 - x_B) = P_B + (P_A - P_B) x_A \quad (1.5)$$

тоді

$$x_A = (P - P_B) / (P_A - P_B) \quad (1.6)$$

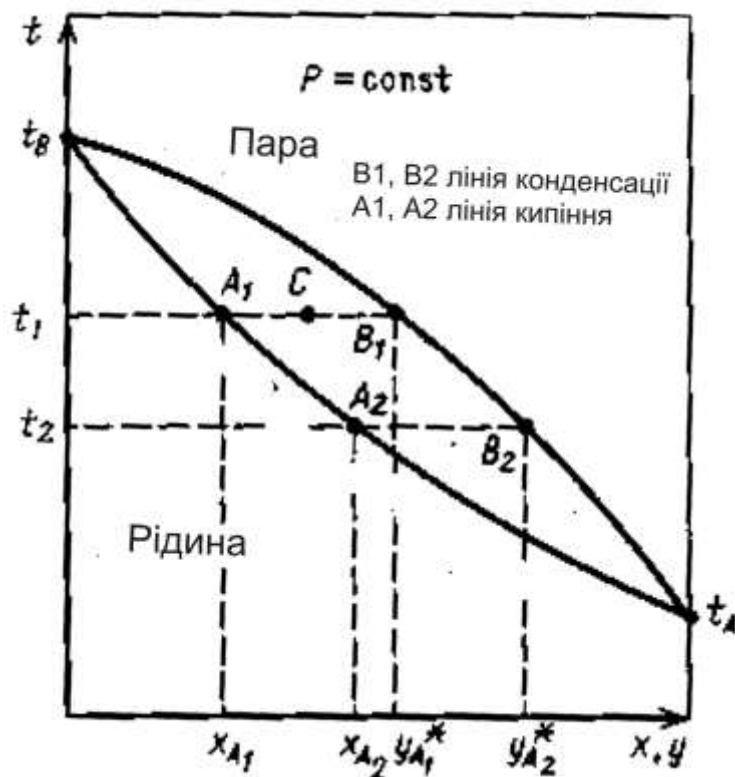


Рисунок 1.2 – Діаграма $t-x, y$.

Згідно з термодинамічним рівнянням зв'язку, за відомими значеннями тисків насиченої пари чистих компонентів P_A та P_B для низки заданих температур (t_1, t_2 тощо) розраховують рівноважні мольні частки компонентів у рідкій фазі (x_1, x_2). Згодом за законом Рауля-Дальтона визначають відповідні рівноважні концентрації цільового компонента в паровій фазі (y_{A1}^*, y_{A2}^*). За отриманими масивами точок будують нижню лінію кипіння рідини (лінія насиченої рідини) та верхню лінію конденсації пари (лінія насиченої пари). Математично зазначена залежність фіксує функціональний зв'язок між концентрацією рідкої фази, загальним тиском у системі P та тиском насиченої пари індивідуальних речовин.

Горизонтальні відрізки (ноди або коноди), що з'єднують точки рівноважних складів рідкої та парової фаз за певної температури, є ізотермами фазової рівноваги. Точки, розташовані безпосередньо на нижній кривій кипіння, відповідають стану насиченої рідкої фази за температури кипіння; відповідно, будь-яка фігуративна точка нижче цієї лінії описує однофазну систему, що перебуває виключно в рідкому стані (недогріта рідина). Своєю чергою, точки вище верхньої кривої конденсації характеризують перегріту пару, де система існує виключно у газованому стані. Фігуративні точки, які лежать у міжфазній області між кривими кипіння та конденсації, відображають параметри двофазних парорідинних систем, де температура є вищою за точку кипіння рідини, але нижчою за точку повної конденсації пари відповідного брутто-складу.

Для ідеальних подвійних систем використовують рівняння (1.7), що дає опис лінії рівноваги:

$$y_A^* = ax_A / [1 + x_A(a - 1)], \quad (1.7)$$

де відповідно, $a = P_A / P_B$ – відносна летючість складової розчину A , подеколи коефіцієнт a визначають як коефіцієнт поділу.

Для сумішей, котрі складаються з n складових компонент, наприклад, A, B, C, D , за законами Дальтона та Рауля отримаємо:

$$y_A = (P_A / P)x; y_B = (P_B / P)x; y_C = (P_C / P)x; y_D = (P_D / P)x \quad (1.8)$$

Якщо

$$P = P_A x_A + P_B x_B + P_C x_C + P_D x_D + \dots = \sum_{i=1}^{i=n} (P_i x_i) \quad (1...9)$$

Тоді відповідно для j -го компонента

$$y_j = P_j x_j / \sum_{i=1}^{i=n} (P_i x_i) \quad (1.10)$$

При діленні чисельника та знаменника правої частини рівняння 1.10 на P_A :

$$y_j = a_j x_j / \sum_{i=1}^{i=n} (a_i x_i), \quad (1.11)$$

$$a = P_A / P_B; a_B = P_B / P_A; a = P_C / P_A \text{ й т.д.}$$

Залежності тиску пари (насиченої) від її температури описують рівнянням Антуана:

$$\ln P_A = A - B / (T + C), \quad (1.12)$$

A – константа, котра не залежить від температури;

B і C – постійні, визначені за довідниками;

T – абсолютна температура.

Залежність (1.12) описується температурним рівнянням тиску пари у діапазоні температури у декілька десятків градусів та для тиску не близького до критичного значення.

Реальні рідкі системи виявляють суттєві відхилення від термодинамічного закону Рауля, які зумовлені міжмолекулярними взаємодіями, ефектами асоціації, дисоціації чи сольватації (гідратації) компонентів у розчині. Якщо ізобара або ізотерма загального тиску пари над реальним розчином розташовується вище лінійної залежності, характерної для ідеальної системи, таке явище класифікують як позитивне відхилення від закону Рауля. Воно

свідчить про те, що сили взаємодії між однойменними молекулами перевищують сили взаємодії між різнойменними, що полегшує їхній перехід у газову фазу. Навпаки, якщо сумарний тиск пари є меншим за ідеальний, фіксують негативне відхилення, зумовлене утворенням стійких міжмолекулярних комплексів у рідкій фазі.

Кількісну міру відхилення властивостей реального розчину від ідеального стану виражають за допомогою безрозмірної величини – коефіцієнта активності (γ_i). Цей параметр інтегрують у термодинамічні рівняння для корекції концентрацій компонентів, замінюючи аналітичні мольні частки (x_i) на їхні ефективні термодинамічні концентрації – активності ($a_i = \gamma_i \cdot x_i$).

Реальна система відхиляється від закону Рауля за коефіцієнтом активності γ :

$$p_A = P_A x_A \gamma \quad (1.13)$$

Суміші з додатнім відхиленням від закону Рауля $\gamma > 1$; суміші з від'ємним відхиленням, відповідно – $\gamma < 1$. Визначення значень γ часто ускладнений, тому діаграми $P-X$ звичайно будують за емпіричними, експериментальними, довідковими даними.

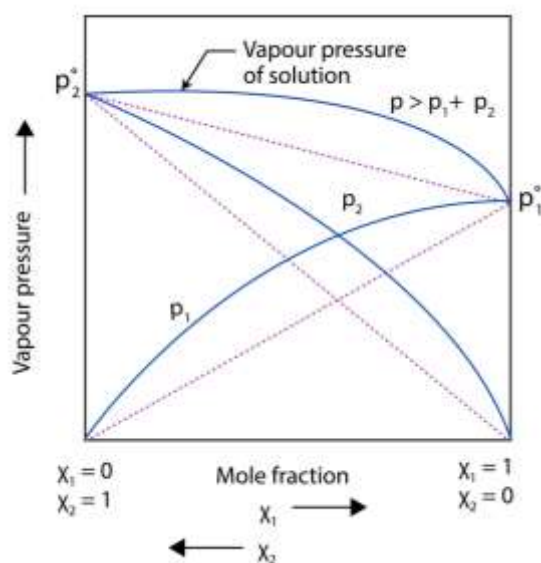


Рисунок 1.3 – Графік $P-x$ суміші з додатнім відхиленням від закону Рауля, пунктир лінії ідеального розчину.

1.2. Основні технологічні схеми для проведення розроблювального процесу

Ректифікаційні процеси реалізуються в періодичному або неперервному варіантах при різних значеннях тиску:

- атмосферному тиску,
- вакуумом, поділ сумішей висококиплячих речовин,
- тиском більшим атмосферного, поділ компонентних сумішей, котрі газоподібні за нормальних температур.

1.2.1 Ректифікація періодичної дії

Періодичні ректифікаційні установки використовують для розділення рідких компонентних композицій, коли застосування неперервних є недоцільною.

Варіанти періодично діючої установки зображено на рис. 1.4.

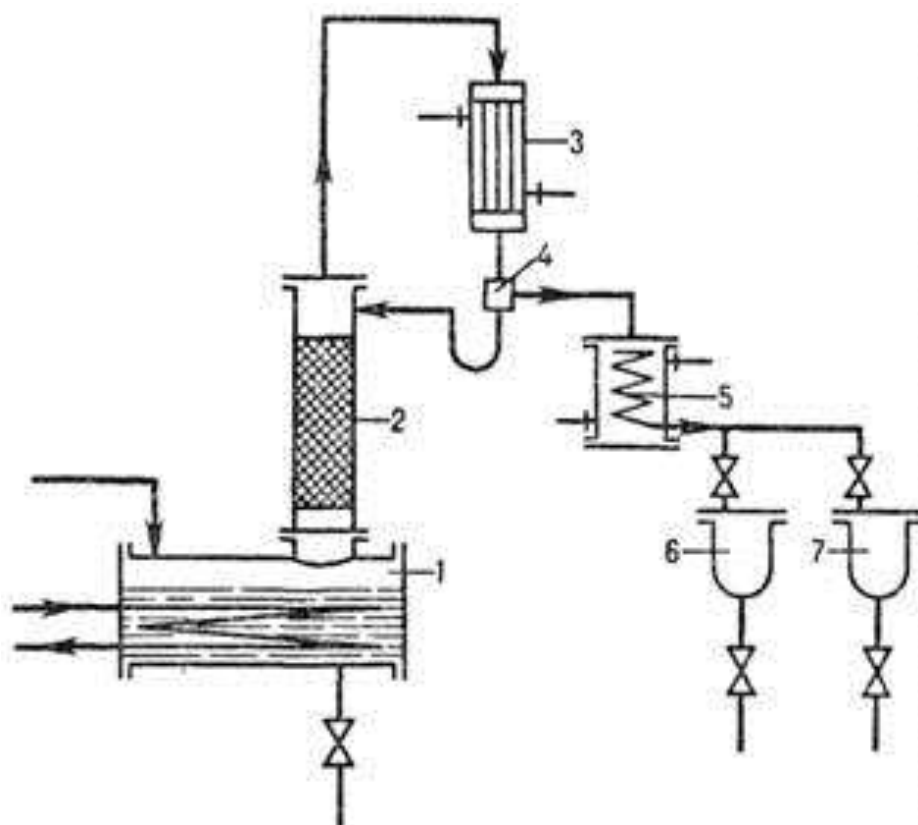


Рисунок 1.4 – Схема структурна установки періодичної ректифікації.

1 - куб; 2 - колона; 3 - дефлегматор; 4 - дільник потоків; 5 - холодильник; 6 - збірники.

Вихідну бінарну суміш періодично завантажують у куб-випарник 1, де за рахунок підведення теплової енергії її доводять до температури кипіння. Згенерована парова фаза піднімається по висоті ректифікаційної колони 2, у якій реалізується протиточний масообмін між цим висхідним потоком пари та стікаючою рідкою фазою (флегмою), що безперервно надходить із дефлегматора 3.

Пари з верху колони повністю конденсуються у дефлегматорі 3, після чого утворений рідкий потік спрямовується на ділитель флегми. Регульована частина цього конденсату повертається в апарат як зрошення (флегмовий потік) для забезпечення міжфазної взаємодії, а інша частина – цільовий дистилят (Р) – після додаткового охолодження у холодильнику 5 розподіляється по збірниках фракцій 6 і 7. Періодичний процес ректифікації завершують після досягнення заданого регламентом середнього інтегрального складу дистиляту в акумулюючій ємності.

1.2.2 Неперервна ректифікація

Проаналізуємо реалізацію умов у колонах ректифікації неперервної дії, рис. 1.5, котрі найчастіше використовують у промисловості.

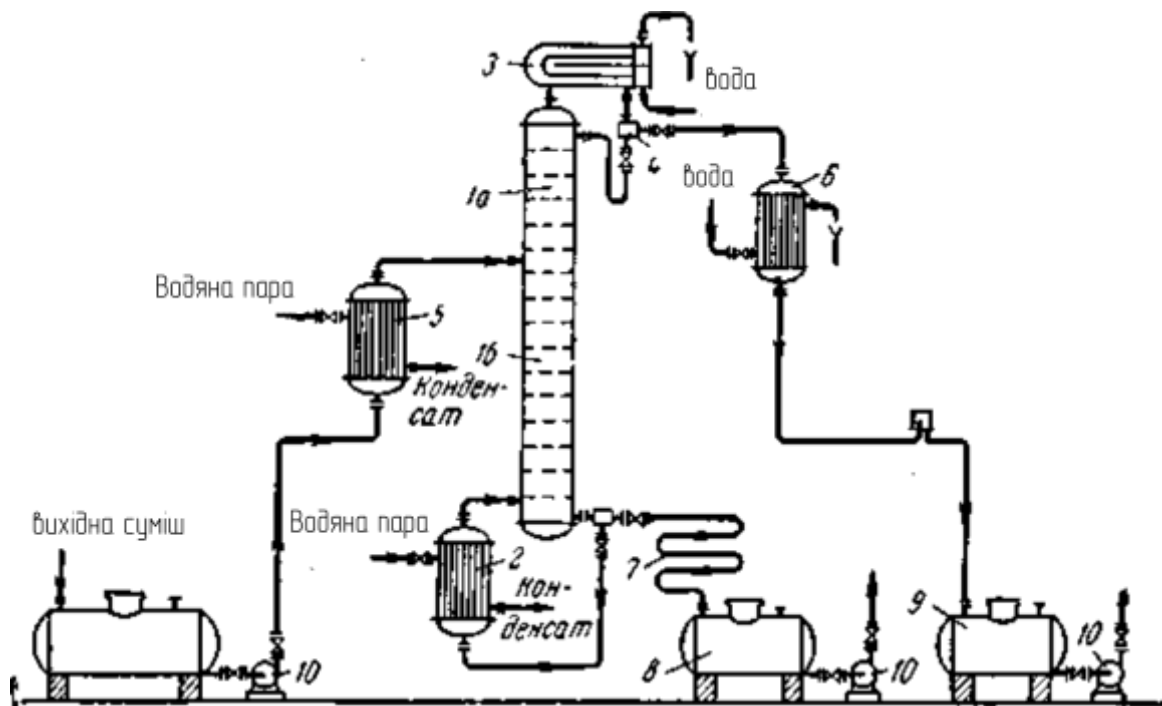


Рисунок 1.5 – Схема неперервної установки ректифікації.

1 – колона ректифікаційна, а – частина зміцнення, б – частина вичерпна; 2 – пристрій кип'ятіння; 3 – дефлегматор; 4 – поодільник флегми; 5 – підігрівач вихідної суміші; 6 – холодильник дистиляту, холодильник-конденсаційний; 7 – холодильник залишків нижнього продукту; 8,9 – збірники; 10 – насоси.

Ректифікаційна колона 1 конструктивно виконана у вигляді вертикального циліндричного корпусу, всередині якого інтегровані контактні пристрої тарілчастого або насадкового типу. В апараті організовано протиточний рух фаз: знизу вгору переміщується парова фаза, яка генерується у виносному або вбудованому в куб кип'ятильнику 2, а зверху вниз стікає рідкий потік флегми. Висхідні пари послідовно барботують через шар рідини на контактних тарілках, нумерація яких умовно ведеться за напрямком руху пари – знизу вгору.

Механізм міжфазного масообміну на окремому ступені розділення (контактній тарілці) базується на термодинамічних закономірностях фазової рівноваги. Якщо локальна концентрація низькокиплячого компонента (ЛЛК) у рідкій фазі на першій тарілці становить x_1 за температури кипіння t_1 , то внаслідок тепломасообміну з більш гарячим висхідним паровим потоком частина рідини випаровується. Оскільки в газову фазу переходять переважно летючі молекули, парова фаза, яка евакуюється на вищерозміщену (другу) тарілку, суттєво збагачується ЛЛК, набуваючи концентрації $y_1 > x_1$.

Енергетичним базисом для локального випаровування рідини на тарілці є теплота конденсації висококиплячого компонента (ВЛК) з парового потоку, чий парціальний тиск перевищує рівноважне значення для поточного складу рідкої фази. За умови близькості або рівності мольних теплот випаровування компонентів бінарної суміші, фазовий перехід носить еквімолярний характер: для десорбції 1 моль ЛЛК необхідна конденсація та абсорбція рідкою фазою 1 моль ВЛК.

Внаслідок такого каскадного обміну на кожному наступному ступені рідка фаза збагачується ЛЛК ($x_2 > x_1$), що зумовлює градієнтне зниження

температури кипіння суміші по висоті апарата ($t_2 < t_1$). Парова фаза складу y_1 , контактуючи з рідиною складу x_2 на другій тарілці, повторно піддається частковій конденсації та сепарації, збагачується низькокиплячими фракціями до значення $y_2 > x_2$ і транспортується на наступний ступінь розділення.

Парова фаза, що генерується у кубі-кип'ятильнику, початково складається переважно з важколетючого компонента (ВЛК). Під час висхідного руху по висоті апарата вона безперервно збагачується легколетючим компонентом (ЛЛК) і залишає верхню контактну тарілку колони у вигляді майже чистого цільового низькокиплячого продукту, що свідчить про практично повне випаровування та перенесення ЛЛК у парову фазу по всьому масообмінному контуру.

Ці гарячі пари надходять у дефлегматор 3, де конденсуються за рахунок теплообміну з охолоджувальною водою. Отриманий рідкий потік розділяється ділителем 4: одна його частина відводиться як дистилат, а інша спрямовується на верхню тарілку колони у вигляді флегми, формуючи стабільний низхідний потік рідини. Флегмовий потік на вході у верхню частину колони є майже чистим ЛЛК. Проте в процесі гравітаційного стікання та протитокової взаємодії з паром рідина інтенсивно абсорбує і збагачується висококиплячим компонентом, що конденсується з парової фази. На момент досягнення нижньої тарілки вона практично повністю трансформується у чистий ВЛК і скидається у куб-кип'ятильник, який обігрівається закритою водяною парою або іншим високотемпературним теплоносієм.

На певній висоті апарата до низхідного флегмового потоку приєднується вихідна суміш, яка подається на живильну тарілку. Для мінімізації теплового навантаження на кубовий кип'ятильник вихідну суміш попередньо нагрівають у підігрівнику 5 до температури кипіння рідини на рівні живлення. Живильна тарілка функціонально розділяє ректифікаційну колону на дві зони:

- Зміцнювальна частина 1а (верхня секція), забезпечує максимальне концентрування ЛЛК у паровій фазі, що гарантує надходження до

дефлегматора пари, склад якої є максимально близьким до чистого низькокиплячого компонента.

- Вичерпна частина 1б (нижня секція), призначена для граничного вилучення (вичерпування) ЛЛК із рідкої фази, щоб у кубову частину стікав рідкий потік, максимально наближений за складом до чистого ВЛК.

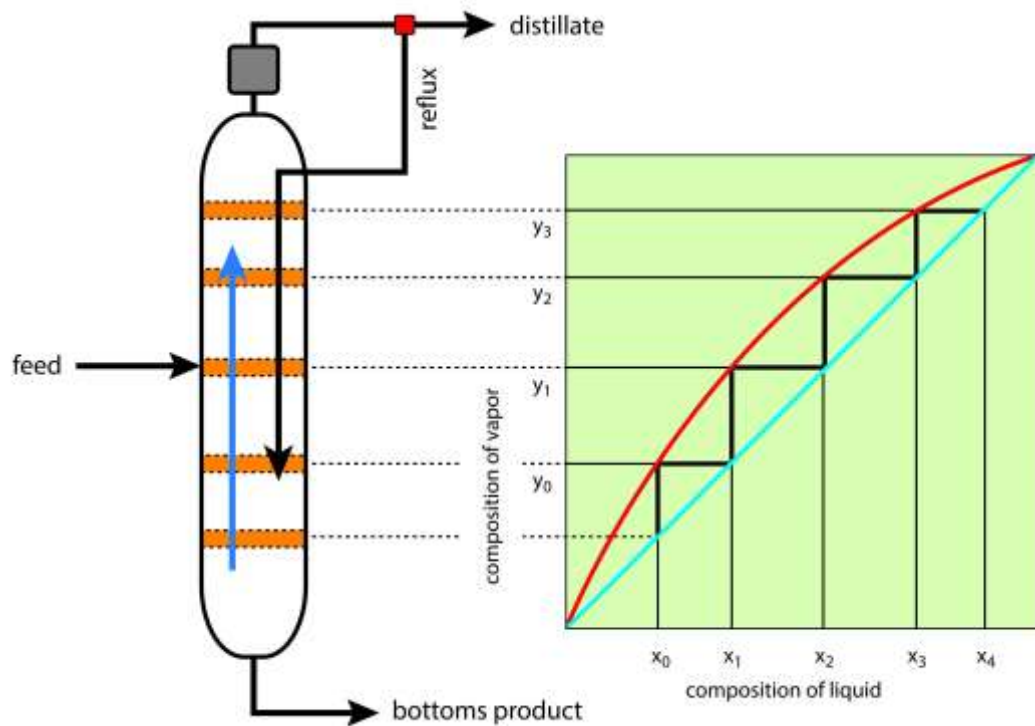


Рисунок 1.6 – Схема ректифікації.

У дефлегматорі 3 конденсація парів може здійснюватися за двома схемами:

- Повна конденсація, утилізації підлягає весь паровий потік, що виходить із колони. Після відділення флегми залишок конденсату утворює рідкий дистилат (верхній продукт), який після додаткового охолодження у холодильнику 6 транспортується до збірника 9.
- Часткова конденсація (парціальна дефлегмація), у дефлегматорі конденсується лише об'єм пари, необхідний для забезпечення заданого флегмового числа, а несконденсована частина цільового ЛЛК у

пароподібному стані переходить у холодильник-конденсатор 6, де відбувається її остаточне зрідження та охолодження.

Кубова рідина на виході з низу колони також розподіляється на два потоки: один рециркулює через кип'ятильник для підтримки парового навантаження, а інший – кубовий залишок (нижній продукт) – після температурного зниження у водоохолоджуваному холодильнику 7 виводиться у збірник 8.

Порівняльний аналіз безперервної та періодичної ректифікації демонструє суттєві технологічні переваги безперервного процесу. Стаціонарність робочих параметрів у часі дозволяє підтримувати точний регламентний режим, що спрощує операційне обслуговування та полегшує комплексну автоматизацію процесу за допомогою сучасних АСУ ТП.

Крім того, відсутність технологічних простоїв між циклами завантаження-вивантаження суттєво підвищує питому продуктивність установки, а загальні енерговитрати знижуються завдяки рекуперації тепла гарячого кубового залишку для попереднього підігріву вихідної суміші в теплообмінній апаратурі. Через ці техніко-економічні переваги у великотоннажних хімічних виробництвах застосовують виключно безперервну ректифікацію, тоді як періодичні процеси залишаються прерогативою малотоннажних, гнучких або нерівномірно завантажених промислових ліній.

1.2.3 Екстрактивна й азеотропна ректифікація

Екстрактивну ректифікацію використовують звичайно для поділу сумішей близькокиплячих компонентів, що характеризуються низькою відносною летючістю. Поділ таких сумішей доводиться проводити в колонах з дуже великим числом теоретичних тарілок і високою витратою пари через необхідність підтримувати велике флегмове число. Схема установки для проведення екстрактивної ректифікації представлена на рис.1.7.

значно меншу летючість порівняно з вихідними компонентами і здатний селективно абсорбувати один із них (наприклад, важколетючий компонент *B*). Внаслідок цього легколетючий компонент *A* евакуюється з верху колони 1 у вигляді високочистого дистиляту. Рідка суміш, що акумулюється в кубовій частині колони 1 і складається з компонента *B* та розділяючого агента *C*, спрямовується на розділення в другу (десорбційну) ректифікаційну колону 2. У цій колоні компонент *B* відокремлюється як дистилят, а регенований розділяючий агент *C*, що відбирається у вигляді кубового залишку, після охолодження повертається в замкнений цикл на зрошення верхньої секції першої колони 1.

При реалізації альтернативного методу – азеотропної ректифікації – вихідну азеотропну суміш так само подають на живильну тарілку колони, яка зверху зрошується поділяючим агентом *C*, проте в цьому випадку агент утворює з одним або кількома компонентами нову, більш летючу азеотропну суміш, що виводиться у вигляді гетероазеотропного дистиляту. Питома витрата розділяючого агента *C* в обох процесах принципово залежить від початкового складу вихідної сировини, але має протилежний характер залежності. При азеотропній ректифікації витрата розділяючого компонента *C* зростає прямо пропорційно підвищенню у вихідній суміші концентрації тих цільових компонентів, які переходять у дистилят. Навпаки, при екстрактивній ректифікації витрата розділяючого агента *C* збільшується за умови зростання у вихідному потоці концентрації тих компонентів, які зв'язуються розчинником і відбираються у вигляді кубового залишку першої колони, що зумовлено необхідністю підтримки стабільної концентрації селективного агента в рідкій фазі на масообмінних тарілках.

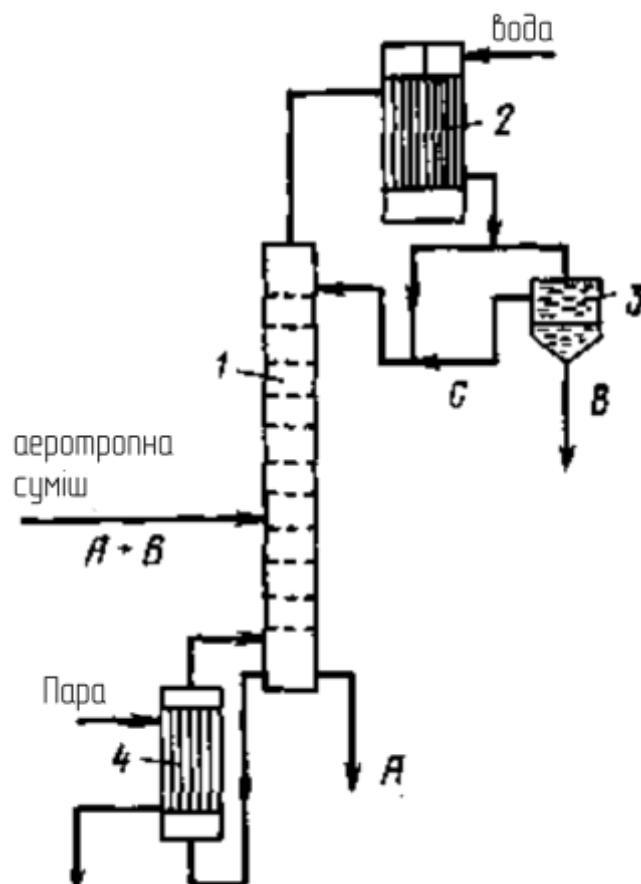
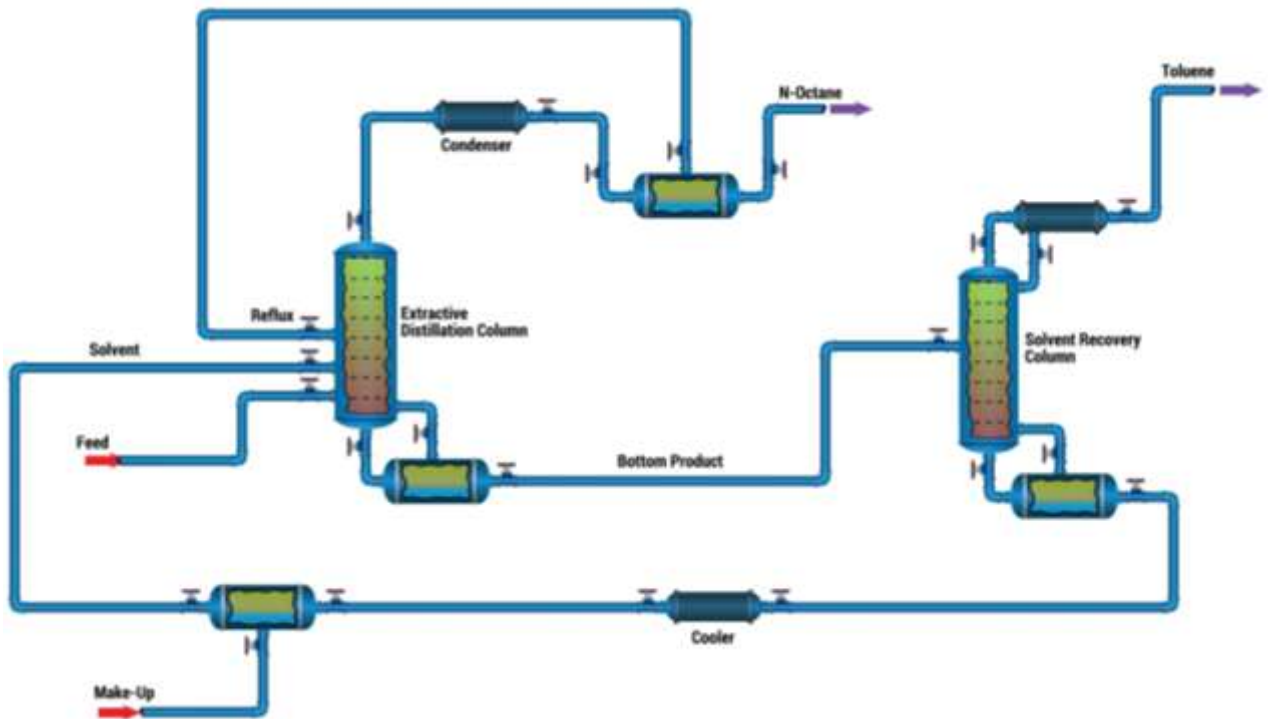


Рисунок 1.8 – Схема установки азеотропної ректифікації.

1 – колона; 2 – конденсатор; 3 – відстійник; 4 – кип'ятильник

Найбільш складним інженерно-технічним завданням при впровадженні методів екстрактивної та азеотропної ректифікації є науково обґрунтований

вибір селективного розділяючого агента. Цей компонент повинен відповідати комплексу суворих термодинамічних, кінетичних та техніко-економічних критеріїв, серед яких визначальними є забезпечення максимального градієнта підвищення коефіцієнта відносної летючості розділюваних компонентів вихідної суміші, а також висока ефективність і низька енергоємність його подальшої регенерації у десорбційних колонах. Крім того, розділюючий агент повинен мати високу розчиняльну здатність щодо розділюваних речовин для запобігання критичному розшаруванню рідкої фази в температурних режимах роботи колони, володіти термічною стабільністю, низькою корозійною активністю, екологічною безпекою, доступністю та мінімальною ринковою вартістю.

У практиці інженерного проектування первинний підбір такого агента здійснюється на основі довідкових даних щодо фазової рівноваги, хімічної сумішності та термодинамічної активності речовин. Завдяки своїй високій селективності, методи азеотропної та екстрактивної ректифікації широко застосовуються у великотоннажних промислових процесах, зокрема для чіткого розділення близькокиплячих вуглеводнів нафтових фракцій і зріджених природних газів, термолабільних рідких сумішей у технологіях синтезу вищих жирних кислот, а також для одержання абсолютно безводного етилового спирту (біоетанолу) та інших високочистих хімічних продуктів.

1.3. Типове устаткування проектованої установки

Для реалізації процесів ректифікації застосовують масообмінні апарати різноманітних конструкцій, базові типи яких за своїми гідродинамічними принципами ідентичні відповідним типам промислових абсорберів. У хімічній технології переважно використовують насадочні та тарілчасті ректифікаційні колони, тоді як для розділення термолабільних сумішей в умовах глибокого вакууму застосовують спеціалізовані плівкові та роторні колони різних модифікацій. За архітектурою внутрішніх контактних пристроїв – таких як

регулярні чи нерегулярні насадки, тарілки різних конфігурацій та елементи плівкового стоку – ці апарати аналогічні абсорбційним установкам. Проте, на відміну від абсорберів, ректифікаційні колони обов'язково інтегруються у розвинені теплообмінні контури, що включають кубовий випарник (кип'ятильник) та дефлегматор, а для мінімізації ексергетичних втрат і запобігання неконтрольованому теплообміну з навколишнім середовищем корпус колони покривають високоефективною тепловою ізоляцією.

Кубовий кип'ятильник призначений для часткового термічного випаровування низхідного рідкого потоку флегми з метою генерації та подачі висхідної парової фази під нижній контактний елемент колони (під насадку або нижню тарілку). Конструктивно кип'ятильники виконують у вигляді внутрішніх трубних змійовиків або кожухотрубних теплообмінних елементів, інтегрованих безпосередньо у куб колони. Проте в інженерній практиці суттєво зручнішими в експлуатації, технічному обслуговуванні та ремонті є виносні кип'ятильники, які монтують автономно нижче опорної обичайки колони, що забезпечує стабільну природну термосифонну циркуляцію кубової рідини за рахунок різниці густин двофазної суміші.

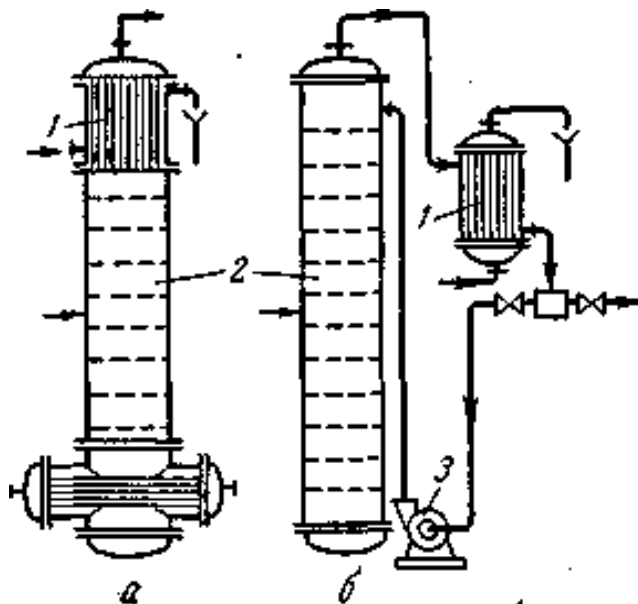


Рисунок 1.9 – Варіанти установки дефлегматорів:

а – безпосередньо на колоні; б – нижче по рівню від верхівки колони;

1 – дефлегматор; 2 – колона; 3 – насоси.

У періодично діючих ректифікаційних колонах кубова частина функціонально поєднує в собі ролі випарного пристрою та акумулюючої ємності для вихідної бінарної суміші. Через це повний геометричний об'єм куба розраховують із запасом, що в 1,3–1,6 рази перевищує об'єм одноразового завантаження сировини на один технологічний цикл. Термічний обігрів кип'ятильників у більшості промислових схем здійснюється насиченою водяною парою через її високу питому теплоту фазового переходу.

Дефлегматор, призначений для повної або часткової конденсації висхідного парового потоку та генерації рідкого зрошення (флегми), конструктивно являє собою кожухотрубний теплообмінний апарат. Традиційно пари ЛЛК конденсуються у міжтрубному просторі, тоді як в інтратубулярному (трубному) просторі циркулює охолоджувальний агент, найчастіше технічна вода. Проте векторна спрямованість потоків – тобто вибір простору для конденсації пари та рух холодоагенту – оптимізується індивідуально для кожного проекту з метою максимізації загального коефіцієнта теплопередачі, зниження гідродинамічного опору та забезпечення зручності механічного чи хімічного очищення теплообмінних поверхонь від відкладень.

За умови реалізації режиму часткової конденсації парів дефлегматор монтують безпосередньо над колоною для досягнення максимальної конструктивної компактності або виносять за її межі. При цьому отриманий конденсат із кубової частини дефлегматора самопливом повертається на верхню тарілку через гідравлічний затвор, що дозволяє виключити з технологічної схеми периферійні ділителі потоку.

У схемах із повною конденсацією парової фази дефлегматор може розташовуватися вище колони, безпосередньо на її верхній кришці, або суттєво нижче верхнього штуцера апарата з метою мінімізації загальної висоти і металомісткості опорних металоконструкцій установки. За умови нижнього (низького апаратурного) розміщення дефлегматора 1, повернення флегми у колону 2 здійснюється примусово за допомогою відцентрового насоса. Таке компонування теплообмінних вузлів є найбільш доцільним і поширеним при

відкритому (зовнішньому) розміщені ректифікаційних комплексів поза виробничими приміщеннями, що суттєво знижує капітальні витрати на капітальне будівництво в умовах помірного клімату.

1.3.1 Барботажні колони

Барботажні (тарілчасті) колони ефективно застосовують у великотоннажних виробництвах, оскільки вони стабільно функціонують у широкому діапазоні флуктуацій гідродинамічних навантажень по паровій та рідкій фазах, забезпечуючи високу чіткість розділення компонентів. Основним конструктивним недоліком барботажних апаратів є їхній відносно високий гідравлічний опір, проте в умовах атмосферної або підвищеної ректифікації цей чинник не має вирішального значення. Зростання втрат тиску на тарілках призводить лише до помірного збільшення загального тиску в кубі та, як наслідок, до незначного підвищення температури кипіння рідини в кип'ятильнику колони.

Водночас зазначений недолік – значний гідравлічний опір сукупності контактних пристроїв – залишається критичним для процесів вакуумної ректифікації термолабільних речовин. У вакуумних системах будь-яке падіння тиску по висоті апарата суттєво підвищує абсолютний тиск у кубовій частині, що змушує збільшувати температуру кубового залишку. Для температурночутливих компонентів це є неприпустимим, оскільки призводить до їхнього термічного розкладання, полімеризації або деградації, через що у вакуумній технології барботажні тарілки переважно замінюють на регулярні насадки з низьким сухим гідравлічним опором..

1.3.2 Насадочні колони

У насадочних масообмінних апаратах застосовують контактні елементи різних геометричних конфігурацій, проте у промисловій практиці найбільш поширеними залишаються колони з регулярним або нерегулярним засипанням кільцями Рашіга. Знижений гідравлічний опір насадочних колон порівняно з

барботажами (тарілчастими) є критично важливим фактором при реалізації процесів вакуумної ректифікації термолабільних сумішей. У протилежному разі, навіть за умови підтримки глибокого вакууму у дефлегматорі та верхній частині колони, значне падіння тиску по висоті апарата призведе до зростання абсолютного тиску в кубі, що нівелює ефект зниження температури кипіння вихідної суміші в кип'ятильнику. Для мінімізації цього опору в конструкціях вакуумних ректифікаційних колон використовують насадочні тіла з максимально високим питомим вільним об'ємом і порозністю.

На відміну від процесів абсорбції, ректифікація є адіабатичним процесом, який не потребує проміжного відведення тепла безпосередньо з масообмінної зони колони. Тому низькі коефіцієнти теплопередачі через шар насадки є технологічною перевагою, що сприяє підтримці теплового балансу апарата. Водночас суттєвим обмеженням насадочних колон є висока чутливість до масштабного ефекту, у колонах великого перерізу важко забезпечити рівномірне зрошення масиву насадки через пристінне ефектування та каналутворення рідкої фази. Внаслідок цього діаметр промислових насадочних ректифікаційних колон зазвичай обмежують діапазоном 0,8–1,0 м.

Ефективність масопередачі в таких апаратах прямо пропорційна площі активної міжфазової поверхні, якою виступає змочена плівка рідини на елементах насадки. Відповідно, насадочні тіла повинні поєднувати високу питому поверхню в одиниці об'єму з комплексом суворих експлуатаційних вимог:

- Висока ліофільність, матеріал насадки повинен мати низький крайовий кут змочування щодо компонентів рідкої фази для формування суцільної та стабільної плівки розчину.
- Мінімальний аеродинамічний опір, забезпечення максимального вільного об'єму та живого перерізу насадки для безперешкодного транспортування висхідного потоку пари.

- Висока пропускна здатність, здатність працювати при високих об'ємних навантаженнях по парі та рідині без передчасного настання режиму захлинання колони.
- Оптимальні фізико-механічні характеристики, мінімальна насипна щільність для зниження металомісткості опорних конструкцій у поєднанні з високою механічною міцністю на здавлювання та стирання.
- Хімічна та економічна доцільність, абсолютна корозійна стійкість в агресивних технологічних середовищах, термічна стабільність, а також низька ринкова вартість і доступність у промислових масштабах.

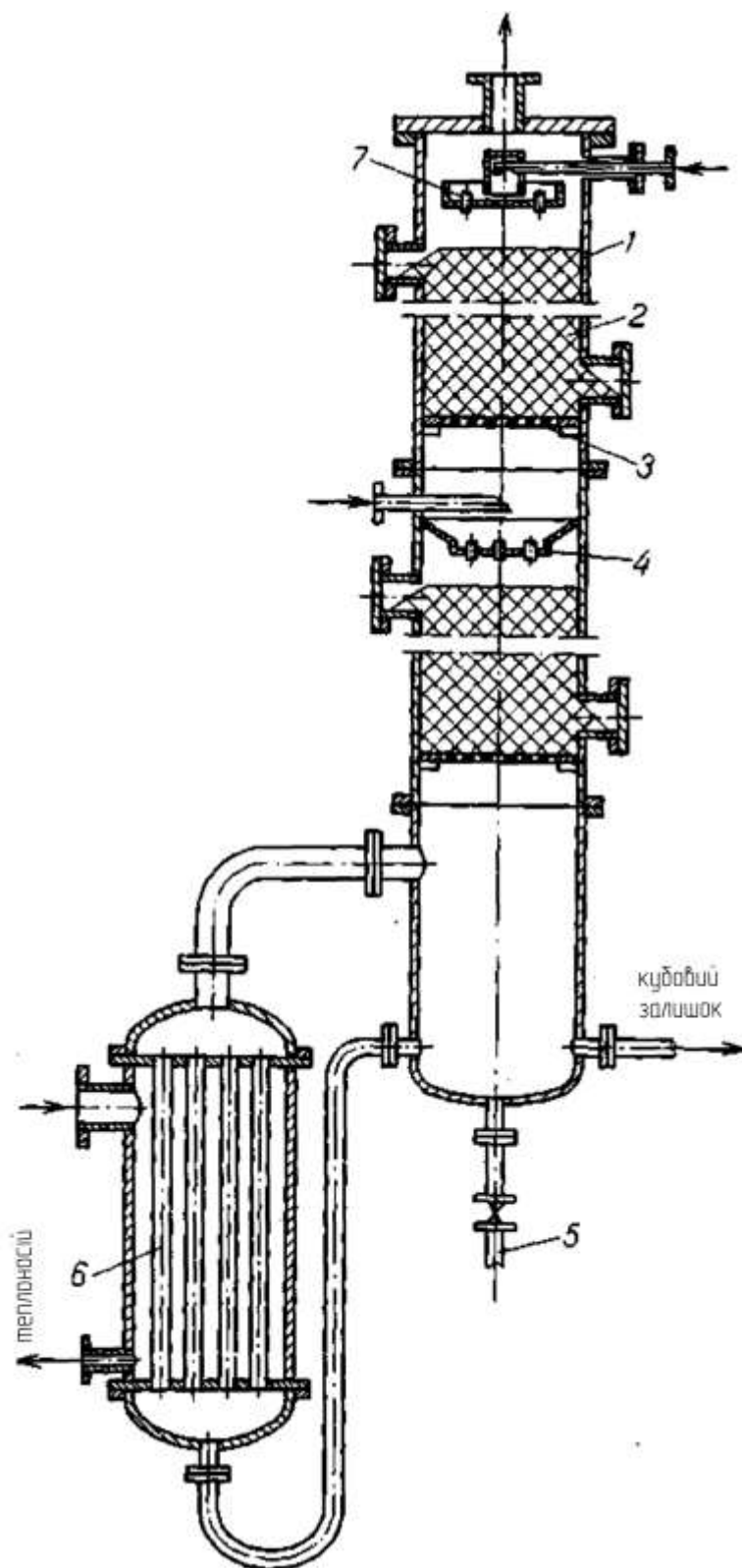


Рисунок 1.10 – Насадочна ректифікаційна колона з кип'ятильником.

1 – корпус; 2 – насадка; 3 – опорна решітка; 4 – перерозподільник флегми; 5 – патрубок для зливу кубового залишку; 6 – кип'ятильник; 7 – зрошувач.

Очевидно, що універсального типу насадки, який би повною мірою задовольняв усім зазначеним критеріям, не існує, оскільки оптимізація одних

експлуатаційних характеристик неминуче призводить до погіршення інших. Наприклад, інтенсифікація масообміну шляхом збільшення питомої поверхні насадки призводить до зменшення її вільного об'єму, що екстраполює суттєве зростання гідравлічного опору апарата та знижує гранично припустиму швидкість висхідного парового потоку, прискорюючи настання режиму захлинання колони.

Через наявність цих конструктивних компромісів у хімічній промисловості експлуатують широкий номенклатурний ряд насадочних тіл, які класифікують за формою, геометричними розмірами та матеріалом виготовлення (вуглецеві та нержавіючі сталі, хімічно стійка кераміка, порцеляна, фторопласти, поліпропілен тощо). Це дозволяє підбирати оптимальну конфігурацію контактних елементів під специфіку конкретного технологічного процесу ректифікації, враховуючи корозійну агресивність середовища, температурний режим, робочий тиск та задану продуктивність установки.

1.3.3 Апарати плівкового типу

Зазначені апарати ефективно застосовуються для вакуумної ректифікації термолабільних сумішей, що мають низьку термічну стабільність при нагріванні, таких як високомолекулярні сполуки, окремі мономери, олігомери, а також чутливі до перегріву продукти тонкого органічного синтезу.

Головною перевагою ректифікаційних апаратів плівкового типу є мінімальний гідравлічний опір масообмінної зони. Крім того, вони характеризуються низькою питомою затримкою (утриманням) рідини в одиниці робочого об'єму апарата, що суттєво скорочує час перебування продукту в зоні високих температур і мінімізує його термічну деградацію.

До категорії плівкових ректифікаційних апаратів належать колони з регулярною насадкою, виконаною у вигляді пакетів вертикальних трубок малого діаметра (6–20 мм) у багатотрубних конфігураціях, а також пакетів плоскопаралельної або стільникової насадки з вертикальними каналами

складної геометрії. Такі структуровані блоки виготовляють із перфорованих металевих листів або дрібнопористої металевої сітки для забезпечення ефективного капілярного розтікання рідкої фази. Окремим класом високоефективного обладнання для глибокого вакууму є роторно-плівкові колони, у яких розподіл рідини та формування тонкої турбулізованої плівки на внутрішній стінці корпусу здійснюється примусово за допомогою механічного роторного пристрою з лопатями.

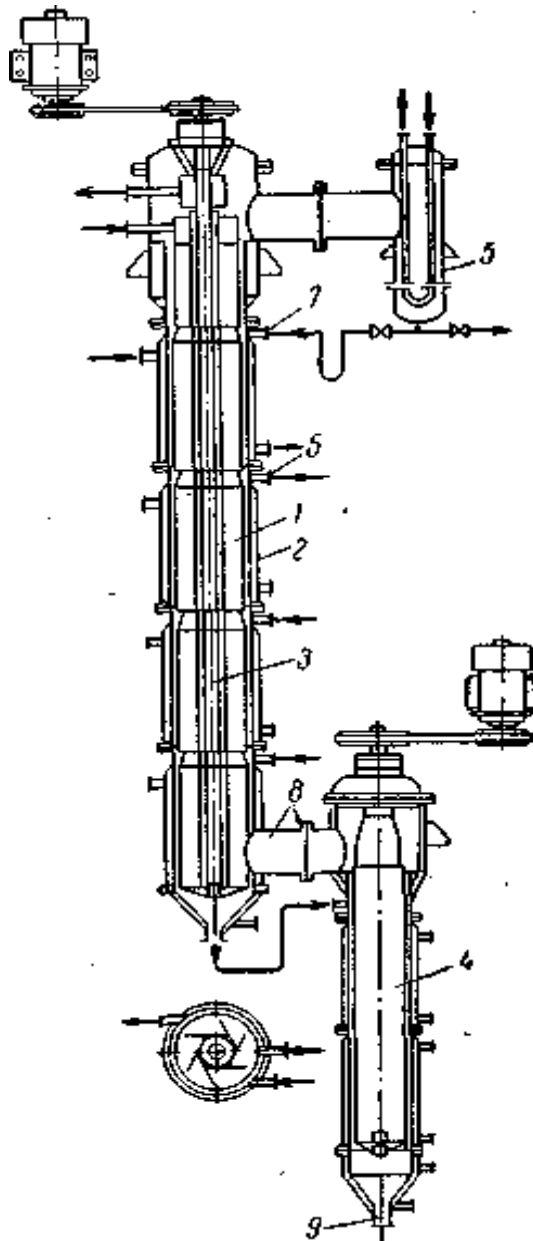


Рисунок 1.10 – Схема ректифікаційної колони роторно-плівкового типу.

Оснoву апарата становить вертикальний циліндричний корпус колони 1, обладнаний теплообмінною сорочкою для обігріву 2, яка забезпечує

підтримання заданого температурного профілю та компенсує втрати тепла в навколишнє середовище. Усередині корпусу по всій його висоті центровано встановлено лопатевий ротор 3, який примусово розподіляє рідку фазу у вигляді тонкої, високотурбулізованої плівки по внутрішній робочій поверхні колони, що суттєво інтенсифікує процеси тепло- та масообміну. У нижній частині апарата інтегровано роторний випарник 4, призначений для остаточного вичерпування легколетючого компонента з низхідного потоку, а у верхній частині або винесено автономно розташовано конденсатор-дефлегматор 5, який забезпечує повну або часткову конденсацію висхідної пари для отримання дистилату та формування потоку зрошення.

Транспортування технологічних потоків здійснюється через систему спеціалізованих штуцерів: вихідна бінарна суміш подається в зону розділення через штуцер для введення вихідної суміші 6, а повернення зрідженої частини ЛЛК для стабілізації масообміну на верхньому ступені реалізується через штуцер для введення флегми 7. Подача додаткового парового навантаження або газоподібного теплоносія в кубову секцію здійснюється через штуцер для введення пари 8, тоді як збіднений важколетючий продукт безперервно евакуюється з нижньої точки апарата через штуцер для виводу залишку 9.

Головними експлуатаційними та конструктивними недоліками роторно-плівкових колон є сувор обмеженість їхньої геометричної висоти й діаметра, що зумовлено високою технологічною складністю виготовлення, прецизійними вимогами до балансування, а також жорсткими критеріями щодо механічної міцності, металомісткості та жорсткості довгомірних роторних валів. Окрім того, наявність рухомих елементів та торцевих ущільнень, що працюють в умовах глибокого вакууму, суттєво підвищує питомі експлуатаційні витрати на технічне обслуговування та планово-попереджувальні ремонти.

У разі переробки сильно забруднених середовищ, схильних до смолоутворення, полімеризації або відкладення твердого осаду, доцільно застосовувати великокомпонентні регулярні насадки (зокрема, за умов роботи під підвищеним тиском), або використовувати спеціалізовані колони з рухомою

(плаваючою) насадкою. Як контактні елементи у таких апаратах зазвичай експлуатують легкі порожнисті кулі з ліофільних полімерних матеріалів, які при досягненні певних швидкостей висхідного газового потоку переходять у псевдозріджений (зважений) стан. Внаслідок постійного хаотичного обертання, зіткнення та інтенсивного тертя кулястих тіл між собою в турбулентному потоці відбувається ефект самоочищення, що практично виключає забивання та механічне забруднення насадкової зони.

У колонах із плаваючою насадкою інженерно допустимим є підтримання значно вищих фіктивних швидкостей газу порівняно з класичними апаратами з нерухомим шаром засипних тіл. Динамічна особливість системи полягає в тому, що форсування швидкості газового потоку викликає пропорційне розширення псевдозрідженого шару кульок і збільшення порозності системи. Це компенсує кінетичну енергію потоку і стримує локальне зростання швидкості безпосередньо у міжфазних каналах. Завдяки такому гідродинамічному механізму суттєве збільшення швидкості газу (в межах від 3 до 5 м/с) не призводить до критичного експоненційного зростання загального гідравлічного опору апарата, відсуваючи межу гідродинамічного інвертування фаз (захливання колони).

1.3.4 Відцентрові ректифікатори

Для інтенсифікації масообміну й підвищення ефективності поділу були запропоновані апарати, що працюють на принципі використання відцентрової сили (колони з обертовою трубою, горизонтальні апарати з обертовим спіралевидним ротором).

Відцентровий плівковий ректифікаційний апарат складається з нерухомого кожуха, у якому обертається з великою швидкістю ротор, що складається зі спіральної металевої стрічки, обмеженої зсередини й зовні сітчастими циліндрами. Початкова суміш рухається по стінках спіралі у вигляді тонкої плівки від центра до периферії. Пара рухається з великою швидкістю протитоком до рідини, і взаємодія фаз відбувається на поверхні

плівки. Інтенсивність масообміну визначається опір рідкої й парової плівок. Тому ефективність плівкової ректифікації зростає й турбулізацією потоків пари й рідини.

Незважаючи на складність пристрою, відцентрові ректифікаційні апарати можуть бути успішно застосовані при поділі сумішей, які вимагають дуже великої кількості тарілок.

1.4 Тарілчасті колони

Найпоширенішими абсорбційними апаратами є тарілчасті колони. По своєму пристрої вони діляться на колони з ковпачковими тарілками й колони із сітчатими тарілками.

1.4.1 Ковпачкові колони

Ковпачкові тарілчасті апарати є класичним та найбільш поширеним типом обладнання у промислових ректифікаційних установках. Корпус колони невеликого діаметра компонується з послідовно встановлених контактних тарілок 1, на кожній з яких центровано один або кілька ковпачків 2 круглого перерізу, забезпечених паровими патрубками 3 для транспортування висхідного газового потоку. Нижня кромка ковпачка постійно занурена у рідку фазу, що створює стійкий гідравлічний затвор і змушує пару, яка виходить із підковпачкового простору, барботувати крізь локальний шар рідини на тарілці. Для інтенсифікації міжфазного масообміну периферійна частина ковпачків обладнана зубчастими прорізами або щілинами, які забезпечують первинне диспергування суцільного парового потоку на дрібні бульбашки та струмені.

Гідродинамічне регулювання товщини барботажного шару, а також організований приплив і відведення рідкої фази здійснюються за допомогою переливних пристроїв (трубок або карманів) 4. Переливи розташовують на діаметрально протилежних кінцях суміжних тарілок, що забезпечує зигзагоподібний (перехресний) рух флегми по висоті апарата у взаємно протилежних напрямках.

Кінетика фазового контакту на ковпачковій тарілці має специфічний характер. Під час форсування парового навантаження окремі бульбашки пари, що виходять із прорізів, коалесують у суцільні газові струмені, частково оголюючи живий переріз щілин та утворюючи динамічні парові канали крізь товщу розчину. Внаслідок цього безпосередньо у зоні занурення ковпачка питома дзеркальна поверхня контакту фаз залишається відносно низькою. Ефективна зона інтенсивного тепломасообміну переноситься у надтарілчастий простір, де в результаті високошвидкісного розпилення газу в рідині та механічного зрізання плівок за рахунок сил тертя формується розвинений динамічний шар нестабільної газорідинної емульсії (піни) та бризок. Наявність цієї турбулізованої високодисперсної зони забезпечує високу роздільну здатність ковпачкових тарілок і чіткість фракціонування бінарних та багатокомпонентних сумішей.

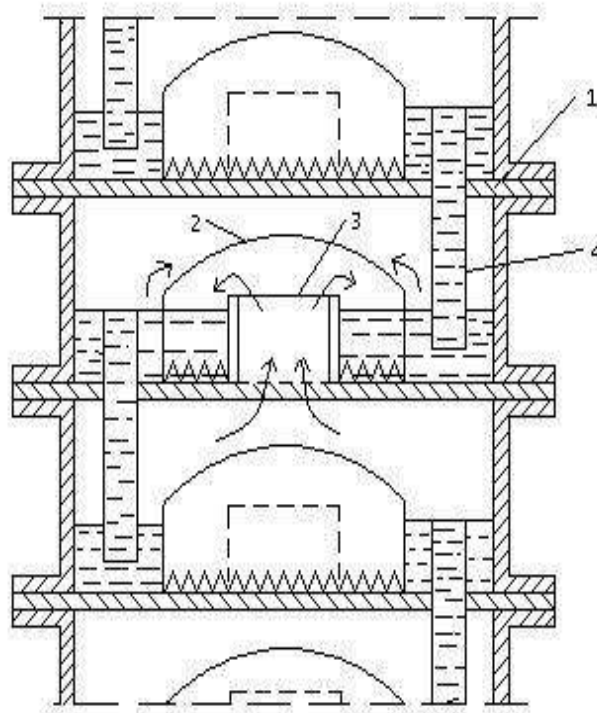


Рисунок 1.12 – Схема тарілчастої, ковпачкової колони:

1 - тарілки; 2 - ковпачки; 3 - парові патрубки; 4 - переливні трубки.

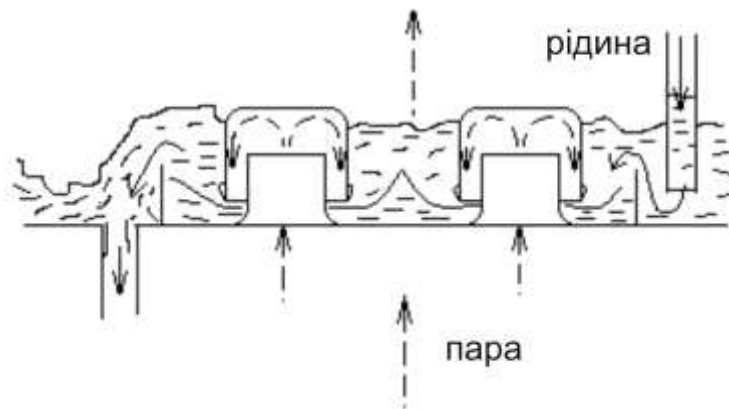


Рисунок 1.13 – Робоча схема ковпачкової тарілки.

1.4.2 Сітчасті колони

Колони цього типу рис. 1.14. Сітчасті масообмінні колони є одним із найбільш ефективних та поширених типів тарілчастих апаратів у хімічній технології. Конструктивно вони складаються з вертикального циліндричного корпусу 1, всередині якого горизонтально змонтовані робочі тарілки 2. По всій активній площі цих тарілок рівномірно перфоровано значне число дрібних отворів круглого перерізу, призначених для проходження висхідного парового потоку.

Гідродинамічне регулювання товщини барботажного шару на кожному ступені розділення, а також безперервний приплив і відведення рідкої фази забезпечуються за допомогою вертикальних переливних трубок 3. Нижні кінці цих трубок конструктивно занурені у спеціальні акумулюючі склянки (або кармани) 4, розташовані на нижчих тарілках. Таке компонування формує надійний гідравлічний затвор, який унеможливорює прорив парової фази через зливні канали та гарантує чітко організований протиточний рух взаємодіючих фаз по всьому об'єму апарата.

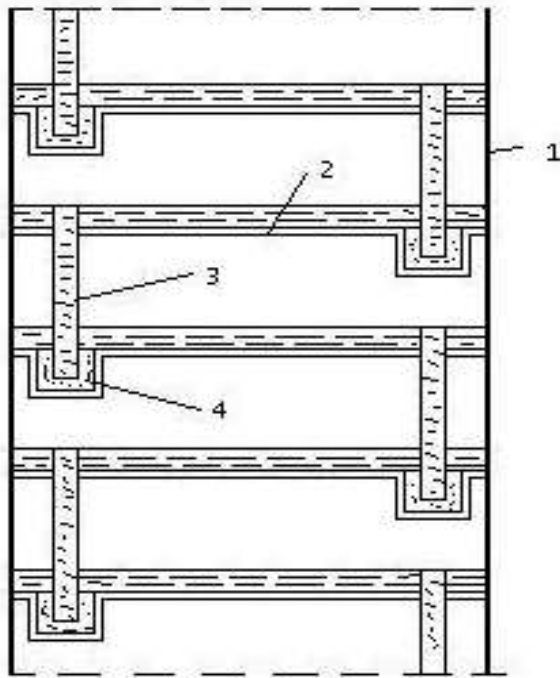


Рисунок 1.14 – Схема пристрою сітчастої колони.

1 – корпус; 2 – тарілка сітчаста; 3 – трубка переливна ; 4 – склянка.

Парова фаза під тиском проходить крізь перфоровані отвори сітчастої тарілки і диспергується в рідкій фазі у вигляді чисельних дрібних струменів. Безпосередньо біля дзеркала тарілки газова фаза ще не встигає повністю перемішатися з розчином, тому розвинений гідродинамічний режим утворюється на деякій відстані від металевої поверхні, де формується інтенсивний шар рухомої піни та бризок. Ця високотурбулізована газорідинна емульсія є основною робочою областю для здійснення міжфазного масообміну та теплообміну між паром і рідиною на кожному ступені розділення.

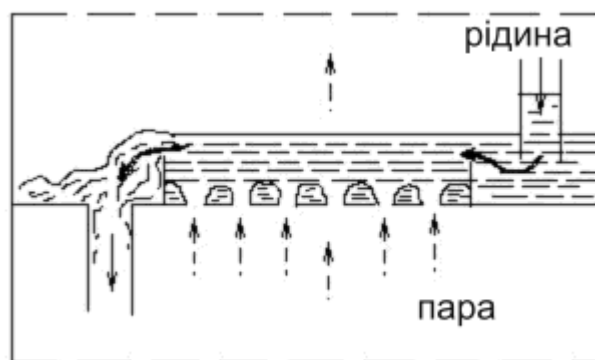


Рисунок 1.15 – Схема роботи сітчастої тарілки.

У певному (оптимальному) діапазоні гідродинамічних навантажень сітчасті тарілки мають вищий коефіцієнт корисної дії (К.К.Д.) порівняно з ковпачковими, що зумовлено більш рівномірним розподілом пари та розвиненою поверхнею контакту фаз. Проте інтервал стійкої роботи сітчастих колон за витратами рідини й пари є відносно вузьким. При падінні кінетичної енергії висхідного потоку і зниженні швидкості пари до критичного значення (близько 0,1 м/с) сила парового напору стає недостатньою для утримання рідкої фази, внаслідок чого відбувається масове просочування (провали) рідини крізь перфорацію, що викликає різке падіння роздільної здатності та К.К.Д. тарілки.

Для забезпечення стабільного безпровального режиму роботи динамічний тиск і швидкість пари, яка проходить крізь отвори сітки, повинні строго перевищувати сумарний гідростатичний тиск шару рідини на тарілці та сили її поверхневого натягу.

Ефект нерівномірного проскакування рідини суттєво зростає зі збільшенням геометричного діаметра апарата та за наявності найменших кутових відхилень тарілки від строго горизонтального положення. Через це профільний розрахунок діаметра та кроку перфорації виконують таким чином, щоб забезпечити утримання флегми без її локального провалу і водночас запобігти вторинному зворотному явищу – надмірному механічному винесенню (унесенню) бризок рідини парою на вищерозміщені ступені. У промисловій практиці діаметр отворів сітчастих тарілок зазвичай вибирають у межах 0,8–3,0 мм.

Жорстка прив'язка до номінальних швидкостей ректифікації суттєво ускладнює гнучке операційне регулювання технологічного режиму сітчастих колон при флуктуаціях подачі сировини. Крім того, вони висувають прецизійні вимоги до монтажу внутрішніх пристроїв: за наявності перекосу тарілки висхідна пара починає масово прориватися крізь осушену (вищу) частину сітки, практично не контактуючи з основним об'ємом флегми, яка акумулюється в заниженій зоні.

Сітчасті контактні пристрої також поступаються ковпачковим за верхньою інженерною межею навантаження – у режимах форсованого масообміну питома втрата напору (гідравлічний опір) у них зростає значно швидше, ніж у ковпачкових аналогах. Критичним експлуатаційним фактором є також повне спорожнення (злив) рідини з усіх тарілок сітчастої колони при раптовому припиненні подачі теплоносія в кип'ятильник або при глибокому падінні тиску пари. У таких випадках технологічний режим повністю порушується, що вимагає повторного виходу колони на стаціонарний режим фракціонування.

Водночас конструктивна простота сітчастих тарілок забезпечує високу ремонтпридатність, легкість та зручність їхнього механічного очищення, пропарювання та промивання.

Висока чутливість до динамічних варіацій навантаження, а також схильність до швидкого забивання (заростання) дрібних отворів дисперсними шламами, осадами або кристалічними фазами суттєво обмежують універсальність сітчастих колон. Їхнє цільове промислове застосування зосереджене переважно в технологіях ректифікації етилового спирту, а також у процесах низькотемпературного розділення зріджених газів (зокрема, у повітророздільних криогенних кисневих установках). Для штучної інтенсифікації масообміну та підвищення К.К.Д. у сучасних модифікаціях сітчастих тарілок реалізують секціонування потоків, що дозволяє подовжити траєкторію руху флегми і збільшити тривалість безпосереднього міжфазного контакту.

1.5 Характеристики отримуваних речовин

1.5.1 Бензол

Бензол (C_6H_6 , *PhH*) – найпростіший ароматичний вуглеводень, який являє собою безбарвну рухливу рідину з характерним солодкуватим запахом. З точки зору хімічної структури бензольне кільце є класичним прикладом спряженої π -електронної системи, де шість p -орбіталей атомів Карбону

утворюють єдину делокалізовану хмару, що забезпечує молекулі високу термодинамічну стабільність (енергію ароматичної стабілізації).

У промислових масштабах бензол є базовим сировинним компонентом і ключовою вихідною речовиною для процесів основного органічного та нафтохімічного синтезу. Його використовують як високооктанову добавку до моторних палив (бензинів), а також як прекурсор у виробництві широкого спектра індустриальних продуктів:

- Мономерів та полімерів, фенілетилену (стиролу) для отримання полістиролу, капролактаму та адипінової кислоти для синтезу поліамідів (нейлону та капрону);
- Синтетичних каучуків і гуми, через проміжні фази алкілювання та дегідрування;
- Фармацевтичних препаратів, синтетичних лікарських засобів різних груп;
- Анілінових барвників, ПАР (поверхнево-активних речовин) та пестицидів.

Попри те, що бензол у незначних концентраціях присутній у фракціях сирої нафти та кам'яновугільній смолі, основним промисловим джерелом його одержання є вторинні процеси нафтопереробки: каталітичний риформінг бензинових фракцій (дегідроциклізація алканів та дегідрування циклоалканів), піроліз нафтопродукції, а також гідродеалкілювання толуолу. З екологічної та медико-біологічної точок зору бензол є небезпечним екотоксикантом. Він володіє вираженою загальнотоксичною, хронічною мутагенною та канцерогенною дією. Хімічна сполука належить до II класу небезпеки (високонебезпечні речовини) і за класифікацією Міжнародного агентства з вивчення раку (IARC) віднесена до групи 1, оскільки тривалий інгаляційний або дермальний контакт із його парами уражає систему кровотворення (кістковий мозок), викликаючи апластичну анемію та гострі лейкози. У зв'язку з цим промислове поводження з бензолом суворо регламентується стандартами охорони праці, а його вміст у товарних автомобільних бензинах жорстко обмежується нормами екологічних стандартів.

1.5.2 Фізичні властивості бензолу рідкого.

Бензол у стандартних умовах являє собою безбарвну рухливу рідину зі специфічним різким солодкуватим запахом ароматичного ряду. Нижче наведено базові фізико-хімічні константи та термодинамічні характеристики цієї сполуки, що мають ключове значення для розрахунку процесів розділення та масообмінної апаратури:

- Молекулярна (молярна) маса – 78,11 г/моль;..
- Температура плавлення (кристалізації) +5,53 °C (у технічній літературі часто округлюється до +5,6 °C);
- Температура кипіння при атмосферному тиску 101,3 кПа, +80,1 °C – +80,2 °C;
- Густина (при температурі 20 °C) – 0,879 г/см³ (чи 879 кг/м³);
- Показник заломлення (n_D^{20}) – 1,5011 .

Пожежовибухонебезпека та характер горіння

Через високий масовий вміст Карбону в молекулі ($\approx 92,3\%$) та стабільність ароматичного ядра, повне термічне окиснення бензолу у повітрі є ускладненим. При підпалюванні на повітрі сполука горить яскравим, але сильно кіптявим полум'ям з виділенням великої кількості дисперсного вуглецю (сажі). Парування бензолу при змішуванні із повітрям створює детонаційні, вибухонебезпечні суміші. Нижня межа концентрації вибуховості (НКМВ) становить 1,2%, а верхня (ВКМВ) – 8,0% за об'ємом.

Розчинність та термодинаміка бінарних систем. Бензол є класичним гідрофобним (ліпофільним) розчинником. Він має необмежену взаємну розчинність з неполярними та малополярними органічними сполуками: моторними бензинами, гасом, складними і простими ефірами, хлороформом, абсолютним спиртом та іншими вуглеводнями.

Водночас розчинність бензолу у воді є вкрай низькою і становить лише 1,79 г/л при температурі 25 °C. При спробі розділення бінарної системи бензол–

вода методом класичної дистиляції суміш поводить як гетероазеотропна система з позитивним відхиленням від закону Рауля. Вона утворює стійку мінімально-киплячу азеотропну суміш, яка за атмосферного тиску випаровується при сталій температурі +69,25 °C. Склад цього гетероазеотропу становить 91,2% бензолу та 8,8% води за масою, що робить неможливим повне зневоднення бензолу звичайною ректифікацією і вимагає застосування методів спеціальної (азеотропної або екстрактивної) ректифікації.

1.5.3 Хімічні властивості

Хімічні властивості бензолу: Реакції електрофільного заміщення (S_EAr) та приєднання

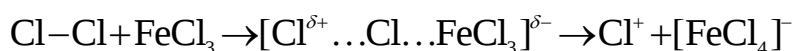
Завдяки термодинамічній стабільності делокалізованої π -електронної системи (ароматичного *sexteta*), для бензолу найбільш характерними є реакції заміщення, що перебігають за механізмом електрофільного заміщення (S_EAr).

При цьому цілісність бензольного кільця зберігається. Реакції приєднання або розриву кільця є енергетично не вигідними і реалізуються лише в жорстких умовах (високі температури, тиск, радикальне ініціювання).

Галогенування бензолу. Електрофільне заміщення (в присутності каталізаторів – кислот Льюїса).

При взаємодії з чистими галогенами (Cl_2 , Br_2) у присутності безводних солей- $FeCl_3$, $FeBr_3$ або $AlCl_3$ відбувається заміщення атома Гідрогену з утворенням галогенбензолів.

Роль каталізатора (кислоти Льюїса) полягає в поляризації молекули галогену та генерації активної електрофільної частинки (Cl^+ або Br^+):



Загальне рівняння та стадії процесу:



Радикальне приєднання та заміщення (без каталізатора, під дією УФ-випромінювання). За відсутності каталізаторів, під впливом квантів світла ($h\nu$) або високої температури, процес переходить на радикальний механізм.

- Реакція приєднання (повне насичення кільця): При сонячному або ультрафіолетовому опроміненні бензол приєднує три молекули хлору з руйнуванням ароматичної системи, утворюючи гексахлорциклогексан (гексахлоран) – $C_6H_6 + 3Cl_2 \xrightarrow{h\nu} C_6H_6Cl_6$
- Глибоке заміщення (у жорстких умовах): При тривалому термічному хлоруванні можливе повне заміщення Гідрогену з утворенням стійкого гексахлорбензолу – $C_6H_6 + 3Cl_2 \xrightarrow{h\nu, \Delta} C_6Cl_6 + 3H_2$

Алкілювання за Фріделем-Крафтсом (взаємодія з галогенопохідними алканів). Введення алкільної групи в бензольне кільце здійснюється за допомогою алкілгалогенідів у присутності безводного алюміній хлориду ($AlCl_3$). Каталізатор поляризує зв'язок C–Cl у хлоралкані, створюючи активний карбокатион, який атакує π -систему бензолу, (утворення етилбензолу)

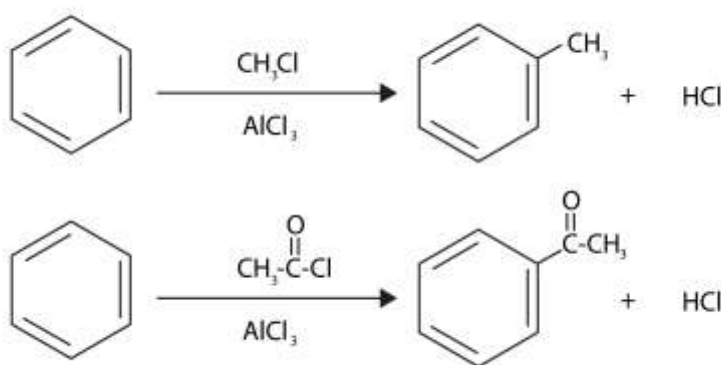


Рисунок 1.16 – Етилбензол

Цей метод також широко застосовується для взаємодії бензолу з алкенами (наприклад, з етиленом або пропіленом) у промисловості для синтезу етилбензолу та кумолу (ізопропілбензолу) в присутності кислотних каталізаторів (H_3PO_4 або $AlCl_3$).

1.5.4 Виробництво.

На сьогодні у нафтохімічній та коксохімічній промисловості виділяють три принципово різних технологічних способи промислового виробництва бензолу (C_6H_6).

Коксування кам'яного вугілля (Ретроспективний метод). Історично цей процес був першим джерелом промислового одержання ароматичних вуглеводнів і залишався домінантним до середини XX століття. Наразі сировинна частка бензолу, виділеного з сирого бензолу кам'яновугільної смоли, становить менше 1 % від світового обсягу виробництва.

Критичним технологічним недоліком цього методу є високий вміст сірчистих домішок, зокрема тіофену C_4H_4S , який має близьку до бензолу температуру кипіння ($+84^\circ C$). Оскільки тіофен є сильною каталітичною отрутою для більшості процесів подальшого органічного синтезу (наприклад, при гідруванні бензолу до циклогексану), такий продукт потребує дорогої та енергоємної стадії гідроочищення, що робить метод економічно неконкурентоспроможним порівняно з нафтохімічними аналогами.

Каталітичний риформінг (Ароматизація) бензинових фракцій нафти. Цей процес є базовим джерелом одержання бензолу в США, а в країнах Західної Європи та Японії забезпечує від 40 % до 60 % загального обсягу випуску. Цільовою сировиною є прямогонні бензинові фракції (лігроїн), які піддають дегідроциклізації алканів та дегідруванню циклоалканів на платинових або ренієвих каталізаторах під тиском водню при температурах $+480^\circ C - +520^\circ C$.

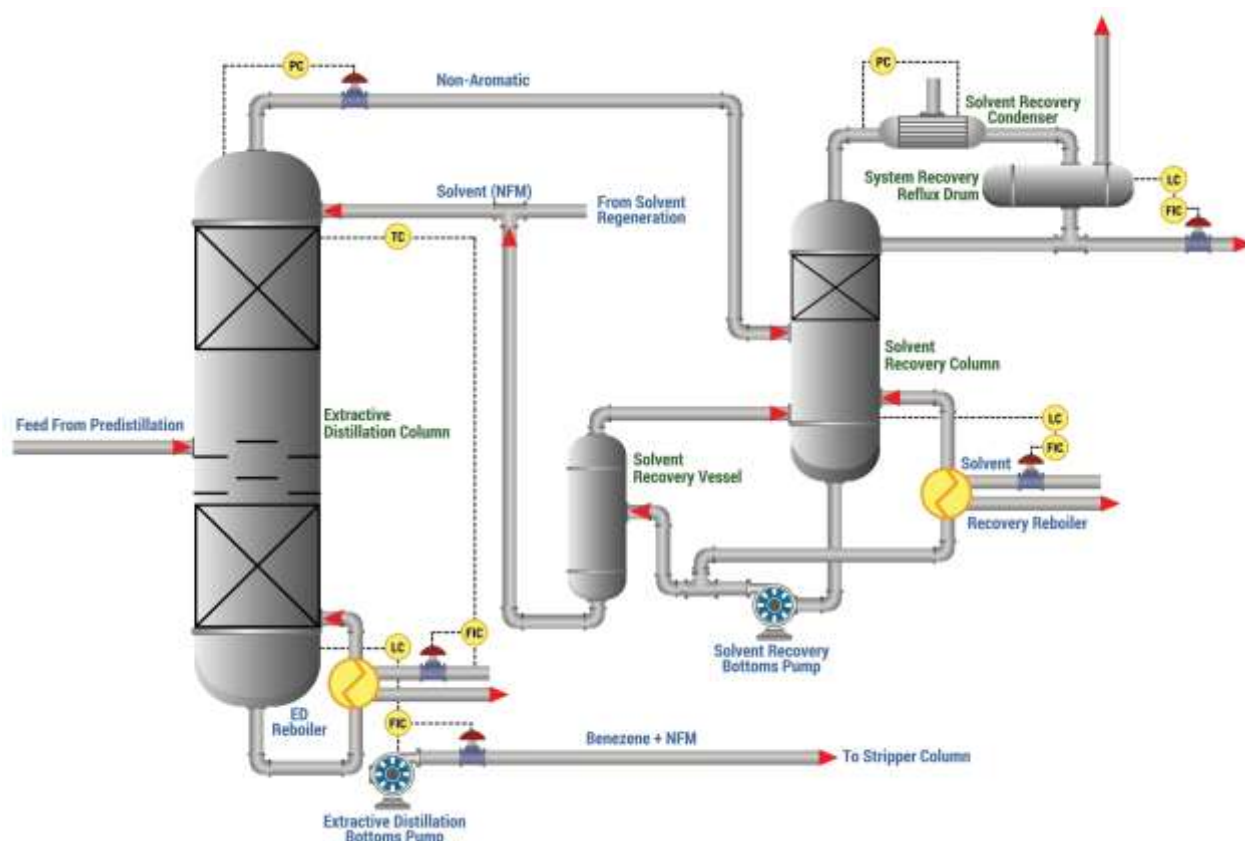
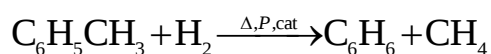


Рисунок 1.17 – Каталітичний риформінг

Оскільки в процесі риформінгу паралельно утворюється значна кількість інших метилових гомологів (фракція БТК – бензол, толуол, ксилоли), а ринковий попит на толуол є значно нижчим за обсяги його виходу, надлишковий толуол додатково конвертують у бензол за допомогою таких вторинних масообмінних процесів:

Каталітичне або термічне гідродекільювання,



Диспропорціонування толуолу, взаємне перерозподілення метильних груп із одержанням еквімолярної суміші бензолу та ізомерів ксилолу



Піроліз бензинових і важких нафтових фракцій. Сучасний і найбільш масштабний метод, за допомогою якого виробляють до 50 % світового обсягу бензолу. Процес полягає у високотемпературній (+750°C ... +850°C) деструкції вуглеводневої сировини (нафти, газойлю або попутних газів) у присутності

водяної пари, де бензол виділяють із рідкого побічного продукту – так званого піроконденсату (смоли піролізу).

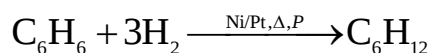
Рідкі продукти піролізу також містять значні концентрації толуолу та ксилолів. Для максимізації виходу саме бензолу, у сучасних інтегрованих нафтохімічних комплексах всю ароматичну фракцію піроконденсату після попереднього гідроочищення від дієнів спрямовують на стадію тотального деалкілювання, де і толуол, і суміш ксилолів повністю трансформуються у цільовий безбарвний бензол.

1.5.5 Застосування

Промислова структура споживання та напрямки застосування бензолу. Бензол стабільно входить у топ-10 найважливіших базових продуктів світової хімічної та нафтохімічної промисловості. Практично весь обсяг виробленого арену спрямовується як високореакційна сировина на подальший органічний синтез.

Сучасний баланс розподілу та переробки бензолу за ключовими технологічними напрямками має таку структуру:

- Виробництво етилбензолу ($\approx 50\%$): Головний вектор споживання, що реалізується шляхом алкілювання бензолу етиленом у присутності кислотних каталізаторів (наприклад, цеолітів або AlCl_3). Майже весь отриманий етилбензол піддають дегідруванню для одержання стиролу (фенілетилену) – базового мономеру у виробництві полістиролу, конструкційних пластиків (АБС) та синтетичних каучуків.
- Виробництво кумолу / ізопропілбензолу ($\approx 25\%$): Синтезується шляхом алкілювання бензолу пропіленом. Кумол є основою великотоннажного кумольного методу одночасного одержання двох стратегічних продуктів – фенолу (сировина для фенолформальдегідних смол, полікарбонатів та бісфенолу А) і ацетону (універсальний промисловий розчинник).
- Гідрування до циклогексану (10...15%): Процес каталітичного приєднання водню руйнує ароматичну систему:



Циклогексан є вихідним прекурсором для синтезу адипінової кислоти та капролактаму, з яких виробляють поліамідні волокна та пластики (нейлон, капрон).

- Виробництво нітробензолу ($\approx 10\%$): Одержують нітруванням бензолу концентрованою нітратною і сульфатною кислотами. Нітробензол є базовою сировиною для синтезу аніліну, анілінових барвників, поліуретанів (через метилендифенілізоціанат), а також спеціальних вибухових речовин та фармацевтичних препаратів (наприклад, парацетамолу).
- Виробництво лінійних алкілбензолів / ЛАБ (2...3%): Продукти алкілювання бензолу лінійними вищими алкенами ($\text{C}_{10} - \text{C}_{14}$). Використовуються для подальшого сульфування з метою одержання лінійних алкілбензолсульфонатів – основних біорозкладних ПАР (поверхнево-активних речовин) у складі сучасних синтетичних мийних засобів та побутової хімії.
- Синтез хлорбензолу ($\approx 1\%$): Одержують методом каталітичного макрохлорування. Застосовується у промисловому синтезі інсектицидів, силіконів, полімерів (поліфеніленсульфіду) та як висококиплячий розчинник у тонкому органічному синтезі.

Спеціальні сфери та обмеження у використанні. Обмеження як розчинника. Через підтверджену високу токсичність, системну загрозу канцерогенезу (ризик розвитку лейкозів) та здатність накопичуватися в організмі, використання бензолу як індустриального чи лабораторного розчинника в сучасній практиці практично повністю припинено. Його замінюють значно безпечнішими гомологами – толуолом або ксилолами. Застосування бензолу як розчинника допускається лише в замкнених герметичних системах в окремих екстремальних випадках.

Вміст у моторних паливах. Бензол природно утворюється при риформінгу і підвищує октанове число палива. Проте через токсичність продуктів його

неповного згоряння у вихлопних газах автомобільного транспорту, діючі міжнародні екологічні стандарти (зокрема Євро-5 та Євро-6) жорстко лімітують об'ємну частку бензолу в товарних автомобільних бензинах на рівні не більше 1%.

1.5.6 Толуол нафтовий. Основні відомості:

Толуол – безбарвна рухлива летуча рідина з характерним різким бензольним запахом. Погано розчиняється у воді. Змішується в необмежених межах з вуглеводнями, багатьма спиртами й ефірами. Горючий, згоряє полум'ям, що коптить.

Синоніми: метилбензол, фенілметан, толуен.

Емпірична формула: C_7H_8

Таблиця 1.1 – Технічні умови

ПОКАЗНИК	ЗНАЧЕННЯ	
	Вищий сорт	Перший сорт
Зовнішній вигляд і колір	Прозора рідина, не містить домішок і води, світліше розчину $K_2Cr_2O_7$ концентрації 0,003 г/дм ³	
Щільність при 20 °С, г/см ³	0,862-0,868	0,860-0,870
Межі перегонки 98% по об'єму (включаючи температуру кипіння чистого толуолу 110,6 °С), °С, не більше	0,7	0,8
Масова частка толуолу, %, не менш	99,75	99,6
Масова частка домішок, %, не більше неароматичних вуглеводнів бензолу ароматичних вуглеводнів C_8	0,25	0,4
	0,10	0,20
	0,10	0,15
	0,05	0,05

ПОКАЗНИК	ЗНАЧЕННЯ	
	Вищий сорт	Перший сорт
Фарбування сірчаної кислоти, номер зразкової шкали, не більше	0,15	0,20
Випробування на мідній пластинці	Витримує	
Реакція водної витяжки	Нейтральна	
Випаровуваність	Випаровується без залишку	
Масова частка загальної сірки, %, не більше	0,00015	

1.5.7 Одержання:

Одержують у процесі каталітичного риформінгу бензинових фракцій, а також при піролізі нафтових продуктів. Виділяється селективною екстракцією й наступною ректифікацією. Очищають толуол аналогічно бензолу, тільки у випадку застосування концентрованої сірчаної кислоти не можна забувати, що толуол сульфатується легше бензолу, а, виходить, необхідно підтримувати більше низьку температуру реакційної суміші (менш 30 °C). Толуол також утворює із водою азеотропну суміш[

1.5.8 Застосування:

Наведений опис характеризує промислові напрямки застосування, хімічний потенціал та експлуатаційні властивості **толуолу** (метилбензолу, C_7H_8 , $PhMe$) – найближчого гомолога бензолу.

У суцільному інженерно-хімічному та академічному стилі цей матеріал систематизується за функціональними напрямками:

Сировинний потенціал у промисловому органічному синтезі. Толуол є стратегічним базовим компонентом нафтохімії. Завдяки наявності метильної групи, яка активує бензольне кільце в реакціях електрофільного заміщення (S_EAr), він слугує вихідною речовиною для синтезу широкого спектра сполук:

- Бензолу, шляхом термічного або каталітичного гідрдеалкілювання чи диспропорціонування;
- Бензойної кислоти, за допомогою рідкофазного каталітичного окиснення метильної групи киснем повітря (сировина для харчових консервантів та антисептиків);
- Нітротолуолів, послідовним нітруванням метилбензолу до моно-, ди- та тринітротолуолу (ТНТ, тротил) – класичної індустриальної та військової вибухової речовини;
- Бензилхлориду, продукту радикального хлорування у бічний ланцюг, що є прекурсором у синтезі пластифікаторів, парфумерних речовин та фармацевтичних препаратів.

Застосування у лакофарбовій промисловості та технології покриттів. Толуол має високу розчинну здатність щодо багатьох природних і синтетичних високомолекулярних сполук. Він є базовим технологічним середовищем при виготовленні, розведенні та нанесенні таких лакофарбових матеріалів (ЛФМ):

- Епоксидних та вінілових смол;
- Поліакрилатів і нітроцелюлозних компаундів;
- Хлоркаучукових емалей та спеціалізованих дорожніх фарб (для горизонтальної розмітки).

В інженерній практиці нафтовий толуол входить до складу регламентованих ДСТУ/ГОСТ сумішевих товарних розчинників: Р-4, Р-40 (переважно для епоксидних і каучукових ЛФМ), а також 645, 646, 647 та 648 (широко вживаних для нітроцелюлозних лаків та емалей серії НЦ).

Спеціальні сфери застосування, паливні добавки та регуляторні обмеження:

- Моторні палива. Толуол має високе октанове число (близько 115–120 за дослідницьким методом), тому його використовують як компонент високооктанових автомобільних та авіаційних бензинів для підвищення детонаційної стійкості палива. Оскільки він значно менш токсичний за бензол, його вміст у паливах регламентується менш суворо, хоча

загальний вміст ароматичних вуглеводнів все одно лімітується стандартами Євро-5/Євро-6 (не більше 35%).

- Парфумерно-косметична галузь. Застосовується як розчинник і контролер в'язкості в рецептурах декоративної косметики (наприклад, у лаках для нігтів). Через помірну токсичність його концентрація у споживчих товарах жорстко контролюється.
- Регуляторний статус (прекурсор). З огляду на хімічну структуру, толуол може бути використаний у нелегальному синтезі психоактивних речовин фенілалкіламінового ряду (зокрема, амфетаміну та його похідних). Внаслідок цього у багатьох країнах, включно з Україною, толуол (та суміші, що містять його у значних концентраціях) внесено до переліків прекурсорів, підконтрольних речовин, оборот яких підлягає суворому ліцензуванню, обліку та державному моніторингу.

1.5.9 Упакування.

Толуол нафтової наливають у попередньо очищені металеві бочки, залізничні, автомобільні цистерни.

1.5.10 Транспортування.

Транспортування здійснюють у бочках залізничним або автомобільним транспортом у критих транспортних засобах, залізничних цистернах, автоцистернах з дотриманням правил перевезень небезпечних вантажів, для транспорту даного виду.

1.5.11 Зберігання.

Толуол нафтовий зберігають у складських приміщеннях або в спеціально обладнаних металевих ємностях з дотриманням правил зберігання вогнебезпечних речовин. Гарантійний термін зберігання – шість років від дня виготовлення.

2 ПРОЄКТНА ЧАСТИНА

2.1 Технологічна схема поділу суміші бензол-толуол

Ректифікація – частковий або повний поділ гомогенних рідких сумішей на компоненти в результаті розбіжності їхньої летючості й зустрічнопотокової взаємодії рідини, одержуваної при конденсації пари, і пари, що утворюється при перегонці.

Ректифікація широко поширена в хімічній промисловості, використовується для отримання різних продуктів у чистому виді, а також для поділу газових сумішей після їхнього скраплення (поділ повітря на кисень і азот, поділ вуглеводневих газів і ін.).

Процес ректифікації не застосовується при поділі чутливих до підвищених температур речовин, при виділенні цінних продуктів або шкідливих домішок із сильно розведених розчинів, поділі сумішей близькокиплячих компонентів.

Функціональний опис технологічної схеми безперервної ректифікації/

1. Вузол підготовки та подачі сировини (живлення)/

Вихідна бінарна або багатокомпонентна суміш із проміжної ємності 1 безперервно забирається відцентровим насосом 2 і подається в підігрівач вихідної суміші (теплообмінник) 3.

У цьому апараті сировина нагрівається до температури кипіння (або заданої температури живлення) за рахунок тепла зовнішнього теплоносія (наприклад, водяної пари) і спрямовується в ректифікаційну колону 4 на так звану тарілку живлення (питальну тарілку).

Цей ступінь розділення вибирається таким чином, щоб склад киплячої на ньому рідини відповідав поточній концентрації вихідної суміші за легколетючим компонентом (ЛЛК) – x_F .

Тарілка живлення геометрично ділить ректифікаційну колону на дві функціональні зони:

- Верхню (зміцнювальну або концентраційну): призначену для збагачення висхідного парового потоку легколетючим компонентом;
- Нижню (вичерпну або відгонну): призначену для максимально повного вилучення (вичерпування) ЛЛК із низхідного потоку рідини та концентрування важколетючого компонента (ВЛК).

2. Гідродинаміка та масообмін усередині колони.

Внутрішній простір ректифікаційної колони 4 заповнений контактними пристроями – масообмінними тарілками або шарами насадки (регулярної чи нерегулярної). Знизу вгору по колоні безперервно рухається парова фаза, що генерується у виносному кубі-випарнику (кип'ятильнику) 5, який також може бути конструктивно інтегрований безпосередньо під кубову частину колони.

На кожному контактному ступені відбувається інтенсивний протиточний масо- та теплообмін між висхідною парою і низхідною рідкою фазою (флегмою). Механізм розділення базується на різниці температур кипіння та летучості компонентів:

- За рахунок виділення тепла при частковій конденсації пари ВЛК на тарілці відбувається часткове випаровування ЛЛК із рідкої фази.
- Первинна пара, що виходить із кип'ятильника 5, за своїм складом близька до кубового залишку (x_w), тобто максимально збіднена на ЛЛК. Проте в міру просування вгору по колоні парова фаза безперервно акумулює ЛЛК, залишаючи верхню частину апарата у вигляді висококонцентрованої пари цільового продукту.

3. Вузол конденсації та флегмоутворення (Верхня секція).

Для стабілізації процесу та забезпечення рідкого зрошення верхня частина колони зрошується флегмою зі складом x_p . Паровий потік, що залишає кришку колони, надходить у дефлегматор (конденсатор) 6, який охолоджується проточною водою. Тут пара повністю або частково конденсується.

Отриманий конденсат ділиться на два потоки відповідно до технологічно заданого флегмового числа (R):

1. Потік повернення (флегма): спрямовується назад на верхню тарілку зміцнювальної частини для зрошення колони. Рухаючись донизу, флегма взаємодіє з паром і поступово збагачується важколетючим компонентом.
2. Цільовий дистилят (ректифікат): виводиться з дефлегматора як готовий продукт розділення, охолоджується в кінцевому холодильнику-теплообміннику 7 і зливається в проміжну ємність дистиляту 8.
4. Вузол відведення кубового залишку (Нижня секція).

Рідина, що стікає з нижньої вичерпної тарілки, потрапляє у куб колони, де частина її випаровується у кип'ятильнику 5 для підтримки парового навантаження апарата. Невипарована частина становить нижній продукт – кубовий залишок, який максимально збагачений важколетючим компонентом. Кубова рідина безперервно евакуюється з кубової секції за допомогою насоса 9, охолоджується в кінцевому теплообміннику-холодильнику 10 (де віддає тепло зовнішньому холодоагенту) і транспортується в ємність кубового залишку 11 для подальшої переробки або складування.

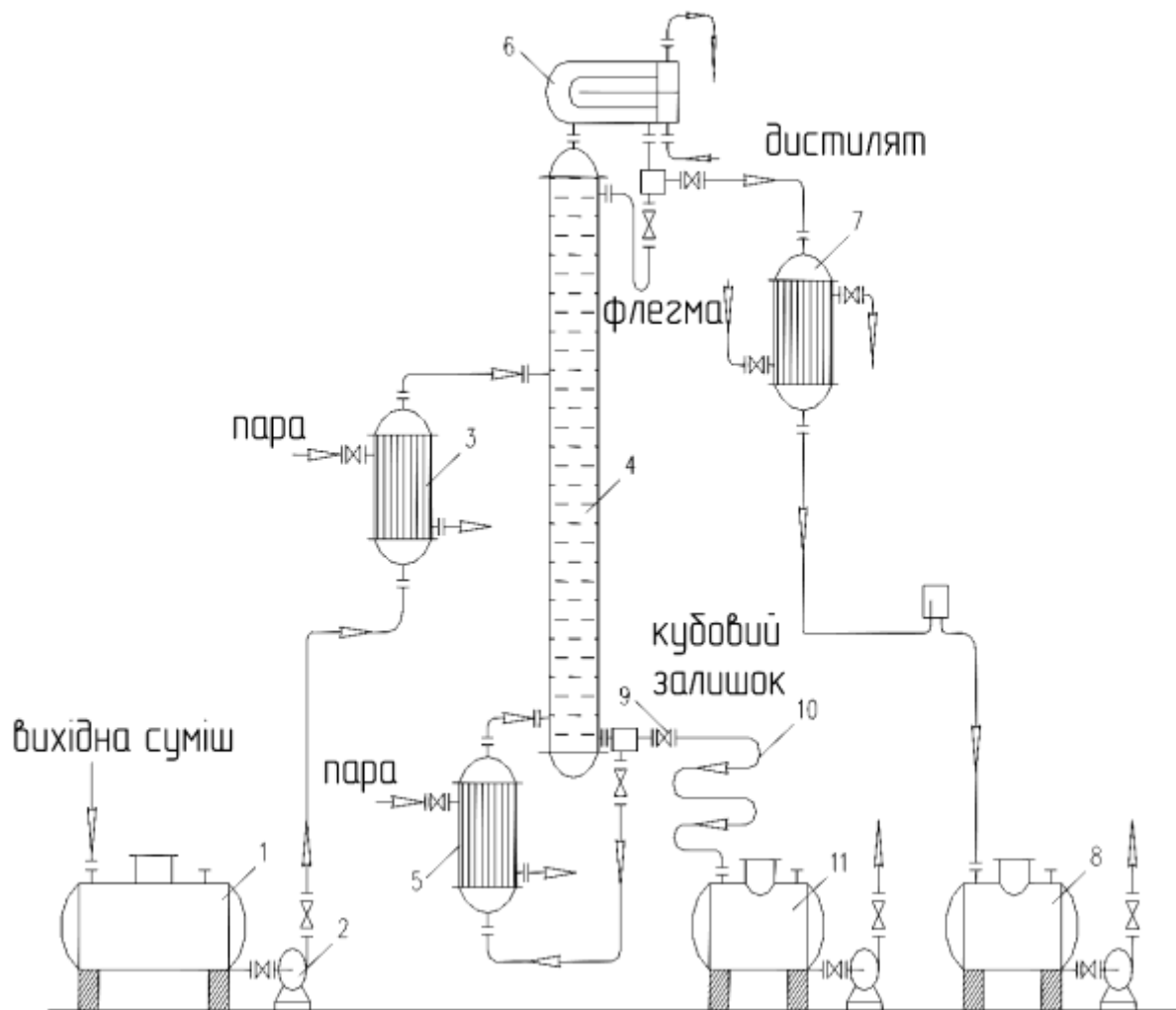


Рисунок 2.1 – Схема технологічна установки ректифікації

2.2 Технологічний розрахунок апарата

2.2.1 Матеріальний баланс колони

Потужність ректифікаційної колони по дистилляту P та по кубовому залишку W розраховується з рівняння матеріального балансу:

$$\begin{cases} F = P + W \\ F \cdot \bar{X}_F = P \cdot \bar{X}_P + W \cdot \bar{X}_W \end{cases},$$

де F, P, W – витрати вихідна суміш, дистиллят, кубовий залишок, кг/с;

X_F, X_P, X_W – концентрації низькокиплячих компонентів у вихідній суміші, кубовому залишку, дистилляті.

$$F = 10000 \text{ кг/год} = 2,78 \text{ кг/с}$$

$$D = F \cdot \frac{\bar{x}_F - \bar{x}_D}{\bar{x}_W - \bar{x}_D} = 2,78 \cdot \frac{45 - 98}{3 - 98} = 1,26 \text{ кг/с}$$

$$W = 2,78 - 1,26 = 1,52 \text{ кг/с}$$

2.2.2 Перерахування масових часток

Перерахування масових часток у мольні:

$$X = \frac{\bar{x}_A / M_A}{\bar{x}_A / M_A + (1 - \bar{x}_A) / M_B},$$

де M_A і M_B – молярні маси низькокиплячого (бензол) і висококиплячого (толуол) компонентів, кг/кмоль.

$$X_F = \frac{\frac{0,45}{78}}{\frac{0,45}{78} + \frac{0,55}{92}} = 0,491 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль суміші}}.$$

$$X_W = \frac{\frac{0,03}{78}}{\frac{0,03}{78} + \frac{0,97}{92}} = 0,035 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль суміші}}$$

$$X_P = \frac{\frac{0,98}{78}}{\frac{0,98}{78} + \frac{0,02}{92}} = 0,983 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль суміші}}$$

2.2.3 Розрахунок робочого флегмового числа

Для технологічного розрахунку ректифікаційної колони необхідно побудувати зрівноважену залежність між рідиною й парою для суміші в координатах $B-X$ і $t-X, Y$.

Визначаємо мінімальні значення флегмового числа:

$$R_{\min} = \frac{x_D - y_F^*}{y_F^* - x_F} = \frac{98,3 - 70,5}{70,5 - 49,1} = 1,3$$

y_F^* – концентрації ЛЛК у парі, котра є у рівновазі з вихідною сумішшю x_F , графік точки $B-X$. $x_F = 70,6 \%$

Робоче флегмове число визначаємо у вигляді $R = \beta \cdot R_{\min}$,

де β – коефіцієнти надлишковості флегми ($\beta = 1,02 \dots 3,5$).

Визначимо робоче флегмове число R , відрізок B графіку, кількість тарілок теоретично визначених у колоні n_T , визначаємо через вписування сходинок між зрівноваженою й робочою лініями. Робочі лінії будуються для

кожного відрізка $B = \frac{x_p}{R_{\min} + 1}$. Результати розрахунків заносимо в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1 – Робочі лінії флегмового числа

β	R	B	n_T	$n_T(R + 1)$
1,2	1,56	38,4	17,8	45,57
1,5	1,95	33,3	14,2	41,89
1,8	2,34	29,4	12,5	41,75
2,5	3,25	23,1	11	46,75
3,5	4,08	19,4	10,3	52,33
4,5	5,4	15,4	9,5	60,8

Будується графік у координатах $n_T(R+1)-R$ і із точки мінімуму на кривій визначається оптимальне робоче флегмове число R : $R_{opt} = 2,2$ при

$$B = \frac{x_D}{R+1} = \frac{98,3}{2,2+1} = 30,7$$

$$n_T = 13,0 \text{ приймаю } n_T = 13$$

2.2.4 Розрахунок фізико-хімічних параметрів процесу колони

Масові усереднені витрати рідин для верхньої, нижньої частини колони розраховуємо зі співвідношень:

$$L^B = P \cdot R = \Phi = 4421 \cdot 2,2 = 9726,2 \text{ кг/год}$$

$$L^H = \Phi + F = P \cdot R + F = 9726,2 + 10000 = 19726,2 \text{ кг/год}$$

Середня витрата пари по колоні постійна:

$$G = P \cdot (R + 1) = 4421 \cdot (2,2 + 1) = 14147,2 \text{ кг/год}$$

Середня концентрація рідин:

$$x^B = \frac{x_F + x_D}{2} = \frac{49,1 + 98,3}{2} = 73,7\%$$

$$x^H = \frac{x_F + x_W}{2} = \frac{49,1 + 3,5}{2} = 26,3\%$$

Середня концентрація пари:

$$y^B = \frac{y_F + y_D}{2} = \frac{98,3 + 64,5}{2} = 81,4\%$$

$$y^I = \frac{y_F + y_W}{2} = \frac{64,5 + 3,5}{2} = 34\%$$

де $y_P = x_P$; $y_W = x_W$; $y_F \Rightarrow x_F$ (відрізок графіку $X-B$).

По діаграмі $t-x,y$ для середнього значення концентрації пари та рідини розраховуємо усереднені значення температури пари, °С:

$$y^B = 0,814 \rightarrow t_o^A = 88,5^\circ \tilde{N} \quad y^I = 0,340 \rightarrow t_o^I = 103^\circ \tilde{N}$$

а) усереднені значення мольної маси рідин:

$$M_{ж}^B = x^B \cdot M_A + (1 - x^B) \cdot M_B = 0,737 \cdot 78 + (1 - 0,737) \cdot 92 = 81,68 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}};$$

$$M_{ж}^H = x^H \cdot M_A + (1 - x^H) \cdot M_B = 0,263 \cdot 78 + (1 - 0,263) \cdot 92 = 88,32 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}$$

б) усереднені мольні значення маси пари:

$$M_{п}^B = y^B \cdot M_A + (1 - y^B) \cdot M_B = 0,814 \cdot 78 + (1 - 0,814) \cdot 92 = 80,604 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}};$$

$$M_{п}^H = y^H \cdot M_A + (1 - y^H) \cdot M_B = 0,34 \cdot 78 + (1 - 0,34) \cdot 92 = 87,24 \frac{\text{КГ}}{\text{КМОЛЬ}}$$

в) усереднені значення густини пари:

$$\rho_n^B = \frac{M_n^B \cdot T_0}{22,4 \cdot (T_0 + t^B)} = \frac{80,604 \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + 88,5)} = 2,72 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3};$$

$$\rho_n^H = \frac{M_n^H \cdot T_0}{22,4 \cdot (T_0 + t^H)} = \frac{87,24 \cdot 273}{22,4 \cdot (273 + 103)} = 2,83 \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3},$$

а) усереднені значення густини рідини:

$$\frac{1}{\rho_{\text{жс}}^B} = \frac{\bar{x}^B}{\rho_1} + \frac{(1-\bar{x}^B)}{\rho_2}; \quad \frac{1}{\rho_{\text{жс}}^H} = \frac{\bar{x}^H}{\rho_1} + \frac{(1-\bar{x}^H)}{\rho_2},$$

де ρ_1 і ρ_2 – щільності маси відповідно низькокиплячого й висококиплячого компонентів при температурах $t^B = 88,6^\circ\text{C}$ і $t^H = 102^\circ\text{C}$

$\bar{x}^B$ і $\bar{x}^H$ – усереднені значення масової концентрації рідини вгорі й унизу колони:

$$\bar{x}^B = \frac{x^B \cdot M_1}{M_x^B}; \quad \bar{x}^H = \frac{x^H \cdot M_1}{M_x^H},$$

$$\bar{x}^B = \frac{73,7 \cdot 78}{81,68} = 70,38 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль суміші}}$$

$$\bar{x}^H = \frac{26,3 \cdot 78}{88,32} = 23,23 \frac{\text{кмоль}}{\text{кмоль суміші}}$$

$$\frac{1}{\rho_{\text{жс}}^B} = \frac{0,704}{805,65} + \frac{(1-0,704)}{784,7}; \quad \rho_{\text{жс}}^B = 810 \text{ кг/м}^3$$

$$\frac{1}{\rho_{\text{жс}}^H} = \frac{0,23}{805,65} + \frac{(1-0,23)}{784,7}; \quad \rho_{\text{жс}}^H = 786,5 \text{ кг/м}^3$$

б) середні в'язкості пари:

$$\frac{M_i^B}{\mu_i^B} = \frac{y^B \cdot M_A}{\mu_1} + \frac{(1-y^B) \cdot M_{\hat{A}}}{\mu_2}; \quad \frac{M_i^H}{\mu_i^H} = \frac{y^H \cdot M_A}{\mu_1} + \frac{(1-y^H) \cdot M_{\hat{A}}}{\mu_2}$$

де M_n^B та M_n^H – усереднені мольні значення маси пари у верху й низу колони, кг/кмоль;

μ_1 і μ_2 – в'язкості низькокиплячого й висококиплячого компонентів парової суміші при температурах t^B і t^H , мПа·с

$$\frac{80,604}{\mu_i^B} = \frac{0,814 \cdot 78}{0,92 \cdot 10^{-5}} + \frac{(1-0,814) \cdot 92}{0,925 \cdot 10^{-5}}, \quad \mu_n^B = 0,93 \cdot 10^{-2} \text{ мПа} \cdot \text{с};$$

$$\frac{87,24}{\mu_n^H} = \frac{0,34 \cdot 78}{0,92 \cdot 10^{-5}} + \frac{(1-0,34) \cdot 92}{0,925 \cdot 10^{-5}}, \quad \mu_n^H = 0,924 \cdot 10^{-2} \text{ мПа} \cdot \text{с}$$

усереднені значення густини рідини:

$$\lg \mu_{\mathcal{A}} = x \cdot \lg \mu_1 + (1-x) \cdot \lg \mu_2,$$

де μ_1 й μ_2 – в'язкості НК і ВК компонентів рідини при t_y^B , t_y^H , мПа·с (табл. 2).

$$\lg \mu_{\mathcal{A}}^{\hat{A}} = 0,737 \cdot \lg(0,294 \cdot 10^{-3}) + (1-0,737) \cdot \lg 0,264 \cdot 10^{-3}; \mu_{\mathcal{A}}^{\hat{A}} = 0,288 \text{ і } \dot{A} \cdot \ddot{n}$$

$$\lg \mu_{\mathcal{A}}^f = 0,263 \cdot \lg(0,294 \cdot 10^{-3}) + (1-0,263) \cdot \lg(0,264 \cdot 10^{-3}); \mu_{\mathcal{A}}^f = 0,269 \text{ і } \dot{A} \cdot \ddot{n}$$

2.2.5 Рорахунок діаметру колони

Задана швидкість пару в насадочній колоні:

$$\frac{\omega_{пред}^2 \cdot f \cdot \rho_n \cdot \mu_{жс}^{0,16}}{g \cdot E^3 \cdot \rho_{жс}} = 1,2 \exp \left[-4 \left(\frac{L}{G} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_{жс}} \right)^{0,125} \right],$$

де ρ_n і $\rho_{жс}$ – щільність пари й рідини.

Насадка - Кільця Рашіга 25х25х3.

$$f=200 \text{ м}^2/\text{м}^3$$

$$E=0,74 \text{ м}^2/\text{м}^3$$

Низ колони:

$$\frac{\omega_{пред}^2 \cdot 200 \cdot 2,83 \cdot 0,269^{0,16}}{9,81 \cdot 0,74^3 \cdot 787,4} = 1,2 \exp \left[-4 \left(\frac{5,48}{3,93} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{2,83}{787,4} \right)^{0,125} \right]$$

$$\omega_{пред}^H = 0,97 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\omega_p^H = (0,8 \div 0,9) \cdot \omega_{пред}^H = (0,8 \div 0,9) \cdot 0,97 = 0,82 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Верх колони:

$$\frac{\omega_{пред}^2 \cdot 200 \cdot 2,72 \cdot 0,288^{0,16}}{9,81 \cdot 0,74^3 \cdot 800} = 1,2 \exp \left[-4 \left(\frac{2,7}{3,93} \right)^{0,25} \cdot \left(\frac{2,72}{800} \right)^{0,125} \right]$$

$$\omega_{пред}^B = 1,07 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\omega_p^B = (0,8 \div 0,9) \cdot \omega_{пред}^B = (0,8 \div 0,9) \cdot 1,07 = 0,91 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Діаметр колони обчислюють незалежно для верхньої та нижньої частини колони:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_n}}$$

$$d^B = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,93}{3,14 \cdot 0,91 \cdot 2,72}} = 1,42 \text{ м} \quad d^H = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,93}{3,14 \cdot 0,82 \cdot 2,83}} = 1,47 \text{ м}$$

Розраховані діаметри верхньої й нижньої частин колони відрізняються друг від друга на $3,5\% < 10\%$, приймаємо колону одного діаметра, рівного: $D=1600$ мм.

Приймаю d апарата рівним 1600 мм із насипною насадкою, перерозподільними тарілками типу ТСН-II (ОСТ 26-705-73) і розподільною тарілкою типу ТСН-III (ОСТ 26-705-73) .

Встановлена швидкість пару в колоні за обраного діаметру становить:

$$\omega_{\text{раб}}^B = \frac{d_B}{d} \cdot \omega_B = \frac{1,42}{1,6} \cdot 0,91 = 0,81 \text{ м / с} \quad \omega_{\text{раб}}^H = \frac{d_H}{d} \cdot \omega_H = \frac{1,47}{1,6} \cdot 0,82 = 0,75 \text{ м / с}.$$

2.2.6 Визначення тангенса кута нахилу

У масообмінних процесах коефіцієнт масопередачі K_y (або K_x) суттєво залежить від тангенса кута нахилу лінії фазової рівноваги $m = \tan \alpha = \frac{dy^*}{dx}$.

Оскільки для реальних (неідеальних) бінарних систем крива рівноваги є нелінійною, цей коефіцієнт є змінною величиною за висотою апарата.

Для точного інженерного розрахунку масообмінної зони криву рівноваги на фазовій діаграмі $y-x$ (або в координатах відносних мольних часток $Y-X$) розбивають на локальні інтервали. Традиційно лінію рівноваги ділять рівними кроками за концентрацією рідкої фази за допомогою вертикальних ліній, що проходять через точки $X_1=0,1$; $X_2=0,2$; ...; $X_i=0,9$.

Для кожної виділеної ділянки криву рівноваги апроксимують лінійним відрізком, для якого визначають усереднений тангенс кута нахилу m_i :

$$m_i = \frac{Y_i^* - Y_{i-1}^*}{X_i - X_{i-1}}$$

Де:

- X_i, X_{i-1} — граничні концентрації рідкої фази на поточній ділянці;
- Y_i^*, Y_{i-1}^* — рівноважні концентрації парової фази, що відповідають цим точкам.

Такий метод кусково-лінійної апроксимації дозволяє розраховувати локальні коефіцієнти масопередачі та висоту одиниці переносу (ВОП) окремо для кожного інтервалу, що значно підвищує точність визначення загальної висоти насадочної частини або числа теоретичних тарілок колони.

Для всіх ділянок визначають тангенс кута нахилу відрізків кривої рівноваги:

$$m = \Delta y / \Delta x$$

$$\dot{o}_{\text{н\delta}} = \frac{m_1 + m_2 + m_i}{i} =$$

$$= \frac{2,15 + 1,65 + 1,3 + 1,1 + 0,9 + 0,8 + 0,65 + 0,55 + 0,5 + 0,4}{10} = 1$$

2.2.7 Визначення висоти колони. Розрахунок висоти насадки методом БЕТТ:

$$h_{\text{г}} = 5,2 \frac{4E}{f} \left(\frac{4\omega}{f} \cdot \frac{\rho_n}{\mu_n} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{R+1}{R} \right)^{0,35} \cdot \left(\frac{\rho_{\text{жс}}}{\rho_n} \right)^{0,2} \cdot \frac{\lg \left(\frac{R}{m(R+1)} \right)}{1 - \left(\frac{m(R+1)}{R} \right)}$$

$$h_{\text{г}}^B = 5,2 \frac{4 \cdot 0,74}{200} \left(\frac{4 \cdot 0,81}{200} \cdot \frac{2,72}{0,92 \cdot 10^{-5}} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{2,2+1}{2,2} \right)^{0,35} \cdot \left(\frac{800}{2,72} \right)^{0,2} \cdot \frac{\lg \left(\frac{2,2}{1(2,2+1)} \right)}{1 - \left(\frac{1(2,2+1)}{2,2} \right)} = 0,54 \text{ м}$$

Дійсна висота насадки:

$$H_n^B = h_{\text{г}}^B \cdot n_T = 0,54 \cdot 13 = 7,02 \text{ м} \approx 7,1 \text{ м}$$

$$H_n^H = h_{\text{г}}^B \cdot n_T = 0,53 \cdot 13 = 6,89 \text{ м} \approx 6,9 \text{ м}$$

Загальна висота насадки:

$$H_n = H_n^H + H_n^B = 6,9 + 7,1 = 14 \text{ м}$$

Висота колони розраховується:

$$H = \dot{I}_n + Z_H + Z_B + Z = 14000 + 2000 + 1000 + 3000 = 20000 \text{ мм},$$

де Z_B , Z_H – відповідно висота сепараційної частини колони, це віддаль між дном колони та тарілкою.

2.2.8 Гідравлічний опір шару зрошуваної насадки.

$$\Delta P_{op} = \Delta P_{сух} \cdot \left[1 + 5,15 \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,342} \cdot \left(\frac{\rho_n}{\rho_a} \right)^{0,19} \cdot \left(\frac{\mu_a}{\mu_i} \right)^{0,038} \right],$$

де $\Delta P_{сух}$ - гідравлічний опір сухої насадки, Па.

$$\Delta P_{сух} = \xi \cdot \frac{\omega^2 \cdot \rho_n \cdot H_H}{2 \cdot \varepsilon^2 \cdot d_y},$$

d_y - еквівалентний діаметр насадки, $d_y = 0,015$ м;

де ε - вільний об'єм насадки, $\varepsilon = 0,74 \text{ м}^3/\text{м}^3$;

ξ - коефіцієнт опору сухої насадки.

$$\xi = \frac{16}{(\text{Re}_n)^{0,2}}; \quad \text{Re}_n = \frac{4 \cdot \omega \cdot \rho_n}{\mu_n \cdot f},$$

де f - питома поверхня насадки, $f = 200 \text{ м}^2/\text{м}^3$.

Гідравлічний опір для верху колони:

$$\Delta P_{op}^{\hat{A}} = \Delta P_{\hat{n}\hat{o}\hat{o}}^{\hat{A}} \cdot \left[1 + 5,15 \cdot \left(\frac{L^{\hat{A}}}{G} \right)^{0,342} \cdot \left(\frac{\rho_i^{\hat{A}}}{\rho_a^{\hat{A}}} \right)^{0,19} \cdot \left(\frac{\mu_a^{\hat{A}}}{\mu_i^{\hat{A}}} \right)^{0,038} \right]$$

$$\Delta P_{\hat{n}\hat{o}\hat{o}}^{\hat{A}} = \xi^{\hat{A}} \cdot \frac{\omega_{\hat{A}}^2 \cdot \rho_i^{\hat{A}} \cdot H_{\hat{I}}^{\hat{A}}}{2 \cdot \varepsilon^2 \cdot d_y}$$

$$\xi^{\hat{A}} = \frac{16}{(\text{Re}_i^{\hat{A}})^{0,2}}; \quad \text{Re}_i^{\hat{A}} = \frac{4 \cdot \omega_{\hat{A}} \cdot \rho_i^{\hat{A}}}{\mu_i^{\hat{A}} \cdot f} = \frac{4 \cdot 0,91 \cdot 2,72}{0,92 \cdot 10^{-2} \cdot 200} = 5,38$$

$$\xi^{\hat{A}} = \frac{16}{(5,38)^{0,2}} = \frac{16}{1,4} = 11,43$$

$$\Delta P_{\tilde{n}\tilde{o}\tilde{\delta}}^{\hat{A}} = 11,43 \cdot \frac{0,91^2 \cdot 2,72 \cdot 7,1}{2 \cdot 0,74^2 \cdot 0,015} = 11126,83 \text{ ĩđ}$$

$$\Delta P_{op}^{\hat{A}} = 11126,83 \cdot \left[1 + 5,15 \cdot \left(\frac{9726,2}{14147,2} \right)^{0,342} \cdot \left(\frac{2,72}{800} \right)^{0,19} \cdot \left(\frac{0,288}{0,92 \cdot 10^{-2}} \right)^{0,038} \right] =$$

$$= 30672,26 \text{ ĩđ}$$

Гідравлічний опір для низу колоні:

$$\Delta P_{op}^{\hat{I}} = \Delta P_{\tilde{n}\tilde{o}\tilde{\delta}}^{\hat{I}} \cdot \left[1 + 5,15 \cdot \left(\frac{L^{\hat{I}}}{G} \right)^{0,342} \cdot \left(\frac{\rho_i^{\hat{I}}}{\rho_{\varepsilon}^{\hat{I}}} \right)^{0,19} \cdot \left(\frac{\mu_{\varepsilon}^{\hat{I}}}{\mu_i^{\hat{I}}} \right)^{0,038} \right]$$

$$\Delta P_{\tilde{n}\tilde{o}\tilde{\delta}}^{\hat{I}} = \xi^{\hat{I}} \cdot \frac{\omega_i^2 \cdot \rho_i^{\hat{I}} \cdot H_i^{\hat{I}}}{2 \cdot \varepsilon^2 \cdot d_{\hat{y}}}$$

$$\xi^{\hat{I}} = \frac{16}{(\text{Re}_i^{\hat{I}})^{0,2}}; \quad \text{Re}_i^{\hat{I}} = \frac{4 \cdot \omega_i \cdot \rho_i^{\hat{I}}}{\mu_i^{\hat{I}} \cdot f} = \frac{4 \cdot 0,82 \cdot 2,83}{0,923 \cdot 10^{-2} \cdot 200} = 5,03$$

$$\xi^{\hat{I}} = \frac{16}{(5,03)^{0,2}} = 11,59$$

$$\Delta P_{\tilde{n}\tilde{o}\tilde{\delta}}^{\hat{I}} = 11,59 \cdot \frac{0,82^2 \cdot 2,83 \cdot 6,9}{2 \cdot 0,74^2 \cdot 0,015} = 9263,22 \text{ ĩđ}$$

$$\Delta P_{op}^{\hat{A}} = 9263,22 \cdot \left[1 + 5,15 \cdot \left(\frac{19726,2}{14147,2} \right)^{0,342} \cdot \left(\frac{2,83}{787,4} \right)^{0,19} \cdot \left(\frac{0,269}{0,923 \cdot 10^{-2}} \right)^{0,038} \right] =$$

$$= 34965,27 \text{ ĩđ}$$

Загальний гідравлічний опір колоні:

$$\Delta P_{op} = \Delta P_{op}^B + \Delta P_{op}^H = 30672,26 + 34965,27 = 65637,53 \text{ Па}$$

2.2.9 Розрахунок патрубків

Внутрішній діаметр патрубка визначається з рівнянь витрати:

$$G = \omega \cdot S \cdot \rho, \text{ звідки } d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho}},$$

де G – масова витрата перекачується среды, щоМ, кг/с;

ρ – щільність середовища, кг/м³;

ω - швидкість руху рідини, м/с

Внутрішній діаметр штуцера для висновку дистилату з колони:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_y}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,52}{3,14 \cdot 25 \cdot 2,72}} = 0,17 \text{ м}$$

Стандартний діаметр патрубку $d_y = 200$ мм (зовнішній діаметр 219 мм, товщина стінки 6 мм).

Внутрішній діаметр штуцера для уведення пари в колону:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_y}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,93}{3,14 \cdot 25 \cdot 2,83}} = 0,265 \text{ м}$$

Стандартний діаметр патрубку $d_y = 300$ мм (зовнішній діаметр 325 мм, товщина стінки 8 мм).

Внутрішній діаметр штуцера на вході вихідної суміші в колону:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot F}{\pi \cdot \omega \cdot \rho_F}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 2,78}{3,14 \cdot 3 \cdot 800}} = 0,038 \text{ м},$$

Стандартний діаметр патрубку $d_y = 100$ мм (зовнішній діаметр 108 мм, товщина стінки 5 мм) [2, додаток. 7].

Внутрішній діаметр штуцера на виході кубового залишку з колони:

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot W}{\pi \cdot \omega \cdot \rho^H}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,26}{3,14 \cdot 2,0 \cdot 787,4}} = 0,032 \text{ м}$$

Стандартний діаметр патрубку $d_y = 80$ мм (зовнішній діаметр 89 мм, товщина стінки 4 мм).

2.2.10 Розрахунок кип'ятильника

Вихідні дані:

Кількість пари води для конденсації $G_1 = 3,93$ кг/с; питома теплота паротворення суміші (толуолу) $r_1 = 362,5$ кДж/кг при температурі кипіння $t_k =$

110°C. Як теплоносії використовувати водяну пару з абсолютним тиском 5 кгс/см². Вплив домішки бензолу на тепловіддачу не враховувати.

Теплове навантаження апарата:

$$Q = G_1 \cdot r_1 = 3,93 \cdot 362,5 \cdot 10^3 = 1424,63 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Витрата води:

$$G_2 = \frac{Q}{r_2},$$

де $r_2 = 2117 \cdot 10^3$ Дж/кг – теплота питома пароутворення водяної пари за температури конденсації $t_{\text{конд}} = 151,1$ °C

$$G_2 = \frac{1424,63 \cdot 10^3}{2117 \cdot 10^3} = 0,67 \text{ т/год}$$

Усереднена різниця температур:

$$\Delta t_{\text{ср}} = t_{\text{пар}} - t_{\text{конд}} = 151,1 - 110 = 41,1^\circ \text{C}$$

Прийmemo орієнтовний коефіцієнт теплопередачі від пари, що конденсується, до води (конденсатор) (4, табл. 3) $K_{op} = 1000$ Вт/м²·К, тоді необхідна площа поверхні теплообмінника:

$$F_{\text{ср}} = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\text{ср}}} = \frac{1424630}{1000 \cdot 41,1} = 34,66 \text{ м}^2$$

Поверхню, близьку до орієнтовної має теплообмінник з висотою труб $H = 2,0$ м і діаметром кожуха $D = 0,6$ м і поверхнею теплообміну $F = 40$ м². Випарники можуть бути тільки одноходовими, з діаметром труб $d = 25 \times 2$ мм.

Проведемо уточнений розрахунок:

$$\alpha_1 = b \cdot \sqrt[3]{\frac{\rho_1 \cdot \lambda_1^2}{\mu_1 \cdot \sigma_1 \cdot T_{\text{ср}}}} \cdot q^{0,67},$$

де $\rho_1 = 777$ кг/м³; $\lambda_1 = 0,116$ Вт/(м·К); $\mu = 0,251 \cdot 10^{-3}$ Па·с; $\sigma_1 = 18,35 \cdot 10^{-3}$ Н/м – фізико-хімічні характеристики рідкого толуолу при $t_{\text{кип}} = 110^\circ \text{C}$

Значення коефіцієнта b визначається по формулі:

$$b = 0,075 \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{\rho_1}{\rho_n} - 1 \right)^{-0,67} \right],$$

де ρ_n – щільність парів толуолу, при $t_{кин}=110^\circ\text{C}$

$$\rho_i = \frac{M}{22,4} \cdot \frac{T_0 \cdot P}{T \cdot P_0} = \frac{92}{22,4} \cdot \left(\frac{273}{273+110} \right) = 2,93 \text{ г/л}$$

$$b = 0,075 \cdot \left[1 + 10 \cdot \left(\frac{777}{2,93} - 1 \right)^{-0,67} \right] = 0,093 \text{ г/л}$$

$$\alpha_1 = 0,093 \cdot \sqrt[3]{\frac{777 \cdot 0,116^2}{0,251 \cdot 10^{-3} \cdot 18,35 \cdot 10^{-3} \cdot 383}} \cdot q^{0,67} = 1,64 \cdot q^{0,67}$$

Коефіцієнт тепловіддачі для пару, котрий конденсується ззовні поверхні труб висотою Н, визначається:

$$\alpha_2 = 1,21 \cdot \lambda_2 \cdot \left(\frac{\rho_2^2 \cdot r_2 \cdot g}{\mu_2 \cdot H} \right)^{0,33} \cdot q^{-0,33},$$

де $\rho_2=932 \text{ кг/м}^3$; $\lambda_2=0,683 \text{ Вт/(м} \cdot \text{K)}$; $\mu_2=0,207 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$ – фізико-хімічні характеристики конденсату води при $t_{конд}=132,9^\circ\text{C}$

$$\alpha_2 = 1,21 \cdot 0,683 \cdot \left(\frac{932^2 \cdot 2117 \cdot 10^3 \cdot 9,81}{0,207 \cdot 10^{-3} \cdot 2} \right)^{0,33} \cdot q^{-0,33} = 2,56 \cdot 10^5 \cdot q^{-0,33}$$

Сумарне значення для термоопорів стінки та забруднень:

$$\Sigma r = \frac{\delta}{\lambda_{cm}} + r_{ca} + r_{cd},$$

де δ - товщина стінки, $\delta = 2 \text{ мм}$;

λ_{cm} – теплопровідність нержавіючої сталі, $\lambda_{ст}=17,5 \text{ Вт/(мK)}$

$$\Sigma r = \frac{0,002}{17,5} + \frac{1}{5800} + \frac{1}{5800} = 4,59 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \cdot \text{K} / \text{Вт}$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \Sigma r + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{1,64 \cdot q^{0,67}} + 4,59 \cdot 10^{-4} + \frac{1}{2,56 \cdot 10^5 \cdot q^{-0,33}}}$$

Питоме теплове навантаження:

$$q = \frac{Q}{F} = K \cdot \Delta t_{\tilde{\delta}}$$

$$q = \frac{41,1}{0,61 \cdot q^{-0,67} + 4,59 \cdot 10^{-4} + 0,39 \cdot 10^{-5} \cdot q^{0,33}}$$

звідки

$$0,61 \cdot q^{0,33} + 4,59 \cdot 10^{-4} \cdot q + 0,39 \cdot 10^{-5} \cdot q^{1,33} - 41,1 = 0$$

Це рівняння вирішується графічно, задаючись значенням q . Як перше наближення приймається орієнтовне значення питомого теплового навантаження:

$$q_{op} = \frac{Q}{F} = \frac{1424,63 \cdot 10^3}{40} = 35616 \text{ Вт/м}^2$$

$$q=40000 \text{ Вт/м}^2 \quad v=2,55$$

$$q=38000 \text{ Вт/м}^2 \quad v=0,93$$

$$q=37000 \text{ Вт/м}^2 \quad v=0,15$$

$$\text{при } v=0 \quad q=36800 \text{ Вт/м}^2$$

$$\text{Необхідна поверхня } F=1424630/36800=38,71 \text{ м}^2$$

Обраний з каталогу теплообмінник з $F=40 \text{ м}^2$; $D=600 \text{ мм}$; $Z=1$; $n=257$; $H=2,0 \text{ м}$; $d=25 \times 2 \text{ мм}$ підходить, тому що є присутнім запас поверхні.

2.2.11 Висновок розділу

У процесі проробленої роботи була розрахована ректифікаційна колона для поділу суміші бензол-толуол.

У результаті розрахунку отримані дані:

- 1) Витрата дистиляту - 3.94 т/год.;
- 2) Витрата кубового залишку - 6.06 т/год.;
- 3) Робоче флегмове число - 2.12;
- 4) Число теоретичних тарілок:

Усього - 23, з них верхніх - 7, нижніх - 16;

- 5) Діаметр колони - 1,8 м;
- 6) Висота колони - 14.1 м;
- 7) Середня ефективність тарілки:

У верхній частині колони - 0.45,

У нижній частині колони - 0.41;

- 8) Число дійсних тарілок:

Усього - 38, з них верхніх - 16, нижніх - 22;

- 9) Гідравлічний опір тарілок:

У верхній частині колони - 385.9 Па,

У нижній частині колони - 485.3 Па;

2.3 Опис технологічної схеми розробленої ректифікаційної установки безперервної дії

Розроблена технологічна схема представляє собою автоматизовану ректифікаційну установку безперервної дії, призначену для розділення бінарної суміші (зокрема, з виділенням високочистого бензолу).

В основі проектування лежать принципи енергоефективності (рекуперації тепла) та високої експлуатаційної надійності (дублювання насосного обладнання та організація байпасних ліній).

1. Вузол приймання, зберігання та подачі вихідної суміші

Вихідна сировина зі складу надходить у буферну ємність E1. Для запобігання аварійним ситуаціям та автоматизації процесу ємність оснащена датчиком-рівнеміром із функцією сигналізації граничних значень:

- Верхній рівень: при досягненні максимуму автоматично відсікається лінія подачі суміші в ємність;
- Нижній рівень: при досягненні мінімуму подача сировини відновлюється.

З ємності E1 рідка суміш транспортується в систему за допомогою відцентрового насоса Н1. Для забезпечення безперебійності процесу паралельно встановлено резервний насос Н2 (100% дублювання на випадок відмови основного). Магістраль насосної групи обладнана обвідною (байпасною) лінією, яка використовується для повного дренажу та спорожнення трубопроводів під час зупинкових ремонтів або сервісного обслуговування.

2. Енергоощадний вузол підігріву та рекуперації тепла

В установці змонтовано схему раціонального використання вторинних енергоресурсів. Вихідна холодна суміш насосом спрямовується в трубний простір кожухотрубного рекуператора тепла Х1. У міжтрубний простір цього ж апарата протитоком подається гарячий кубовий залишок, що евакуюється з нижньої частини колони. Така рекуперація дозволяє суттєво знизити витрату зовнішнього теплоносія.

Оскільки тепла кубового залишку недостатньо для повної інтенсифікації процесу, після рекуператора X1 частково підігріта суміш надходить у підігрівник П (кожухотрубний теплообмінник).

Тут суміш рухається по трубках, а в міжтрубний простір із загальнозаводської котельні по трубопроводу 2 подається насичена гріюча пара. Пара конденсується на зовнішній поверхні трубок, віддаючи сховане тепло пароутворення вихідній суміші й доводячи її до температури кипіння.

На виході з підігрівника П встановлено контур автоматичного регулювання температури живлення. Підігріта до температури кипіння суміш подається у ректифікаційну колону на тарілку живлення.

3. Масообмінний контур ректифікаційної колони

Усередині вертикального апарата — ректифікаційної колони — організовано безперервний протиточний контакт фаз. Висхідний потік пари збагачується низькокиплячим компонентом (бензолом), а низхідний потік рідкої флегми акумулює важколетючий компонент.

Нижня (кубова) частина колони.

Рідка фаза, що стікає в куб, частково виводиться як балансовий кубовий залишок у ємність E2 (попередньо проходячи через рекуператор X1, де охолоджується, віддаючи тепло сировині). Інша частина рідини надходить у виносний кип'ятильник К. У кип'ятильнику кубова рідина за рахунок тепла гріючої пари з котельні закипає і повністю переходить у парову фазу. Отримана пара повертається під нижню тарілку колони і піднімається вгору, забезпечуючи парові навантаження апарата.

Система відведення конденсату.

Струмені зрідженої гріючої пари (конденсат) з підігрівника П та кип'ятильника К виводяться через автоматичні конденсатовідводчики К2 та К1 відповідно в лінію 3. Для можливості ремонту та ревізії конденсатовідводчиків без зупинки технологічного процесу кожен із них зашунтований власною байпасною лінією.

4. Конденсація пари та флегмове зрошення (Верхня секція).

Збагачена бензолом пара залишає шоломову (верхню) частину колони через верхній штуцер і спрямовується у дефлегматор Д. У цьому теплообміннику пара повністю конденсується за рахунок теплообміну з оборотною охолоджуючою водою, яка подається по магістралі 1 і видаляється по лінії 10.

Отриманий рідкий конденсат бензолу самопливом надходить у проміжну ємність флегми Е4, де розділяється на два потоки:

1. Флегма (потік повернення): За допомогою відцентрового насоса Н7 (запасний — Н8) повертається на верхню тарілку колони для зрошення. Вона стікає по тарілках донизу, вступаючи в масообмін із вихідною сумішшю. Насосна група також має байпасний контур для дренажу рідини.
2. Дистилят (цільовий продукт): По трубопроводу спрямовується в кінцевий холодильник дистиляту Х2, де охолоджується проточною водою до регламентованої температури зберігання, після чого зливається у збірник готового продукту Е3.

Ємність Е3 обладнана автоматикою контролю рівня, яка при накопиченні заданого об'єму товарного бензолу запускає відкачувальний насос Н6 для транспортування продукту на склад.

5. Дренаж та допоміжні системи

При виконанні планово-попереджувальних ремонтів, ревізій або аварійних зупинок передбачено повне спорожнення системи. Залишки технологічних рідин з апаратів та трубопроводів через систему відкритих байпасних та дренажних ліній скидаються у технологічні ємності, а закриті промивні та нейтралізовані води відводяться у промислову каналізаційну мережу 5.

2.4 Компоновка системи автоматизованого управління і контролю технологічним процесом розділення суміші бензол-толуол в ректифікаційні колоні

Технічні, експлуатаційні та регуляторні вимоги до безпечної експлуатації ректифікаційних установок. Наведені вимоги поширюються на промислові ректифікаційні установки безперервної та періодичної дії, що функціонують під надлишковим тиском або вакуумом, у яких теплове навантаження забезпечується за допомогою поверхневих теплообмінних апаратів. Комплекс цих правил спрямований на забезпечення максимальної роздільної здатності обладнання, енергоефективності, стабільності гідродинамічного режиму та промислової безпеки.

1. Вимоги до теплообмінного та конденсаційного обладнання:

- Вузол попереднього нагрівання. Ректифікаційні комплекси обов'язково комплектуються підігрівниками для доведення сировинних потоків, що надходять у колону (ліній живлення), до регламентованої технологічним процесом температури (зазвичай до температури кипіння на тарілці живлення).
- Конструкція змієвикових підігрівників. Довжина витків у змієвикових теплообмінниках повинна бути мінімізована (короткі контури). Це знижує гідравлічний опір трубного простору та полегшує безперервне відведення конденсату гріючої пари, запобігаючи гідроударам і підтопленню теплообмінної поверхні.
- Вузол конденсації та флегмо утворення. Апарати обладнуються високоефективними дефлегматорами та конденсаторами. Для інтенсифікації теплообміну (збільшення узагальненого коефіцієнта теплопередачі) та оптимізації швидкості руху холодоагенту одноходові кожухотрубні конденсатори замінюють на багатходові модифікації.

2. Оснащення засобами контрольно-вимірювальних приладів і автоматики (КВПіА). Для оперативного моніторингу та автоматичного

керування технологічним процесом ректифікаційні установки оснащують такою номенклатурою приладів:

Загальносистемні прилади та витратоміри:

- Інтегруючі (реєструючі та сумуючі) витратоміри-пароміри на магістральних лініях подачі гріючої пари з котельні;
- Витратоміри на лініях подачі вихідного живлення, відбору дистиляту та виведення кубового залишку;
- Реєструючі манометри (самописи або цифрові датчики з архівацією даних);
- Манометри, вакуумметри та термометри для локального контролю робочих параметрів безперервно по всьому контуру установки;
- Стаціонарні термометри на лініях підведення та відведення охолоджуючої (оборотної) води з дефлегматорів і кінцевих холодильників;
- Термометри, інтегровані безпосередньо у конструкцію контрольного ліхтаря (оглядового скла) для прецизійного вимірювання температури дистилятної фракції.

Системи автоматизації (першочергово для апаратів безперервної дії). Системи автоматичного регулювання (САР) та дистанційного вимірювання ключових термодинамічних параметрів — температури (наприклад, у кубі, на тарілці живлення та у шоломі колони) і тиску (чи перепаду тиску по висоті апарата).

3. Спеціальні вимоги до вакуумних ректифікаційних систем

Ректифікаційні установки, що працюють під розрідженням (вакуумом), додатково комплектуються такими захисними та регулюючими пристроями:

- Автоматичний регулятор вакууму, необхідний для стабілізації залишкового тиску в системі та запобігання різким коливанням, які здатні викликати гідродинамічне розбалансування (закипання флегми або, навпаки, зрив барботажу);

- Барометричний або проміжний ресивер (циліндр), встановлюється на лінії всмоктування перед вакуум-насосом для уловлювання випадкових викидів рідкої фази та захисту робочих елементів насоса від гідравлічного удару;
- Краплевловлювач (сепаратор), монтується на паровій лінії перед конденсатором для затримання та повернення механічно винесених паровим потоком дрібнодисперсних крапель рідини, що забезпечує чіткість розділення фракцій.

4. Регламент забезпечення нормального технологічного режиму. Для підтримання стабільної роботи ректифікаційної установки обслуговуючий персонал та системи автоматики зобов'язані:

- Стабілізувати теплову потужність, здійснювати суворий контроль за роботою парових регуляторів, мінімізуючи коливання тиску гріючої пари в межах не більше ніж $\pm 0,2 \dots 0,3 \text{ кгс / см}^2$ ($\approx 20 \dots 30 \text{ кПа}$);
- Контролювати охолодження, безперервно стежити за витратою та температурою оборотної води, що надходить у теплообмінні апарати;
- Дотримуватися параметрів, строго підтримувати закладений у технологічній карті градієнт температур і тисків по висоті колони;
- Фракціонувати продукт, здійснювати відбір дистиляту та кубового залишку строго відповідно до регламентованих інструкцій та критеріїв якості;
- Забезпечувати дренаж конденсату, організувати безперебійне відведення зрідженої пари з нагрівальних камер, регулярно контролюючи її якість шляхом хімічного чи лабораторного аналізу (для виявлення можливих пропусків продукту через нещільності трубних решіток).

5. Охорона праці, герметичність та промислова безпека

- Контроль герметичності. Необхідно регулярно проводити опресовування та перевірку герметичності корпусу апаратів, фланцевих з'єднань і запірно-регулюючої арматури. Витік вихідної суміші або парів ректифікації у робочу зону категорично заборонено.

- Екологічний захист водойм. Організується постійний моніторинг температури та хімічного складу води, що відходить із поверхневих конденсаторів, з метою своєчасного виявлення та локалізації внутрішніх прогарів теплообмінних трубок.
- Роздільне відведення конденсату. При використанні в технологічному циклі гріючої пари з різними термодинамічними параметрами (наприклад, гостра пара високого тиску та відпрацьована пара низького тиску) кожен апарат повинен комплектуватися автономним конденсатовідводчиком. Комутація парів різних параметрів на один загальний конденсаційний горщик суворо заборонена. Залежно від хімічної чистоти, отриманий конденсат збирають в ізольовані або загальні збірні баки для подальшого повернення в котельню.
- Пожежна безпека. При ректифікації вибухопожежонебезпечних та легкозаймистих рідин (ЛЗР), зокрема бензолу чи толуолу, експлуатація обладнання здійснюється за спеціальними галузевими інструкціями з дотриманням вимог іскробезпеки, заземлення устаткування та влаштування систем автоматичного пожежогасіння і продувки системи інертним газом (азотом).

У проектованій системі керування ректифікаційною установкою слід передбачити контроль наступних технологічних параметрів:

Рівні вхідного і вихідного продуктів.

Температурні режими для підігрівуючої пари.

Температурні режими для ректифікаційної колони по повному об'єму.

Температурні режими для дефлегматора та конденсатора-охолоджувача готового продукту.

Витратні характеристики по надходженню вихідної суміші і видаленню готового продукту.

Керування проходить у наступних пунктах регулювання:

Керування температурними характеристиками підігрівачів і охолоджувачів за рахунок регулювання витратними характеристиками пари та охолоджуючої води відповідно.

Пункти регулювання температури нагріву за рахунок подачі пари, – нагрівник кип'ятильник вхідної суміші, нагрівник кип'ятильник кубового залишку.

Пункти регулювання температури охолодження, – дефлегматор у верхній частині колони, конденсатор-охолоджувач готового продукту.

Так як габаритні розміри установки достатньо великі 21800x10000x24200, а контроль і регулювання потрібно здійснювати по всьому монтажному об'єму, тому доцільно використати розосереджену систему керування з центральним обчислювальним постом та локальними пунктами контролю, вимірювання і управління виконуючими пристроями. Так як проєктована система буде цифрового типу то доцільно реалізувати зв'язок між центральним обчислювальним постом та локальними пунктами контролю і вимірювання за допомогою інтерфейсу RS-485, який задовольняє таким вимоги.

Електричні та часові характеристики інтерфейсу RS-485 (EIA-485). Інтерфейс RS-485 є промисловим стандартом фізичного рівня для асинхронної послідовної передачі даних, який використовує диференціальний (балансний) спосіб передачі сигналу. Це забезпечує високу завадостійкість до синфазних перешкод і дозволяє розгортати мережі у жорстких умовах промислової автоматизації.

1. Конфігурація мережі та навантажувальна здатність.

Базовий сегмент: Стандартний сегмент мережі без використання магістральних підсилювачів (повторювачів) розрахований на підключення до 32 стандартних прийомопередавачів (Unit Load, UL).

Сучасні мікросхеми драйверів RS-485 із вхідним опором 1/4 або 1/8 від стандартного дозволяють збільшити кількість вузлів на одному сегменті до 128 або 256 без повторювачів.

Режим передачі. Інтерфейс функціонує в режимі напівдуплексу (Half-Duplex) при використанні однієї крученої пари. У кожний момент часу тільки один передавач може бути активним (працювати на передачу), тоді як інші перебувають у високоімпедансному стані (Z-стан). Одночасна активація кількох передавачів призводить до колізії сигналу.

Максимальна масштабованість. З урахуванням лінійних магістральних підсилювачів (повторювачів/репітерів) загальна кількість вузлів у мережі може досягати 250.

Максимальна геометрична довжина: Обмежена значенням 1200 метрів для одного фізичного сегмента без підсилювачів.

2. Залежність швидкості обміну від довжини лінії зв'язку. Між максимальною швидкістю передачі даних та довжиною магістралі існує обернена (експоненціальна) залежність, зумовлена затуханням сигналу в кабелі та впливом паразитної ємності лінії.

Стандартні співвідношення швидкості та відстані для кабелю типу «кручена пара»:

Швидкість обміну	Максимальна довжина лінії	Кількість кручених пар / Особливості
62,5 кбіт/с	1200 м	1 кручена пара (застережено стандартом)
375 кбіт/с	300 м	1 кручена пара (застережено стандартом)
500 кбіт/с	<i>проміжне значення</i>	Рекомендується використання екранованого кабелю
1000 кбіт/с (1 Мбіт/с)	≈ 50 – 100 м	Обов'язкове екранування лінії
2400 кбіт/с (2,4 Мбіт/с)	100 м	2 кручені пари (застережено стандартом)
10000 кбіт/с (10 Мбіт/с)	10 м	Гранична швидкість для коротких ліній

Технічна рекомендація щодо екранування. При роботі на швидкостях обміну понад 500 кбіт/с висока частота перемикання диференціального сигналу робить лінію чутливою до високочастотних завад і збільшує власне електромагнітне випромінювання кабелю. На таких швидкостях обов'язковою інженерною вимогою є використання екранованих кручених пар (STP / FTP), де екран заземлюється в одній точці для усунення струмів у контурі заземлення.

3. Особливості часових характеристик та узгодження лінії при роботі на довгих лініях або високих швидкостях тривалість фронту сигналу стає сумірною з часом поширення хвилі по кабелю. Для запобігання відбиттю сигналу від відкритих кінців лінії (ефекту ехо) та спотворенню бітів, на обох кінцях магістрального сегмента обов'язково встановлюють термінуючі резистори (термінатори) з номіналом 120 Ом, що відповідає хвильовому опору стандартного кабелю «кручена пара».

2.4.1 Функціональний склад MCU2.

Комплект модульних контролерів MCU4 (який є розвитком та базовою частиною серії MCU2) реалізує гнучкий модульно-блочний принцип проектування систем промислової автоматизації та робототехніки. Завдяки повній уніфікації за габаритними розмірами, конструктивному кріпленню, внутрішнім роз'ємам і рівням електричних сигналів, модулі інтегруються в єдину апаратну систему за допомогою системної об'єднувальної плати (крос-плати).

Така архітектура дозволяє конфігурувати як централізовані керуючі пристрої (Master), так і периферійні вузли збору даних (Slave) чи повністю автономні мехатронні модулі.

За функціональним призначенням номенклатуру комплекту MCU4 можна розділити на такі основні групи модулів:

1. Центральні обчислювальні та процесорні модулі (CPU). Включають безпосередньо логічні обчислювальні блоки (зокрема, базовий контролер MCU4-5). Вони містять мікропроцесор, блоки енергонезалежної пам'яті

програм (Flash) та оперативної пам'яті (RAM), тактові генератори та системні таймери. Ця група є «інтелектуальним» ядром системи: вона координує роботу всіх інших модулів через крос-плату, циклічно опитує входи, виконує завантажений користувачський алгоритм та формує команди для вихідних пристроїв.

2. Модулі дискретного введення-виведення (Digital I/O). Призначені для спряження контролера з дискретними (бінарними) датчиками та виконавчими механізмами:

- Дискретні входи: приймають сигнали від кінцевих вимикачів, кнопок, датчиків наближення тощо. Зазвичай обладнані гальванічною (оптронною) розв'язкою для захисту процесора від високовольтних завад.
- Дискретні виходи: видають керуючі сигнали на реле, пускачі, соленоїди, сигнальні лампи. Виконуються у вигляді релейних, транзисторних або симісторних ключів.

3. Модулі аналогового введення-виведення (Analog I/O). Забезпечують роботу з безперервними (аналоговими) сигналами, що відображають фізичні параметри технологічного процесу:

- Аналогові входи (АЦП): перетворюють уніфіковані сигнали струму ($0...20\text{ mA}$, $4...20\text{ mA}$) або напруги ($0...10\text{ V}$, $\pm 10\text{ V}$) від датчиків температури, тиску чи витрати у цифровий код.
- Аналогові виходи (ЦАП): трансформують цифрові команди обчислювача в уніфікований аналоговий сигнал для керування частотними перетворювачами, пропорційними клапанами чи позиціонерами.

4. Комунікаційні та мережеві модулі (Communication Interfaces). Служать для інтеграції контролера у промислові мережі вищого рівня (SCADA, HMI) або для зв'язку з іншими PLC та інтелектуальними датчиками. Номенклатура включає модулі послідовних інтерфейсів (RS-485/232 з підтримкою Modbus RTU), інтерфейси шини CAN (CANopen), а також сучасні мережеві плати промислового Ethernet.

5. Спеціалізовані та функціональні модулі (Special Purpose). Застосовуються для вирішення специфічних високошвидкісних або прецизійних інженерних задач, які розвантажують центральний процесор:

- Модулі високошвидкісних лічильників (для обробки сигналів від енкодерів роботів чи лінійних конвеєрів);
- Модулі керування кроковими та серводвигунами (генератори ШІМ/PWM та імпульсних послідовностей PTO);
- Інтерфейсні модулі температурних датчиків (для прямого підключення термопар чи термоопорів Pt100/Pt1000).

6. Модулі живлення та системної підтримки (Power Supply & Infrastructure). Забезпечують стабілізованою напругою внутрішні шини крос-плати та ізольовані кола живлення периферії. Вони здійснюють фільтрацію мережових завад, захист від коротких замикань та перевантажень, а також можуть містити блоки резервного акумуляторного живлення для збереження критичних даних при аварійному вимкненні енергії.

Обчислювачі.

Модулі обчислювачів забезпечують довгострокове збереження і виконання основної BASIC-програми.

Убудованими супервізорами забезпечується спостереження за живленням і у випадку його порушення програма коректно зупиняється. Після нормалізації живлення процесор автоматично запускає робочу BASIC-програму.

Обчислювачі взаємодіють з іншими модулями через крос з використанням інтерфейсів RS232, I2C, SPI, MicroLan чи прямо використовуючи функції своїх ліній вводу/виводу. Наявних ліній вводу/виводу в парі з пасивними модулями сполучення може вистачити для рішення багатьох задач. У деяких типах обчислювачів маються годинник реального часу з батарейним підживленням. Завантаження / корекція програми виробляється через убудований RS232.

Інтерфейсні модулі.

Інтерфейсні модулі забезпечують сполучення логічних рівнів модулів з рівнями і струмами необхідними в даному інтерфейсі. При необхідності забезпечується гальванічна розв'язка інтерфейсу.

Активні інтерфейсні модулі дозволяють додавати необхідна кількість різних інтерфейсів до системи.

Модулі входів/виходів.

Вони забезпечують сполучення зовнішніх сигналів із сигналами/інтерфейсами системи зібраної на базі MCU2. Забезпечується також захист ліній від пере плюсовки чи перенапруги.

Якщо в складі модуля є власний мікроконтролер (Активний модуль), то лінії вводу/виводу обслуговуються цим мікроконтролером і обмін з іншими модулями проводять по послідовному інтерфейсу, як правило, по I2C. У такому модулі мікроконтролер може мати спеціалізовану програму обслуговуючу лінії вводу/виводу без участі основного обчислювача. Обмін по послідовній шині дозволяє збільшувати число входів/виходів системи шляхом включення на одну шину безлічі активних модулів, при цьому кожний з модулів має свою власну адресу і може вести індивідуальний обмін з обчислювачем.

Модулі силових виходів.

Модулі силових виходів забезпечують сполучення сигналів/інтерфейсів системи MCU4 з вихідними ключами. Вихідні ключі модулів комутирують навантаження з напругою до 800В и струмами до декількох амперів.

Є варіанти ключів для роботи з постійним і змінним струмом. При необхідності забезпечується гальванічна розв'язка з виходами і між ними. Пасивні вихідні модулі здійснюють лише узгодження вихідних ключів з лініями виводу чи обчислювача резервними лініями активних модулів.

Активні модулі керують групою виходів і резервних ліній, одержуючи команди від обчислювача через послідовний інтерфейс. Наявність в активних модулях власного мікроконтролера дозволяє використовувати групи виходів у різних режимах (ШІМ, фазове регулювання з зовнішньою синхронізацією, сканування світодиодних матриць і т.д.)

Обмін по послідовній шині дозволяє збільшувати число виходів системи шляхом включення на одну шину безлічі активних модулів, при цьому кожний з модулів має свою власну адресу і може вести індивідуальний обмін з обчислювачем.

Модулі аналогового вводу-виводу.

Модулі АЦП забезпечують перетворення аналогових сигналів у цифровий код і передачу цього коду в обчислювач. Модулі ЦАП забезпечують зворотне перетворення і видачу аналогового сигналу у виді чи струму напруги. При необхідності забезпечується гальванічна розв'язка між об'єктом і контролером.

Обмін інформацією з обчислювачем ведеться через шини SPI і I2C у залежності від типу модуля.

Модулі живлення.

Модулі перетворюють нестабілізована постійна чи перемінна напруга в стабілізовану напругу для живлення модулів комплекту MCU2. Такі модулі потрібні у випадках, коли кількість модулів у системі великий і убудований стабілізатор обчислювача не в змозі забезпечити потрібний струм для живлення модулів розширення.

У групу модулів живлення входять також і модулі перетворювачів напруги для пристроїв з гальванічною розв'язкою. Ці модулі перетворюють і передають напруга живлення на гальванічно - розв'язану сторону для живлення схем на сусідніх модулях, де використовується незалежне живлення.

Кроси, клемні і макетні модулі.

Кроси використовуються для об'єднання електричних ланцюгів модулів. Вони мають регулярну структуру і з'єднують “pin to pin” модулі між собою. При цьому забезпечується з'єднання ліній живлення, інтерфейсних і індивідуальних ліній вводу/виводу.

Модуль програматора.

Модуль потрібний для програмування / перепрограмування модулів у складі яких є PIC-контролер. Модуль забезпечує потрібні напруги і сполучає керуючі ключі з інтерфейсними лініями обчислювача.

2.5 Розробка схем електричних принципів автоматичної системи управління і контролю технологічним процесом розділення суміші бензол-толуол в ректифікаційні колоні

2.5.1 Модуль одноплатного контролера MCU4-5

2.5.1.1 Призначення

Модуль MCU4-5 являє собою одноплатний контролер. MCU4-5 входить до складу комплекту модульних контролерів MCU2. Модуль призначений для рішення задач керування різними вузлами електронної чи апаратури для застосування в системах на базі комплекту MCU2.

Убудований інтерпретатор дозволяє швидко створювати і налагоджувати програми, не піклуючись про особливості процесора і схемотехніки контролера. Конструктору для створення керуючого пристрою на базі MCU4-5 достатньо знати перелік сигналів та кілька спеціальних операторів вбудованого інтерпретатора, котрі спрямовані на сполучення з об'єктом Управління.

Програму записують у текстовому редакторі і передають до контролера через стандартний COM-порт. Після виконання команди SAVE програма

записується в SEEPROM і зберігається там при вимиканні живлення, а після включення автоматично завантажується в ОЗУ і запускається на виконання.

Перезапис може бути здійснена не менш 100 000 разів. Модуль має могутню систему вводу-виводу. 24 лінії можуть бути використані або як окремі входи / виходи (у т.ч. аналогові), або як комбінація ліній вводу-виводу і послідовних інтерфейсів.

Інтерпретатор підтримує інтерфейси, – RS422, RS232C, I2C, SPI, MicroLan. Модуль може застосовуватися в складних системах з великим числом ліній вводу-виводу. У цьому випадку він доповнюється необхідними модулями розширення, що підтримуються інтерпретатором.

Малі розміри, невелика вартість, убудований інтерпретатор, мале споживання, індустриальне виконання, це в комплексі дозволяє підвищити якісний рівень і значно скоротити терміни розробок.

2.5.1.2 Технічні характеристики

Процесор	AT89S53(55) / 22,1184 МГц
Обсяг Flash	12(20) кБайт
Співпроцесор вводу/виводу	PIC16F877(874) / 4(20) МГц
ОЗУ 62C1024 / використовується	64 кБайта
Підживлення ОЗУ при відсутності живлення	Так
SEEPROM	24LC256 (512)/ 32(64) кБайта
Супервізор / Watchdog	ADM691(695)
Годинник реального часу	PCF8583
Драйвер	RS232C MAX232A
Батарея	CR2032
Користувальницькі інтерфейси	RS232C, I2C, SPI, MicroLan
RS232C <-> AT89S53	До 250 кБод / дуплекс
I2C	100-400 кГц / 7 біт адреса
/мультимастер	
SPI	До 2 МГц / 3 біт адреса

Кількість інтерфейсних ліній RS232/RS422)	24 (не вважаючи I2C і
Навантажувальна здатність інтерфейсних ліній	1.6/-0.060 ма, +20/-20 ма
Електроживлення	10-30В
Типовий струм споживання	50 ма
Захист від перенапруги / переплюсовки	Так
Светодиодная індикація	Power Good, Watchdog
Температурний діапазон індустриального виконання	-40 +85° С
Габаритні розміри, мм	76(82) x 76(82) x 19

2.5.1.3 Склад

1. Однокристальний мікроконтролер AT89S53 (сумісний з MSC-51, 12 кбайт FLASH, 256 Байт ОЗУ, 3 16-бітних таймери-лічильники, апаратний порт SPI, watchdog);

2. Співпроцесор вводу/виводу PIC16F87X (RISC- процесор, Flash 2...8K 14-бітних слів, 128...256 байт EEPROM, 192...368 байт ОЗУ, 3 таймери, 33 лінії вводу/виводу з високою навантажувальною здатністю +-25ма, АЦП 10 біт 8 каналів, ШІМ 10 біт 2 канали, USART, I2C, SPI)

3. ОЗУ 62C1024 (процесор адресує 64 кбайта ОЗУ, де розміщені дані, програми в кодах, програма на Fractal-BASIC; Fractal-BASIC використовує для своїх цілей трохи стільник байт – інше ОЗУ цілком наданий користувачу, при вимиканні живлення живлення ОЗУ здійснюється резервною батареєю);

2. SEEPROM 24LC256 (32 кбайта використовуються для енергонезалежного збереження програми на Fractal-BASIC, даних);

5. Годинник реального часу PCF8583 (годинник, календар будильник, можливість переривання процесора, при вимиканні живлення включається резервна батарея);

6. Супервізор watchdog ADM691 забезпечує скидання процесора при ввімкненні живлення, моніторинг напруги живлення при експлуатації. При падінні живлення нижче припустимого штатно припиняє процесор,

переключає живлення ОЗУ і годин на резервне при зниканні живильного напруги, скидання процесора при «зависанні»);

7. Драйвер RS232C MAX232A (забезпечує перетворення логічних рівнів UART AT89S53 у стандартні двуполярні рівні RS232C)

8. Вузол живлення (забезпечує стабілізацію напруги живлення, захист від імпульсних перешкод, захист модуля від переплюсовки і перевищення вхідного живильного напруги понад 30В, забезпечує живлення модулям розширення);

9. Індикатор “OK” VD4 (зелене світіння означає, що живляча напруга процесора знаходиться в нормі $5V \pm 5\%$);

10. Індикатор “Reset” VD3 (червоне світіння означає, що сигнал RESET активний);

11. Індикатор “Wait” VD2 (жовте світіння означає, що вхідна напруга живлення контролера нижче 10 В и BASIC-програма припинена до нормалізації живлення контролера);

12. Індикатор “RX” VD6 (зелене світіння означає, що передаються дані в контролер);

13. Індикатор “TX” VD5 (червоне світіння означає, що контролер передає дані);

12. з'єднувачі і джампери (забезпечують керування різними режимами модуля і підключення його до модулів чи розширення до керованого вузла).

2.5.2 Модуль RS2-1

Модуль RS2-1 здатний функціонувати в наступних режимах:

1. Slave-пристрій у промисловій мережі MODBUS (режим умовчання, забезпечується доступ до власних ресурсів і до ресурсів зовнішніх модулів по локальній шині I2C у режимі Master)
2. Перетворювач інтерфейсу I2C – RS485/422/232

Таблиця 2.3 – Технічні характеристики

Процесор	AT89S53(5) / 22,1184 МГц
Обсяг	Flash 12 кБайт
Співпроцесор введення/виводу	PIC16F874(7) / 2...20...20 МГц
ОЗУ	62C1024 / використовується 64 кБайта
Підживлення ОЗУ при відсутності живлення	Так
EEPROM	24LC256 / 32 кБайта
Супервізор / Watchdog	ADM691
Годинник реального часу	PCF8583
Батарея	CR2032
Користувальницькі інтерфейси	RS232, I2C, SPI, MicroLan
RS232	До 250 кБод / дуплекс
I2C	100-400 кгц / 7 біт адреса / мультимастер
SPI	До 2 МГц / 3 біт адреса
Кількість інтерфейсних ліній	24 (не вважаючи I2C і RS232/RS422)
Навантажувальна здатність інтерфейсних ліній	1.6/-0.060 ма, +20/-20 ма
Електроживлення	10-30В
Типовий струм споживання	40 ма
Захист від перенапруги / переплюсовки	Так
Світлодіодная індикація	Power Good, Watchdog
Температурний діапазон індустриального виконання	-40 +85° С
Габаритні розміри,	мм 76(82) x 76(82) x 19

Склад одноплатного контролера RS 2-1

1. Однокристальний мікроконтролер AT89S53 (Сполучимо з MSC-51, 12 кбайт FLASH, 256 Байт ОЗУ, 3 16- бітних таймера-лічильника, апаратний порт SPI, watchdog);
2. Співпроцесор уведення/виводу PIC16F87X (RISC- процесор, Flash 2...8K 14- бітних слів, 128...256 байт EEPROM, 192...368 байт ОЗУ, 3 таймери, 33 лінії вводу/виводу з високою навантажувальною здатністю $\pm 25\text{ма}$, АЦП 10 біт 8 каналів, ШІМ 10 біт 2 канали, USART, I2C, SPI)
3. ОЗУ 62C1024 (процесор адресує 64 кбайта ОЗУ, де розміщені дані, програми в кодах, програма на Fractal-BASIC; Fractal-BASIC використовує для своїх цілей трохи стільник байт – інше ОЗУ цілком наданий користувачу, при вимиканні живлення ОЗУ здійснюється резервною батареєю);
4. EEPROM 24LC256 (32 кбайта використовуються для енергонезалежного збереження програми на Fractal-BASIC, даних);
5. Годинник реального часу PCF8583 (годинник, календар будильник, можливість переривання процесора, при вимиканні живлення включається резервна батарея);
6. Супервізор / watchdog ADM691, для забезпечення нормального скидання процесора при ввімкненні живлення і спостереження за напругою живлення в процесі експлуатації, при падінні живлення нижче припустимого штатно припиняє процесор, переключає живлення ОЗУ і годин на резервне при провалі живильного напруги, скидання процесора при «зависанні»);
7. Вузол живлення (забезпечує стабілізацію напруги живлення, захист від імпульсних перешкод, захист модуля від переплюсовки і перевищення вхідного живильного напруги понад 30В, забезпечує живлення модулям розширення);
8. Індикатор power good (зелене світіння означає, що живляча напруга процесора знаходиться в нормі $5\text{В} \pm 5\%$);
9. Індикатор watchdog (червоне світіння означає, що спрацював watchdog);

10.3'єднувачі і джампери (забезпечують керування різними режимами модуля і підключення його до модулів чи розширення до керованого вузла).

2.5.3 Модуль АЦП 18 розрядів×18 каналів PCU18

Прецизійний вимірювальний модуль на базі 18-розрядного АЦП MAX132. Описаний пристрій є інтелектуальною вимірювальною мікросистемою високої точності, оптимізованою для збору аналогової інформації, її первинної обробки, буферизації та передачі на верхні рівні автоматизації (як на ЕОМ, так і на модульні контролери серії MCU).

Завдяки використанню 18-розрядного інтегруючого аналого-цифрового перетворювача (АЦП) MAX132, пристрій забезпечує високу роздільну здатність і відмінне придушення мережеских завад промислової частоти (50 Гц/60 Гц), що є критично важливим для прецизійного вимірювання сигналів від тензодатчиків, термопар та інших малосигнальних сенсорів.

1. Комунікаційні інтерфейси та режими роботи. Архітектура вимірювального модуля підтримує три базові режими експлуатації завдяки диверсифікації інтерфейсів зв'язку:

- Режим віддаленого керування (інтерфейс RS-232C): Пристрій безпосередньо взаємодіє з персональним комп'ютером (PC) або промисловим комп'ютером (IPC) через стандартний послідовний порт. Це дозволяє здійснювати пряме параметрування модуля, калібрування АЦП та трансляцію вимірювань у реальному часі в SCADA-системи або спеціалізоване ПЗ.
- Режим периферійного розширення (інтерфейс I^2C): За допомогою локальної послідовної шини I^2C пристрій інтегрується як додатковий високоточний канал введення аналогової інформації для модульних контролерів (наприклад, обчислювального блока MCU4-5). Це розширює базові можливості комплекту MCU без залучення ресурсів його власних АЦП.

- Автономний режим (Data Logger): Мікросистема здатна функціонувати повністю незалежно без постійного зв'язку з хост-контролером. Вимірювання виконуються із заздалегідь запрограмованою періодичністю (інтервалом опитування), а отримані масиви даних з часовими мітками накопичуються у внутрішній енергонезалежній пам'яті (EEPROM/Flash).

2. Гальванічна ізоляція та завадостійкість. Особливістю конструктивного виконання цього прецизійного модуля є повне просторове та електричне розділення його функціональних зон:

- Бар'єр ізоляції: Інтерфейсна (цифрова комунікаційна) та вимірювальна (аналогова) частини пристрою мають надійну гальванічну розв'язку.
- Електрична міцність: Напруга ізоляції становить не менше 5 кВ, що досягається використанням високошвидкісних цифрових оптронів або магнітних ізоляторів, а також спеціальним трасуванням друкованої плати із широким ізоляційним зазором (Creepage/Clearance).

Інженерна перевага. Така глибока гальванічна ізоляція повністю унеможливорює утворення паразитної «земляної петлі» (Ground Loop) між вимірювальним заземленням датчиків та цифровою землею комп'ютера чи контролера MCU. Вона захищає прецизійний тракт АЦП від високочастотних синфазних завад, що генеруються промисловим обладнанням (частотними перетворювачами, пускачами), а також захищає обчислювальні пристрої верхнього рівня від руйнування у разі аварійних високовольтних пробів на лінії датчиків.

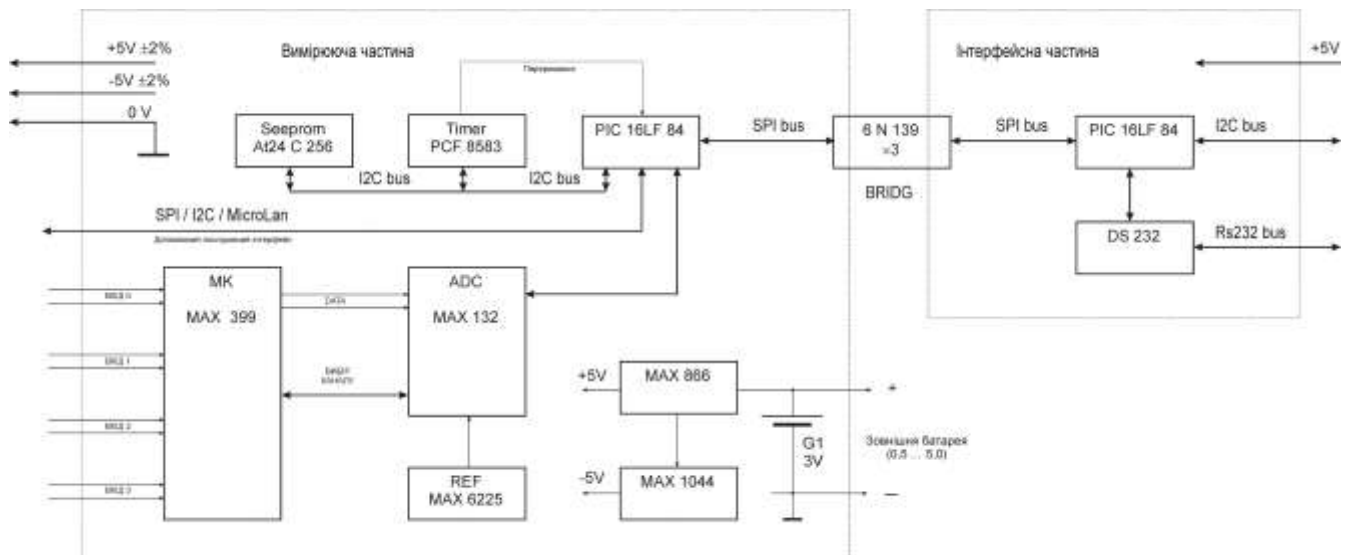


Рисунок 2.2 – Структурна схема PCU 18

Короткі характеристики:

Розрядність АЦП	+/- 18 біт
Кількість диференціальних входів	4
вхідний діапазон (при відсутності вхідного дільника)	+/- 512 мВ
вхідний струм (при відсутності вхідного дільника)	+/- 2 па
точність при 16 перетворень / секунду	+/-0,006%
напруга ізоляції	5 кВ
користувальницькі інформаційні інтерфейси на I ² C вимірювальній стороні	
інтерфейси на інтерфейсній стороні	RS232C, I ² C
ємність SEEPROM	0...32 кБайт
Електроживлення інтерфейсної частини	5 В +/-10% / 0,15А
Електроживлення вимірювальної частини	від убудованого CR2032 чи 2.7...5.0 В
Споживання від літійового елемента (у сплячому режимі)	50 мкА
Габаритні розміри	(152 x 56 x 25) мм

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Програмування модуля RS2-1 у режимі slave-пристрою промислової мережі MODBUS

Модуль виконує функцію периферійного “Slave” пристрою. У цьому режимі дані, що надходять по послідовному каналі, розглядаються внутрішньою програмою, як пакетне повідомлення від центрального пристрою (“Master”) у форматі Modbus RTU (усі отримують – двійкові дані). У заголовку пакета (перший байт) “Ведучий” завжди передає код адресуемого пристрою. Мережна адреса модуля зберігається за адресою 27h у реєстровому файлі PIC-контролера і його значення завжди повинне бути парним.

Справа в тім, що нульовий біт заголовка визначає ресурси до яких звертається убудована програма при виконанні команди. Значення за замовчуванням для вмісту цього регістра не вибирається, тому що всі модулі повинні «відгукуватися на нульову адресу». Для захисту від помилок у лінії зв'язку в дейтограмме передбачене поле контрольної суми, що визначається по методу CRC(Cyclical Redundancy Check) . Алгоритм підрахунку контрольної суми приводиться в розділі 3. Прийняті дані обробляються модулем (виконується команда і формується чи відповідь квитанція) тільки при збігу підрахованого і прийнятого значення контрольної суми і за умови, що повідомлення адресоване конкретному модулю. Границі пакета визначають тимчасові інтервали в переданому байтовом потоці. Тимчасова затримка передачі чергового байта не перевищує часу передачі 1.5 байт. Пауза між послідовними пакетами перевищує час передачі 3.5 байт.

Формати команд

Внутрішня програма модуля підтримує виконання чотирьох команд:

- команда 6 - запис регістра типу 4

- команда 1610 – запис регістрів типу 4
- команда 3 - читання регістрів типу 4
- команда 4 – читання регістрів типу 3

Обробка інших команд полягає у формуванні квитанції с кодом помилки 1 (невірна команда). При обробці “свого” пакета убудована програма аналізує нульовий біт заголовка. Якщо задана адреса парний - операція виконується при звертанні до власних ресурсів RS2-1, інакше за допомогою циклів шини I2C на ресурсах зовнішніх модулів.

Кількість адресуемых регістрів для всіх команд не перевищує 256. Значення старшого байта адреси регістра для команд 3, 4 і 16 при операціях безпосередньо з RS2-1 повинно бути нульовим. Для команд зі звертанням по шині I2C, на місці старшої адреси регістра розташовується Slave-адреса зовнішнього модуля. По специфікаціях протоколу MODBUS регістри типу 3 і 4 мають ємність два байти. Організація реєстрового файлу PIC-контролерів - байтова.

Під час читання “майстер” може просто ігнорувати прийнятий “зайвий” байт, а для зручності запису одного байта даних прийнята наступне угода по виконанню команди 6: убудована програма обробляє тільки молодший байт даних, якщо нульовий біт старшого байта адреси регістра встановлений в одиницю. Ємність програмних буферів приймача і передавача - 32 байта Але з урахуванням заголовка й обов'язкової контрольної суми число байт даних переданих в одному повідомленні не повинне перевищувати 22 (11 слів).

Формат команди запису запиту:

адреса пристрою

6 - код команди

адреса регістра (старший байт)

адреса регістра (молодший байт)

дані – значення регістра (старший байт)

дані – значення регістра (молодший байт)

контрольна сума(молодший байт)

контрольна сума(старший байт)

ВІДПОВІДЬ:

адреса пристрою

6 – код команди

адреса регістра(старший байт)

адреса регістра(молодший байт)

дані – значення регістра (старший байт)

дані – значення регістра (молодший байт)

контрольна сума(молодший байт)

контрольна сума(старший байт)

квитанція:

адреса пристрою

8616 – код команди з установленим старшим бітом

код помилки(один з перерахованих):

1 - загальне число байт не відповідає формату команди

2 - неприпустиме значення старшого байта адреси при звертанні до власних ресурсів

4 - немає відповіді від slave-пристрою (при звертанні до модуля на шині I2C)

контрольна сума(молодший байт)

контрольна сума(старший байт)

Формат команди запису 1610

запит:

адреса пристрою

1610 - код команди

адреса першого регістра (старший байт)

адреса першого регістра (молодший байт)

кількість регістрів(старший байт) - завжди повинний бути дорівнює 0

кількість регістрів(молодший байт) - $0 < \text{припустиме значення} \leq 11$

кількість байт даних

дані – значення першого регістра (старший байт)

дані – значення першого регістра (молодший байт)

...

контрольна сума(молодший байт)

контрольна сума(старший байт)

ВІДПОВІДЬ:

адреса пристрою

1610 – код команди

адреса першого регістра(старший байт)

адреса першого регістра(молодший байт)

кількість регістрів (старший байт)

кількість регістрів (молодший байт)

контрольна сума(молодший байт)

контрольна сума(старший байт)

КВИТАНЦІЯ:

адреса пристрою

9616 – код команди з установленим старшим бітом

код помилки(один з перерахованих):

1 - загальне число байт не відповідає формату команди

2 - неприпустиме значення старшого байта адреси при звертанні до власних ресурсів

4 - немає відповіді від slave-пристрою (при звертанні до модуля на шині I2C)

7 - неприпустима кількість регістрів

контрольна сума(молодший байт)

контрольна сума(старший байт)

Формат команд читання 3,4

запит:

адреса контролера

3(4) – код команди

адреса першого регістра (старший байт)

адреса першого регістра (молодший байт)

кількість регістрів(старший байт) - завжди повинний бути дорівнює 0

кількість регістрів(молодший байт) - $0 < \text{припустиме значення} \leq 11$

контрольна сума(молодший байт)

контрольна сума(старший байт)

ВІДПОВІДЬ:

адреса пристрою

З(4) – код команди

кількість байт даних

дані – значення першого регістра (старший байт)

дані – значення першого регістра (молодший байт)

...

контрольна сума(молодший байт)

контрольна сума(старший байт)

КВИТАНЦІЯ:

адреса пристрою

8316 (8416)- код команди з установленим старшої битому код помилки(один з перерахованих):

1 - загальне число байт не відповідає формату команди

2 - неприпустиме значення старшого байта адреси при звертанні до власних ресурсів

4 - немає відповіді від slave-пристрою (при звертанні до модуля на шині I2C)

7 - неприпустима кількість регістрів

контрольна сума(молодший байт)

контрольна сума(старший байт)

3.2 Алгоритм обчислення контрольного циклічного коду (CRC16)

Обчислення контрольного циклічного коду виробляється шляхом логічного розподілу бітової послідовності отриманої з послідовно складених байтів інформаційного блоку на утворюючий поліном виду $X^{16}+X^{15}+X^2+1$.

Алгоритм програмного обчислення CRC.

1. Завантажити в двухбайтовий регістр (назвемо його CRC- регістром) початкове значення CRC=0FFFFh
2. Скласти по модулі 2 (виняткове “ЧИ”) молодший байт CRC- регістра з першим байтом послідовності і помістити результат у CRC-регістр.
3. Зрушити вправо CRC-регістр на прапор переносу (старший біт старшого байта замінити нулем).
4. Якщо прапор переносу = 0, повторити п.3 Якщо прапор переносу =1, скласти по модулі 2 уміст CRC- регістра з константою 0A001h; результат помістити в CRC- регістр.
5. Повторювати п.3, п.4 поки загальна кількість зрушень не стане дорівнює 8.
6. Повторити п.2 для наступного й інших байтів послідовності.
7. Що вийшло в результаті дій по п.1...п.6 значення CRC- регістра є контрольним циклічним кодом усієї послідовності.

Установки послідовного приймально-передавача

За замовчуванням установлений наступний формат посилок:

8 біт даних , 1 стіп біт , без контролю паритету швидкість передачі 9600 біт/сек

Програмування паузи між послідовними пакетами

Відповідно до протоколу, ця пауза повинна бути не менш часу передачі 3.5 байт. У цей час орієнтуючись саме на це значення внутрішня програма визначає момент завершення передачі повідомлення. Регістр з адресою 26h містить кількість внутрішніх циклів тривалістю в 250 мкс, що укладаються на тимчасовому відрізку рівному часу передачі 3.5 байт. При швидкості умовчання 9600 біт/сек для передачі зазначеної кількості байт потрібен час порядку 3.5 мс , тому за адресою 26h записане значення 2000.

Зміною вмісту цього регістра можна підтримувати передачу пакетів даних у діапазоні швидкостей від 115200 до 600 біт/сек. При необхідності переходу на більш низькі швидкості необхідно змінити значення внутрішнього циклу.

Формування цього інтервалу здійснює таймер 1, з періодом внутрішньої синхронізації – 8 мкс.

Розрахувати нове значення завантаження таймера можна по формулі

$$T = 65535 - (\text{новий час циклу, у мкс}/8)$$

Молодший байт T записують за адресою 24h, а старший – 25h

Важливо: вміст адрес 24h і 25h, а також регістра генератора швидкості 99h може бути збережене в енергонезалежній пам'яті і автоматично відновлюватися щораз після включення харчування.

3.3 Програмування мережної адреси

Необхідне значення адреси записується в регістр PIS-контролера з адресою 27h. Нагадаємо, що значення, що задається, повинне бути парним. Операція виконується за допомогою команди 6 у форматі для запису одного байта (значення старшого байта адреси регістра встановлено рівним 01). Тут і далі у всіх прикладах усі числа шестнадцятиричні.

Запит:

00 06 01 27 00 02 B8 2D

Відповідь:

02 06 01 27 00 02 B9 CF

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Правила безпеки при експлуатації обладнання , що проектується.

Обладнання може обслуговувати особа, яка має кваліфікацію оператора хімічної промисловості і ознайомлення з даною інструкцією по експлуатації.

Обладнання потребує постійного нагляду обслуговуючого персоналу.

Не можна приводити в рух поламане обладнання.

Усунення неполадок дозволяється тільки персоналом служби головного механіка.

Не дозволяється робота обладнання в випадку відсутності захисних огорожень.

При митті обладнання миючим засобами і засобами дезінфекції слід дотримувати обережність і правила які відносяться до цих засобів а також одіти захисну одягу і насамперед:

- захисні окуляри,
- гумовий фартух на робочу одягу,
- гумові чоботи,
- захисні рукавиці,
- захисний капюшон,
- штани повинні прикривати чоботи.

При виявленні неполадки роботи обладнання слід заявити про ремонтній службі з метою усунення.

Обладнання перед передачею в експлуатацію слід:

- Заявити в Інспекцію Технічного нагляду;
- Провірити стан ізоляції і заземлення електропроводки.

Експлуатація установки не допускається:

- після закінчення терміну чергового огляду, якщо немає дозволу на експлуатацію;
- при відсутності в паспорті установки дозволу на експлуатацію;

- при виявленні неповної кількості кріпильних деталей.

Про заборону експлуатації установки повинен бути зроблений запис у паспорті установки з наведенням причини та повідомлено власника підприємства .

Для реєстрації та дозволу на пуск установки в експлуатацію особі, яка здійснює нагляд за установками, повинні бути подані:

- установки (за відсутності паспорта заводу –виготовлювача власником установки повинно бути складено паспорт встановленої форми)
- акт, який засвідчує, що монтаж (встановлення) виконати у відповідності з проектом і всі елементи установки встановлено правильно.
- схема включення.

Після реєстрації паспорт установки зі всіма вказаними вище документами повертається власнику установки.

4.2 Розробка заходів які зменшують небезпеку виникнення вибухів і пожеж в цеху що проектується.

Технологічне обладнання за нормальних режимів роботи повинно бути пожежобезпечним, а на випадок небезпечних несправностей та аварій необхідно передбачити захисні заходи, що обмежують масштаб та наслідки пожежі.

Обладнання, призначене для використання пожежонебезпечних та вибухонебезпечних речовин і матеріалів має відповідати конструкторській документації.

Технологічні процеси необхідно проводити згідно до регламентів та іншої затвердженої у встановленому порядку нормативами технічної та експлуатаційної документації.

На всі застосовувані в технологічних процесах речовини й матеріали повинні бути дані про показники її пожежної безпеки за діючими стандартами.

Спільне застосування, зберігання й транспортування речовин та матеріалів, котрі в результаті взаємодії одне з одним викликають займання, вибух або утворюють горючі і токсичні гази (суміші) не дозволяються.

У вибухопожежонебезпечних та пожежонебезпечних приміщеннях (дільницях, майстернях, цехах) та на устаткуванні, що становить небезпеку вибуху або займання, необхідно вивішувати знаки, які забороняють користування відкритим вогнем а також знаки, що попереджають про обережність за наявності займистих та вибухових речовин за діючими стандартами.

Виробництва де перебувають в обігу пожежовибухонебезпечні речовини і матеріали повинні бути оснащені автоматичними засобами контролю параметрів значення яких визначають пожежовибухонебезпечність процесу, сигналізацію граничних значень і системами блокувань які перешкоджають виникненню аварійних ситуацій.

Для внутрішнього освітлення технологічних апаратів і споруд під час їхнього огляду і ремонту в діючому цеху повинні застосовуватися переносні світильники в вибухобезпечному виконанні напругою не більше 12В, захищені металічною сіткою.

В вибухонебезпечних цехах застосування переносних електроприладів і агрегатів, які не відповідають вимогам даними до електроустаткування в вибухобезпечному виконанні, приємливому до даного середовища, забороняється.

В виробничих приміщеннях потрібно передбачати робоче і аварійне освітлення.

Профілактичний огляд. Планово попереджувальні та капітальний ремонт технологічного обладнання повинні здійснюватися в терміни, встановлені відповідними графіками, з урахуванням виконання заходів щодо забезпечення пожежовибухобезпеки, передбачених проектом, технологічним регламентом, технічними умовами.

Технологічне устаткування, апарати і трубопроводи, в яких утворюються речовини, пожежовибухонебезпечні пари газу та пил, повинні бути герметичними.

У вибухопожежонебезпечних приміщеннях (цехах, дільницях, тощо) слід застосовувати інструмент, виготовлений з безіскрових матеріалів або у відповідному вибухопожежобезпечному виконанні.

Покриття підлог у приміщеннях категорій за вибухопожежонебезпечністю А і Б повинно виконуватися з негорючих та таких, що під час ударів не дають іскор, матеріалів. Конструкція вікон та дверей у таких приміщеннях повинна виключати можливість іскроутворення.

4.3 Розрахунок евакуаційних шляхів із виробничих приміщень (дільниці) цеху що проектується.

Евакуаційні шляхи повинні забезпечувати евакуацію через евакуаційні шляхи всіх людей які знаходяться в приміщенні будівель, цехів на протязі необхідного часу евакуації.

Розрахунковий час евакуації з приміщень і будівель проводиться по формулах.

1. Для забезпечення безпечної евакуації людей з приміщень і будівель розрахунковий час евакуації t_p не повинно бути більше необхідного часу евакуації людей $t_{нб}$:

$$t_p \leq t_{нб} , \quad (4.1)$$

2. Розрахунковий час евакуації людей з приміщень і будівель встановлюється по розрахунку часу руху одного або декількох людських потоків через евакуаційні виходи від найбільш віддалених місць розміщення людей.

При розрахунку весь шлях руху людського потоку ділиться на ділянки (прохід , коридор, дверний проєм, сходовий марш, тамбур) довжиною l_i і шириною δ_i . Початковою ділянкою є проходи між робочими місцями, обладнанням.

При визначенні розрахункового часу довжина і ширина кожної ділянки шляху приймаються по проекті. Довжина шляху по сходових маршах, а також по пандусах вимірюється по довжині маршу. Довжина шляху в дверних проємах приймається рівною до нуля. Проєм, розташований в стіні товщиною більше 0,7 м, а також тамбур потрібно рахувати самостійною ділянкою горизонтального шляху маючи закінчену довжину I_i .

3. Розрахунковий час евакуації людей t_p потрібно визначати як суму часу руху людського потоку по різних ділянках шляху t_i по формулі:

$$t_p = t_1 + t_2 + t_3 + \dots t_i, \quad (4.2)$$

де t_1 – час руху людського потоку на першому (початковій) ділянці, хв;

$t_2, t_3, \dots t_i$ – час руху людського потоку на кожному з послідовних після першої ділянки шляху, хв.

4. Час руху людського потоку по першій ділянці шляху потрібно визначати по формулі:

$$t_1 = \frac{I_1}{V_1} \quad (4.3)$$

де V_1 – значення швидкості людського потоку по горизонтальному шляху на першій ділянці, визначається по таблиці 5.1. в залежності від густини D_1 , м/хв.

Густина людського потоку D_1 на першій ділянці шляху який має довжину I_1 і ширину δ_1 потрібно визначати за формулою:

$$D_1 = \frac{N_1 f}{I_1 \delta_1}, \quad (4.4)$$

де N_1 – число людей на першій ділянці; f – середня площа горизонтальної проекції людини, яка приймається рівною, m^2 : дорослого в домашньому одязі – 0,1;

4. Значення швидкості V_1 руху людського потоку на ділянках шляху, наступній після першого, приймається по таблиці 5.1. в залежності від значення інтенсивності руху людського потоку по кожному з цих ділянок шляху, яке

потрібно визначити для всіх ділянок шляху , в тому числі і для дверних проємів по формулі:

$$\rho_1 = \frac{\rho_i - 1\delta_i - 1}{\delta_1} \quad (4.5)$$

де δ_i , δ_{i-1} – ширина розглядуваної i -тої і попереднього до нього $i-1$ ділянки шляху, м; ρ_i , ρ_{i-1} – значення інтенсивності руху людського потоку по розглядуваній i -тій попередньої $i-1$ ділянки шляху, м/хв; значення інтенсивності руху людського потоку на першій ділянці шляху , визначається по таблиці 4.1 по значенню D_1 , встановлений по формулі (4.4).

Таблиця 4.1 – Швидкість і інтенсивність руху людського потоку в залежності від його щільності.

Щільність потоку $D, \text{м}^2/\text{м}^2$	Горизонтальний шлях		Проем дверей	Сходи вниз		Сходи вверх	
	Швидкість $V, \text{м/хв}$	Інтенсивність $P, \text{м/хв}$		Швидкість $V, \text{м/хв}$		Швидкість $V, \text{м/хв}$	Інтенсивність $P, \text{м/хв}$
			Інтенсивність $P, \text{м/хв}$				
0,01	100	1	1	100	1	60	0,6
0,05	100	5	5	100	5	60	3
0,1	80	8	8,7	95	9,5	53	5,3
0,2	60	12	13,4	68	13,6	40	8
0,3	47	14,1	16,5	52	15,6	32	9,6
0,4	40	16	18,4	40	16	26	10,4
0,5	33	16,5	19,6	31	15,5	22	11
0,6	27	16,2	19	24	14,4	18	10,8
0,7	23	16,1	18,5	18	12,6	15	10,5
0,8	19	15,2	17,3	13	10,4	13	10,4
0,9 і більше	15	13,5	8,5	8	7,2	11	9,9

При дверях, які відкриваються в сторону евакуаційного шляху розрахункову ширину евакуаційного шляху потрібно приймати рівною:

- Ширина коридору , зменшена на половину ширини дверного полотна, - при односторонньому розміщенні дверей;

- Ширині коридору, зменшений на ширину дверного полотна, при двосторонньому розміщені дверей.
- Двері сходових кліток в відкритому положенні не повинні зменшувати розрахункову ширину сходових площадок і маршів.
- Мінімальна ширина ділянок шляхів евакуації встановлюється в залежності від призначення будівель, але не менше 1м. Мінімальна ширина дверей на шляхах евакуації повинна бути 0,8м. Ширина зовнішніх дверей сходових кліток повинна бути не менше ширини маршу сходів.

На шляхах евакуації не повинно бути крутих підйомів (більш як 1/5) порогів та інших перепон. У таблиці 4.2. наводяться допустимі відстані від найвіддалених робочих місць до виходів назовні в залежності від категорії виробництва і ступеня вогнестійкості приміщення.

Необхідна сумарна ширина сходових маршів а також дверей або проходів на шляхах евакуації повинна бути забезпечена з розрахунку не менш як 125 чол. на 1м ширини для одно та двоповерхових, 100 чол. на 0,6м ширини для приміщень висотою в 3 і більше поверхів. Ширина коридорів у виробничих приміщеннях має бути не менше 1,4м , а ширина дверей не менше 0,8м.

Сумарна ширина проходів для евакуації всіх людей, що перебувають у цеху визначаються за формулою:

$$B = \frac{M \times C}{t \psi} M \quad (4.6)$$

де М – кількість людей у цеху;

С – мінімальна ширина одного потоку, м;

Т – час евакуації, хв.;

ψ - середня пропускна здатність одного потоку, люд/хв.

При розрахунку С = 0.6м а ψ - в залежності від етажності приміщення, для двоповерхового ψ = 25 люд/хв, для триповерхового ψ = 20 люд/хв, для приміщення, що має багато поверхів ψ = 15 люд/хв.

Таблиця 5.2 – Допустимі відстані від робочих місць до виходів назовні

Категорія виробництва	Ступінь вогнестійкості приміщення	Найбільші відстані від робочих місць до виходів назовні	
		В одноповерхових	В багатоповерхових
А	1 і 2	30	25
Б	1 і 2	75	50
В	1 і 2	75	50
	3	60	40
	4	50	30
	5	50	-
Г	1 і 2	Не обмежуються	Не обмежуються
	3	60	50
	4 і 5	50	-
Д	1 і 2	Не обмежуються	Не обмежуються
	3	100	75
	4	60	50
	5	50	40

ВИСНОВОК

У кваліфікаційній роботі була розрахована ректифікаційна колона для поділу суміші бензол-толуол.

У результаті розрахунку отримані параметри ректифікаційної установки поділу суміші бензол-толуол:

- 1) Витрата дистиляту - 3.95 т/год.;
- 2) Витрата кубового залишку - 6.05 т/год.;
- 3) Робоче флегмове число - 2.14;
- 4) Число теоретичних тарілок:

Усього - 24, з них верхніх - 8, нижніх - 16;

- 5) Діаметр колони - 1,82 м;
- 6) Висота колони - 14.12 м;
- 7) Середня ефективність тарілки:

У верхній частині колони - 0.45,

У нижній частині колони - 0.43;

- 8) Число дійсних тарілок:

Усього - 39, з них верхніх - 17, нижніх - 22;

- 9) Гідравлічний опір тарілок:

У верхній частині колони - 385.19 Па,

У нижній частині колони - 485.13 Па;

Ректифікаційна установка оснащена наступними контрольно-вимірювальними приладами:

- а) реєструючими і сумуючими паромірами на лінії подачі пари;
- б) реєструючими манометрами;
- в) манометрами, вакуумметрами й термометрами для вимірів тиску й температури в ректифікаційній установці;
- г) термометрами на лініях, що підводять і відводять воду з ректифікаційних установок;

д) термометрами, установленими в контрольному ліхтарі для виміру температури перегонки суміші;

е) приладами автоматичного контролю й дистанційного виміру температури й тиски (у першу чергу для апаратів безперервної дії).

Для забезпечення нормальних режимів ректифікаційного обладнання необхідно:

а) забезпечити контроль за роботою парових регуляторів, не допускаючи коливання тиску підігрівної пари – понад 0,2 - 0,3 кгс/см²;

б) стежити за приходом та температурою води охолодження конденсаторів, дефлегматорів і холодильників;

в) підтримувати встановлене технологічним режимом розподіл температур і тисків у ректифікаційній установці;

г) робити відбір продуктів з ректифікаційної колони у відповідності до технологічної інструкції;

д) забезпечити виведення конденсату з нагріваючих поверхонь ректифікаційного пристрою, систематично перевіряти якість конденсату (хімічним аналізом);

е) відстежувати герметичність апаратури, арматури колони, не дозволяти втрати сумішей та продуктів перегонки через нещільності арматури, з'єднань та ін. Установити контроль за температурою і якістю води, що відходить, з нагрівних камер, конденсаторів і ін. для уникнення можливості влучення в них продуктів перегонки;

ж) установити контроль стану автоматичних регулюючих приладів, арматур, контрольно-вимірювальних приладів і допоміжним устаткуванням ректифікаційної установки.

У проектованій системі керування ректифікаційною установкою передбачено контроль наступних технологічних параметрів:

Рівні вхідного і вихідного продуктів.

Температурні режими для підігрівної пари.

Температурні режими для ректифікаційної колони по повному об'єму.

Температурні режими для дефлегматора та конденсатора-охолоджувача готового продукту.

Витратні характеристики по надходженню вихідної суміші і видаленню готового продукту.

Керування проходить у наступних пунктах регулювання:

Керування температурними характеристиками підігрівачів і охолоджувачів за рахунок регулювання витратними характеристиками пари та охолоджуючої води відповідно.

Пункти регулювання температури нагріву за рахунок подачі пари, – нагрівник кип'ятильник вхідної суміші, нагрівник кип'ятильник кубового залишку.

Пункти регулювання температури охолодження, – дефлегматор у верхній частині колони, конденсатор-охолоджувач готового продукту.

Технічні характеристики системи керування:

Процесор	AT89S53(55) / 22,1184 МГц
Обсяг Flash	12(20) кБайт
Співпроцесор вводу/виводу	PIC16F877(874) / 4(20) МГц
ОЗУ 62C1024 / використовується	64 кБайта
Підживлення ОЗУ при відсутності живлення	Так
EEPROM	24LC256 (512)/ 32(64) кБайта
Супервізор / Watchdog	ADM691(695)
Годинник реального часу	PCF8583
Драйвер	RS232C MAX232A
Батарея	CR2032
Користувальницькі інтерфейси	RS232C, I2C, SPI, MicroLan
RS232C <-> AT89S53	До 250 кБод / дуплекс
I2C	100-400 кГц / 7 біт адреса
/мультимастер	
SPI	До 2 МГц / 3 біт адреса

Кількість інтерфейсних ліній RS232/RS422)	24 (не вважаючи I2C і
Навантажувальна здатність інтерфейсних ліній	1.6/-0.060 ма, +20/-20 ма
Електроживлення	10-30В
Типовий струм споживання	50 ма
Захист від перенапруги / переплюсовки	Так
Светодиодная індикація	Power Good, Watchdog
Температурний діапазон індустриального виконання	-40 +85° C
Габаритні розміри, мм	76(82) x 76(82) x 19

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ ГОСТ 31906:2019 (ГОСТ 31906-2013, IDT). Толуол нафтовий. Технічні умови. — Вид. офіц. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020. — 22 с. — (Національні стандарти України).
2. ДСТУ 2436.2:2018 (ISO 5272:1979, MOD). Вуглеводні ароматичні бензольного ряду. — Вид. офіц. — Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2019. — 14 с. — (Національні стандарти України).
3. Atmel Flash Microcontrollers. Product Portfolio/ Atmel corporation. - 2012. 28 p.
4. Kristian Saether, Ingar Fredriksen, Introducing a New Breed of Microcontrollers for 8/16-bit Applications [Електронний ресурс]. — Режим доступу : <http://www.atmel.com/images/doc7926.pdf>
5. Павельчак А. Г. Програмування мікроконтролерів систем автоматики: конспект лекцій для студентів базового напрямку 050201 —Системна інженерія / Укл.: А.Г. Павельчак, В.В. Самотий, Ю.В. Яцук — Львів: Львівська політехніка. — 2012. — 143 с.
6. Коноваленко І. В. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0 : навч. посіб. / І. В. Коноваленко, П. О. Марущак. — Тернопіль : В. А. Паляниця, 2020 — 320 с. <http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/handle/123456789/4115>
7. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. — Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. — 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>
8. Капаціла Ю.Б., Савків В.Б. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 60 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48495>
9. Капаціла Ю.Б., Шовкун О.П. Конструкторсько-технологічна практика. Методичні вказівки для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр»

спеціальності «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 22 с.

10. Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження частотних характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – с. 16. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39207>
11. Козбур І.Р., «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>
12. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1551>
13. Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь, В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 21 с.
14. Моделювання нелінійних систем керування у пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур, Г.В. Козбур, Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. - 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28057>
15. Моделювання систем керування в пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур, Г.В. Козбур

- , Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. - 23 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28056>
- 16.Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Multisim. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо . - Тернопіль : ТНТУ Імені Івана Пулюя, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26404>
- 17.Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Proteus VSM. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26397>
- 18.Методичні вказівки до курсового проектування з курсу "Проектування систем автоматизації" / Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 128 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48646>
- 19.Лабораторний практикум з проектування та моделювання роботи електропневматичних схем у середовищі програмного пакету «FluidSIM Pneumatics» з курсу «Технічні засоби автоматизації» / укл. : О.К. Шкодзінський. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 32 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31418>
- 20.Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка”. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 53 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44635>
- 21.Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. -26 с.
- 22.Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.

23. Аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи. : Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Теорія автоматичного управління», для здобувачів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньо-професійних програм «Комп'ютерно-інтегровані системи автоматики та робототехніки», «Комп'ютеризовані системи управління та прикладне програмування». / укл. І.Р. Козбур, В.П. Пісьціо, В.Б. Савків, П.С. Федорів. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. – 67 с
24. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший (бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.
25. Навчально-методичний посібник до практичних заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» для студентів освітнього ступеня бакалавр усіх спеціальностей та форм навчання / Укладачі : О. Я. Гурик, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин, С. Ю. Мариненко, О. І. Король. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 123 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48496>
26. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
27. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.
28. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.
29. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.

30. Буров Є., Митник М. Комп'ютерні мережі. (у 2-х томах). Львів, Магнолія, 2018.
31. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем. Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А. Г. Микитиший, М. М. Митник, О. С. Голотенко, В. В. Карташов. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42625>
32. Конспект лекцій з дисципліни «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» для студентів спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форми здобуття освіти / уклад. І. С. Дідич. // ТНТУ. – 2025. – С. 92. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/50293>
33. I. Strutynska, H. Kozbur, L. Dmytrotsa, O. Sorokivska, L. Melnyk and R. Grytseliak, "Regarding to the Concept of Small and Medium-Sized Enterprises Digitalization in Ukraine: Problems and Solutions," 2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), Deggendorf, Germany, 2021, pp. 276-279, doi: 10.1109/ACIT52158.2021.9548382.
34. Валяшек В.Б. Навчальний посібник з курсу: “ Оптимізаційні методи та моделі “ для спеціальностей “Облік і аудит, Фінанси і кредит, Маркетинг, Економічна кібернетика” / Кривень В.А., Валяшек В.Б., Цимбалюк Л.І., Козбур Г.В. – Тернопіль : видавництво ТНТУ, 2015. – 83 с.
35. Ковтко А.М., Козбур І.Р., Савків В.Б., Козбур Г.В. Архітектура автоматизованої системи для генерації модульних тестів на основі штучного інтелекту та мутаційного тестування // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей XIV міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, (Тернопіль, 11-12 грудня 2025) / М-во освіти і науки України, Терн. націон. техн. ун-т ім. І. Пулюя [та ін]. – Тернопіль : ФОП Паляниця В.А., 2025 – с. 278–280.
36. Kovtko A., Savkiv V., Kozbur H., Kozbur I., Trembach R. Integration of mutation testing into unit test generation using large language models // Proceedings of the 3rd International Workshop on Computer Information Technologies in Industry 4.0

(CITI'2025). Ternopil, Ukraine, June 11–12, 2025. Vol. 4057. CEUR Workshop Proceedings, 2025. <https://ceur-ws.org/Vol-4057/paper4.pdf>

37. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>
38. Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.
39. Савків В.Б., Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2021. 50 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35172>