

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

|                |                                                  |
|----------------|--------------------------------------------------|
| ННІ/факультет  | <u>Навчально-науковий технологічний інститут</u> |
| Кафедра        | <u>хімічних технологій та інженерії</u>          |
| Спеціальність  | <u>161 Хімічні технології та інженерія</u>       |
| Форма навчання | <u>денна</u>                                     |

**КВАЛІФІКАЦІЙНА БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА ЗДОБУВАЧА**

Ковальової Лілії Віталіївни  
(прізвище, ім'я, по батькові здобувача)

на тему Вдосконалення процесу ректифікації сирого  
кам'яновугільного бензолу шляхом регулювання рефлюксу  
в колоні  
(повна назва теми)

за матеріалами вітчизняних та зарубіжних наукових публікацій,  
нормативно-технічної документації, звітів підприємств  
та результатів прикладних досліджень у галузі  
коксохімічного виробництва  
(повна назва бази дослідження)

|                   |                               |                               |
|-------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Науковий керівник | <u>К.Х.Н., доцент</u>         | <u>Кормер М.В</u>             |
|                   | (наук. Ступінь, вчене звання) | (підпис) (прізвище, ініціали) |

**Робота допущена до захисту в ЕК**

Протокол засідання кафедри  
від 12.06.2026р. № 16

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
(підпис)

К.Т.Н., доцент Шмельцер К.О  
Наук. Ступень, вчене звання Ініціали, прізвище

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
Кафедра Хімічних технологій та інженерії

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)  
Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
хімічних технологій та інженерії  
К.ШМЕЛЬЦЕР  
“ ” 2026 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА**  
(назва атестаційної роботи)

Здобувачу Ковальовій Лілії Віталіївні

Тема роботи «Вдосконалення процесу ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу шляхом регулювання рефлюксу в колоні»

керівник роботи Кормер Марина Віталіївна, к.х.н., доцент

Затверджені наказом вищого навчального закладу від № 228-ст від «6 квітня» 2026 р.

2. Строк подання студентом роботи 01 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи «АрселорМіттал Кривий Ріг», цех уловлювання

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

4.1 Аналітична частина: Склад і властивості коксового газу, методи уловлювання бензольних вуглеводнів із коксового газу, характеристика сирого бензолу та його основних компонентів, порівняльна характеристика поглиначів, вибір оптимального та вимоги до його якості, виділення бензольних вуглеводнів з поглинального масла, розрахунок матеріального балансу процесу коксування

4.2 Основна частина. Технологічна схема виділення бензольних вуглеводнів з поглинального масла вогневим методом, технологічна схема по проекту фірми «Крупн-Копперс», сучасні технічні рішення в бензольному відділенні цеху уловлювання, характеристика основних апаратів відділення ректифікації насиченого поглинального масла, розрахунок дистиляційної колони для відгону бензольних вуглеводнів. Охорона праці та основні заходи із захисту довкілля

5. Перелік графічного матеріалу (графічна частина не передбачається)

## 6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | завдання<br>видав | завдання<br>прийняв |
|--------|-------------------------------------------|-------------------|---------------------|
| 1      | Кормер М.В., доцент                       |                   |                     |
| 2      | Кормер М.В., доцент                       |                   |                     |
| 3      |                                           |                   |                     |

7. Дата видачі завдання 6 квітня 2026 року

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів атестаційної роботи                    | Строк виконання<br>етапів роботи | Примітка |
|-------|-----------------------------------------------------|----------------------------------|----------|
| 1     | Аналітична частина                                  | 12.05.2026                       |          |
| 2     | Основна частина                                     | 26.05.2026                       |          |
| 3     | Оформлення пояснювальної записки                    | 29.05.2026                       |          |
| 4     | Подання випускної кваліфікаційної роботи до кафедри | 01.06.2026                       |          |
| 5     | Захист роботи в ЕК                                  | 16.06.2026                       |          |

Здобувач

\_\_\_\_\_  
(підпис)

Л. КОВАЛЬОВА

Керівник роботи

\_\_\_\_\_  
(підпис)

М. КОРМЕР

[illegible]

## АНОТАЦІЯ

Ковальова Л.В. Вдосконалення технології ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу шляхом оптимізації системи регулювання рефлюксу. – Рукопис.

Кваліфікаційна бакалаврська робота за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія». Державний університет економіки і технологій. Навчально-науковий технологічний інститут. Кривий Ріг, 2026.

Кваліфікаційна бакалаврська робота присвячена підвищенню ефективності розділення сирого кам'яновугільного бензолу шляхом вдосконалення системи управління флегмовим числом. У роботі показано, що стабільність гідродинамічного режиму та точність регулювання рефлюксу критично впливають на чіткість розділення фракцій та чистоту цільових продуктів (бензолу, толуолу, ксилолів). На основі розрахунків матеріального та теплового балансів обґрунтовано вибір оптимального флегмового числа  $R=3$ , що забезпечує необхідну якість бензольної фракції при раціональних енерговитратах.

У роботі проаналізовано динамічні характеристики ректифікаційної колони та доведено переваги переходу від жорсткої схеми стабілізації витрати зрошення до адаптивного регулювання за температурою на «контрольній» тарілці. Впровадження сучасної мікропроцесорної системи керування з використанням швидкісних датчиків контролю дозволяє мінімізувати вплив коливань складу сировини на вихід товарної продукції.

Показано, що оптимізація системи регулювання рефлюксу забезпечує зниження питомих витрат гріючої пари на 10–15% та стабілізацію теплового навантаження на обладнання. Запропоновані технічні рішення роблять технологічний процес ректифікації більш гнучким, енергоефективним та безпечним в умовах сучасного коксохімічного виробництва.

*Ключові слова:* сирий бензол, ректифікаційна колона, рефлюкс, флегмове число, автоматизація, енергоефективність, математичне моделювання.

## ЗМІСТ

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВСТУП                                                                                                        | 7  |
| 1. АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА                                                                                        | 8  |
| 1.1 Фізико-хімічні властивості сирого кам'яновугільного бензолу та вимоги до кінцевих продуктів ректифікації | 8  |
| 1.2 Теоретичні основи процесу ректифікації багатокомпонентних сумішей                                        | 11 |
| 1.3 Огляд існуючих схем ректифікації сирого бензолу на коксохімічних підприємствах                           | 14 |
| 1.4 Роль флегмового числа (рефлюксу) у забезпеченні якості розділення компонентів                            | 21 |
| 1.5 Аналіз методів контролю та регулювання рефлюксу в ректифікаційних колонах                                | 22 |
| 1.6 Висновки до аналітичної частини                                                                          | 24 |
| 2. ОСНОВНА ЧАСТИНА                                                                                           | 26 |
| 2.1 Опис технологічної схеми діючої установки ректифікації сирого бензолу                                    | 26 |
| 2.2 Матеріальний та тепловий баланси процесу ректифікації                                                    | 32 |
| 2.3 Вплив зміни флегмового числа на склад та вихід цільових фракцій (бензольної, толуольної, ксилольної)     | 40 |
| 2.4 Вдосконалення системи регулювання рефлюксу                                                               | 45 |
| 2.4.1 Обґрунтування вибору засобів автоматизації для контролю складу пари/рідини в колоні                    | 45 |
| 2.4.2 Математичне моделювання процесу ректифікації при змінному флегмовому числі                             | 49 |
| 2.4.3 Оптимізація енергоспоживання (пари на нагрів) шляхом стабілізації рефлюксу                             | 53 |
| 2.5 Технологічна схема вдосконаленої системи регулювання рефлюксу                                            | 56 |
| 2.6 Охорона праці                                                                                            | 58 |

|                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.6.1 Характеристика небезпечних та шкідливих чинників на ділянці ректифікації бензолу (вибухопожежонебезпека, токсичність бензолу) | 58 |
| 2.6.2 Заходи щодо забезпечення безпечної експлуатації ректифікаційних колон                                                         | 62 |
| 2.6.3 Вимоги до автоматизації як засобу підвищення безпеки (запобігання аварійним ситуаціям)                                        | 68 |
| 2.6.4 Пожежна профілактика та системи протиаварійного захисту                                                                       | 71 |
| 2.7 Висновки до основної частини                                                                                                    | 73 |
| ВИСНОВКИ                                                                                                                            | 75 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ                                                                                                          | 77 |

## ВСТУП

Коксохімічна промисловість є стратегічно важливою галуззю хімічного комплексу, яка забезпечує металургійну промисловість коксовою продукцією, а хімічне виробництво – цінною ароматичною сировиною.

Одним із найважливіших напрямів переробки продуктів коксування є ректифікація сирого кам'яновугільного бензолу, у результаті якої отримують високочисті ароматичні вуглеводні: бензол, толуол та ксилоли. Ці компоненти широко використовуються у виробництві пластмас, синтетичних волокон, лакофарбових матеріалів, розчинників та інших продуктів органічного синтезу.

Сучасні вимоги до якості ароматичних вуглеводнів постійно зростають, що обумовлено розвитком нафтохімії та підвищенням стандартів екологічної й технологічної безпеки. Забезпечення необхідної чистоти продуктів потребує високоефективного процесу ректифікації та стабільного функціонування ректифікаційного обладнання.

Одним із головних параметрів, що визначає ефективність ректифікаційного процесу, є флегмове число (рефлюкс). Від величини та стабільності потоку рефлюксу залежить ступінь очищення продуктів, продуктивність установки та витрати теплової енергії. Недостатнє або нестабільне регулювання флегми призводить до порушення режиму масообміну, перевитрат пари та охолоджувальної води, а також до погіршення якості готової продукції, що може спричинити невідповідність державним стандартам.

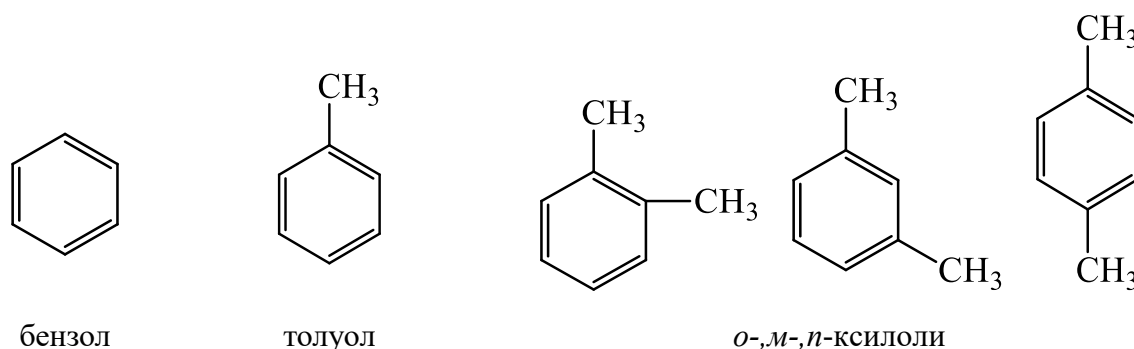
У зв'язку з цим особливої актуальності набуває вдосконалення систем автоматичного регулювання процесу. Використання сучасних засобів автоматизації, датчиків контролю параметрів, виконавчих механізмів та математичного моделювання дозволяє забезпечити стабільність технологічного процесу.

## 1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

### 1.1 Фізико-хімічні властивості сирого кам'яновугільного бензолу та вимоги до кінцевих продуктів ректифікації.

Сирий кам'яновугільний бензол є одним із найважливіших побічних продуктів процесу коксування кам'яного вугілля, що утворюється під час термічного розкладу органічної маси вугілля без доступу повітря. У процесі коксування, який відбувається при температурах 900-1100 °С, формується коксовий газ, у складі якого містяться леткі органічні сполуки. Під час охолодження цього газу відбувається конденсація частини компонентів з утворенням сирого бензолу [1].

Сирий бензол являє собою складну багатокомпонентну суміш органічних сполук, що характеризується значною хімічною різноманітністю. Основну частку (понад 90 %) становлять ароматичні вуглеводні, зокрема бензол, толуол та ксилоли (рис. 1.1), які є цінною сировиною для нафтохімічної та органічної хімічної промисловості.



**Рис. 1.1 Структурні формули основних ароматичних сполук сирого бензолу**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [3, 4]

Ці компоненти широко використовуються для синтезу полімерів, розчинників, барвників, лікарських препаратів та інших важливих продуктів.

Окрім основних компонентів, сирий бензол містить значну кількість домішок, які істотно впливають на його фізико-хімічні властивості та ускладнюють процес подальшого очищення.

До таких домішок належать ненасичені вуглеводні (олефіни та дієни), сірковмісні сполуки (зокрема тіофен, сірковуглець), а також насичені аліфатичні вуглеводні. Присутність сірковмісних компонентів є особливо небажаною, оскільки вони негативно впливають на якість кінцевої продукції та можуть викликати корозію технологічного обладнання.

Фізичні властивості сирого бензолу залежать від багатьох факторів, зокрема температурного режиму коксування, складу вугільної шихти, а також умов конденсації продуктів коксування. За нормальних умов сирий бензол є рухливою рідиною світло-жовтого або коричневого кольору з характерним різким запахом, що зумовлений наявністю ароматичних вуглеводнів та сірковмісних домішок [2].

Густина сирого бензолу, як правило, знаходиться в межах 870-910 кг/м<sup>3</sup>, що пояснюється варіацією його компонентного складу. Температурний інтервал кипіння є досить широким, однак температура початку кипіння зазвичай становить 78-82 °С, що відповідає температурі кипіння основного компонента – бензолу [2].

Важливою особливістю сирого бензолу є його фракційний склад, який визначає технологічні підходи до його переробки. Для виділення окремих компонентів застосовують процес ректифікації, ефективність якого значною мірою залежить від різниці температур кипіння складових суміші та їх термодинамічних характеристик.

Саме тому для інженерних розрахунків процесів розділення ключове значення мають такі параметри, як молярна маса, температура кипіння, густина та взаємна леткість компонентів [3].

Основні фізико-хімічні характеристики найбільш типових компонентів сирого бензолу наведені в таблиці 1.1, що дозволяє оцінити їх вплив на перебіг процесів масо-та теплообміну під час ректифікації.

Процес ректифікації спрямований на розділення цієї суміші на цільові продукти високої чистоти. Основними продуктами є бензол для синтезу, толуол кам'яновугільний та ксилольна фракція [4].

Таблиця 1.1

**Основні фізико-хімічні характеристики компонентів сирого бензолу**

| Компонент    | Хімічна формула                 | Молярна маса, г/моль | Температура кипіння, °C | Густина ( $\rho_{20}^4$ ), кг/м <sup>3</sup> * |
|--------------|---------------------------------|----------------------|-------------------------|------------------------------------------------|
| Бензол       | C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>   | 78,11                | 80,1                    | 879                                            |
| Толуол       | C <sub>7</sub> H <sub>8</sub>   | 92,14                | 110,6                   | 867                                            |
| м-Ксилол     | C <sub>8</sub> H <sub>10</sub>  | 106,16               | 139,1                   | 864                                            |
| Тіофен       | C <sub>4</sub> H <sub>4</sub> S | 84,14                | 84,2                    | 1064                                           |
| Сірковуглець | CS <sub>2</sub>                 | 76,14                | 46,2                    | 1263                                           |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [3, 4]

Наявність домішок, таких як тіофен, значно ускладнює процес розділення через близькість температур кипіння з бензолом (різниця становить лише 4,1 °C), що зумовлює необхідність високої чіткості розділення та точного регулювання флегмового числа.

Вимоги до якості кінцевих продуктів ректифікації регламентуються державними та міжнародними стандартами. Для бензолу, що використовується у хімічній промисловості, критичними показниками є концентрація основної речовини, забарвлення та вміст загальної сірки [3,4].

Таблиця 1.2

**Вимоги до основних показників якості бензолу та толуолу**

| Показник якості                                | Бензол (вищий гатунок)       | Толуол (марка А)             |
|------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Зовнішній вигляд                               | Прозора рідина без суспензій | Прозора рідина без суспензій |
| Масова частка основної речовини, %, не менше   | 99,90                        | 99,80                        |
| Температура кристалізації, °C, не нижче        | 5,48                         | —                            |
| Масова частка загальної сірки, %, не більше    | 0,00005                      | 0,0001                       |
| Масова частка неграничних сполук, %, не більше | 0,005                        | 0,01                         |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [3,4]

Сучасні тенденції ринку вимагають від коксохімічних підприємств переходу на випуск продукції класу «Pure» або «Nitration Grade», що вимагає модернізації існуючих колон та впровадження систем стабілізації рефлюксу для запобігання потраплянню домішок у дистилят.

Таким чином, аналіз фізико-хімічних властивостей підтверджує, що ефективність розділення напряду залежить від точності підтримання теплового та матеріального балансів у колоні.

## **1.2 Теоретичні основи процесу ректифікації багатокомпонентних сумішей.**

Ректифікація є одним із найважливіших процесів масообміну, який широко застосовується в хімічній, нафтохімічній та коксохімічній промисловості для розділення рідких сумішей на окремі компоненти або фракції. Сутність процесу полягає у багаторазовому контакті парової та рідкої фаз, що рухаються назустріч одна одній, унаслідок чого відбувається перерозподіл компонентів між фазами відповідно до їх леткості [6].

Теоретичною основою процесу ректифікації є фазова рівновага між рідиною та парою, яка встановлюється за певних температури і тиску. У стані рівноваги склад пари відрізняється від складу рідини: більш леткі компоненти концентруються у паровій фазі, тоді як менш леткі – у рідкій. Це явище лежить в основі розділення сумішей.

Абсорбція бензольних вуглеводнів поглинальним маслом є фізичним процесом, при якому відбувається взаємний масообмін між газовою та рідкою фазами у напрямку досягнення рівноваги. Стан рівноваги визначається законами Генрі-Дальтона та Рауля. Відповідно до цих законів, при постійній температурі концентрація сирого бензолу в поглинальній оливі пропорційна парціальному тиску бензолу в газовій фазі [8].

Так як в апаратурі, що використовується для проведення процесу абсорбції, рівноважні концентрації ніколи не досягаються, їх прийнято розглядати як ту межу, до якої прагне процес у конкретних технологічних умовах (температура, тиск, якісні характеристики поглинального масла та ін.).

Для кількісного опису рівноваги між фазами використовується закон Рауля (1.1) для ідеальних розчинів, відповідно до якого парціальний тиск компонента

пропорційний його мольній частці в рідині. Для реальних систем, до яких належать багатоконпонентні органічні суміші, вводяться коефіцієнти активності, що враховують відхилення від ідеальності [7].

$$y_i = x_i \cdot \frac{p_i^{sat}}{P}, \quad (1.1)$$

де  $y_i$  – мольна частка компонента в парі;  $x_i$  – мольна частка компонента в рідині;  $P_i^{sat}$  – тиск насиченої пари компонента;  $P$  – загальний тиск системи.

Для реальних систем:

$$y_i = x_i \gamma_i \cdot \frac{p_i^{sat}}{P}, \quad (1.2)$$

де  $\gamma_i$  – коефіцієнт активності.

Одним із ключових параметрів, що характеризує ефективність розділення, є відносна леткість компонентів. Вона показує, наскільки один компонент легше переходить у парову фазу порівняно з іншим. Чим більша різниця в леткості компонентів, тим простіше здійснюється їх розділення і тим менша кількість теоретичних тарілок необхідна для досягнення заданої чистоти продукту. Її можна розрахувати за формулою 1.3 [7]:

$$\alpha_{ij} = \frac{\frac{y_i}{x_i}}{y_j/x_j}, \quad (1.3)$$

де  $\alpha_{ij}$  – відносна леткість компонентів  $i$  та  $j$ .

Якщо  $\alpha > 1$ , компонент  $i$  є більш летким.

Кількісно процес ректифікації описується матеріальними та тепловими балансами, а також рівняннями рівноваги. Для бінарних систем часто використовують графічні методи (наприклад, метод Мак-Кейба-Тіле), однак для

багатокомпонентних сумішей застосовують більш складні розрахункові методи, що базуються на ітераційних алгоритмах і використанні рівнянь стану.

Ректифікаційний процес реалізується в спеціальних апаратах— ректифікаційних колонах, які можуть бути тарілчастого або насадкового типу. У таких колонах відбувається інтенсивний контакт фаз, що забезпечує ефективний масообмін. Конструктивні особливості колони (тип контактних пристроїв, висота, діаметр) суттєво впливають на її ефективність [8].

Важливим елементом ректифікації є організація потоків – подача вихідної суміші, відбір дистиляту (верхнього продукту) та кубового залишку (нижнього продукту), а також повернення частини конденсату у вигляді флегми. Відношення кількості флегми до дистиляту (флегмове число) є одним із головних параметрів, що визначає якість розділення та енергетичні витрати процесу.

У випадку багатокомпонентних сумішей, таких як сирий кам'яновугільний бензол, процес ректифікації ускладнюється через наявність великої кількості компонентів із близькими температурами кипіння. Це потребує використання багатоступеневих схем розділення, а також врахування взаємного впливу компонентів на рівноважні характеристики системи [9].

Таким чином, ректифікація багатокомпонентних сумішей є складним багатofакторним процесом, ефективність якого визначається як термодинамічними властивостями системи, так і конструктивними та режимними параметрами апаратури. Глибоке розуміння теоретичних основ процесу є необхідною передумовою для його оптимізації та підвищення ефективності промислових установок.

### **1.3 Огляд існуючих схем ректифікації сирого бензолу на коксохімічних підприємствах**

На сучасних коксохімічних підприємствах переробка сирого кам'яновугільного бензолу здійснюється за багатостадійними технологічними схемами, що поєднують процеси попереднього очищення та ректифікації. Вибір конкретної схеми визначається складом сировини, вимогами до якості продуктів і рівнем технічного оснащення підприємства.

Для більшості коксохімічних підприємств України характерними є підвищені втрати бензольних вуглеводнів зі зворотним газом, що перевищують зазначені вище гранично допустимі правила технічної експлуатації.

Подібний стан є сумарним ефектом низки негативних факторів, до яких, в першу чергу, слід віднести:

- нестабільність витрат газу та поглинального масла;
- незадовільний температурний режим;
- недостатня якість оборотного поглинального масла;
- незадовільний стан основного технологічного устаткування;
- обмежена забезпеченість установок вимірювальним обладнанням.

Багато коксохімічних виробництв ведуть роботи з модернізації установок та технологічного обладнання, та адаптації їх до роботи в сучасних технологічних умовах [8].

При модернізації існуючих та будівництві нових установок мають бути витримані наведені вище технологічні параметри та враховані заходи та технічні рішення, які реалізовані у промисловій практиці як передовими виробництвами далекого та ближнього зарубіжжя, так і коксохімвиробництвами України.

Сирий бензол утворюється при охолодженні коксового газу і надходить на установку уловлювання, після чого піддається подальшій переробці. Типова схема включає стадії абсорбції бензолу з газу, десорбції, очищення та ректифікації [5].

Найбільш поширеною є класична схема, яка включає:

1. Попередню ректифікацію сирого бензолу;
2. Виділення головної (сірковуглецевої) фракції;
3. Отримання бензол-толуол-ксилольної (БТК) фракції;
4. Кінцеву ректифікацію для одержання товарних продуктів.

На першій стадії відганяються легкі компоненти (до 80 °С), що містять сірковуглець і тіофен. Далі виділяється основна БТК-фракція (80-145 °С), після чого отримують важкі залишки [10].

Класична схема ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу передбачає послідовне розділення суміші на окремі фракції з подальшим очищенням та отриманням товарних продуктів. Вона включає кілька основних стадій, які відрізняються умовами проведення процесу та складом отримуваних продуктів. Характеристика цих стадій наведена в таблиці 1.3

Таблиця 1.3

#### Основні стадії класичної схеми

| Стадія                 | Опис процесу                 | Основні продукти              |
|------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Попередня ректифікація | Відгонка легких компонентів  | Сірковуглецева фракція        |
| Основна ректифікація   | Розділення БТК-фракції       | Бензол, толуол, ксилоли       |
| Доочищення             | Видалення домішок            | Очищені ароматичні вуглеводні |
| Кінцева ректифікація   | Отримання товарних продуктів | Технічний бензол, толуол      |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [10]

Як видно з табл. 1.3, класична схема дозволяє отримати основні ароматичні вуглеводні, однак не забезпечує достатнього рівня очищення від сірковмісних та ненасичених домішок. Це негативно впливає на якість кінцевих продуктів і може ускладнювати подальше використання бензол та його похідних у хімічному виробництві.

З метою підвищення якості продукції в більш досконалих технологічних схемах перед стадією ректифікації застосовують хімічне очищення сирого бензолу. Найпоширенішими методами є кислотне очищення (для видалення ненасичених сполук), лужне очищення (для вилучення сірковмісних компонентів), а також промивання та нейтралізація [11].

Застосування цих операцій дозволяє значно знизити вміст домішок, підвищити стабільність процесу ректифікації та зменшити навантаження на масообмінне обладнання.

Доцільність впровадження стадії попереднього очищення підтверджується порівняльною характеристикою технологічних схем, яка наведена в таблиці 1.4

Таблиця 1.4

### Порівняння схем з очищенням і без очищення

| Показник                 | Без очищення | З очищенням |
|--------------------------|--------------|-------------|
| Якість продукту          | Середня      | Висока      |
| Вміст сірки              | Високий      | Низький     |
| Складність процесу       | Нижча        | Вища        |
| Енергетичні витрати      | Нижчі        | Вищі        |
| Термін служби обладнання | Менший       | Більший     |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [12]

Серед удосконалених технологічних рішень у процесах переробки сирого кам'яновугільного бензолу значне місце займає схема з попереднім виділенням головної фракції. Її сутність полягає у тому, що перед основною стадією ректифікації здійснюється відбір найбільш летких компонентів, які формують головну фракцію сирого бензолу (ГФСБ). До її складу переважно входять сірковуглець, тіофен та інші легкі домішки.

Виділення головної фракції є важливим технологічним прийомом, оскільки дозволяє знизити негативний вплив домішок на подальші стадії розділення.

Завдяки цьому досягаються такі переваги [12]:

- зменшення токсичності технологічних потоків;
- покращення гідродинамічних та термодинамічних умов роботи ректифікаційної колони;
- підвищення селективності та ефективності процесу розділення.

Таким чином, попереднє вилучення легких компонентів сприяє стабілізації роботи основної ректифікаційної системи та підвищенню якості кінцевих продуктів. Головна фракція, що утворюється на стадії попередньої ректифікації,

може надалі піддаватися додатковій хімічній або термічній переробці залежно від вимог технологічного регламенту [13].

Більш детальний розподіл компонентів за фракціями, які утворюються в процесі ректифікації сирого бензолу, наведено в табл. 1.5.

Таблиця 1.5

### Фракційний склад продуктів ректифікації

| Фракція | Температурний інтервал,<br>°C | Основні компоненти                                                               |
|---------|-------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Головна | до 80                         | Сірковуглець (CS <sub>2</sub> ), тіофен, легкі сірковмісні та ненасичені сполуки |
| БТК     | 80–145                        | бензол, толуол, ксилоли                                                          |
| Важка   | 145–180                       | Поліциклічні ароматичні вуглеводні, смолисті речовини                            |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [13]

На сучасних коксохімічних і нафтохімічних підприємствах дедалі ширше впроваджуються вдосконалені технологічні схеми ректифікації сирого бензолу, спрямовані на підвищення енергоефективності, якості розділення та зниження експлуатаційних витрат. Такі схеми базуються на принципах інтенсифікації масо–та теплообмінних процесів і характеризуються комплексним використанням енергетичних і конструктивних рішень.

До основних напрямів удосконалення сучасних ректифікаційних систем належать [14]:

- використання теплообмінного обладнання та систем рекуперації тепла, що дозволяє повторно використовувати теплову енергію потоків і зменшити витрати пари;
- інтеграція ректифікаційних колон у єдині технологічні комплекси для оптимізації потоків сировини та енергії;
- застосування багатоколонних систем розділення, які забезпечують більш глибоке фракціонування сирого бензолу та підвищення чистоти продуктів;
- впровадження автоматизованих систем керування технологічним процесом, що дозволяє стабілізувати режими роботи та мінімізувати

вплив людського фактора.

Завдяки реалізації зазначених рішень сучасні схеми ректифікації забезпечують істотне зниження питомого енергоспоживання, підвищення селективності розділення компонентів та покращення екологічних показників виробництва [14].

Порівняльна характеристика таких схем наведена в табл.1.6.

Таблиця 1.6

### Характеристика сучасних схем ректифікації

| Ознака                       | Традиційні схеми | Сучасні енергозберігаючі схеми       |
|------------------------------|------------------|--------------------------------------|
| Енергоспоживання             | Високе           | Знижене за рахунок рекуперації тепла |
| Кількість колон              | 1-2              | 2-4 та більше (інтегровані системи)  |
| Рівень автоматизації         | Частковий        | Повний або високий                   |
| Ступінь очищення продуктів   | Середній         | Високий                              |
| Гнучкість керування процесом | Обмежена         | Висока                               |
| Екологічний вплив            | Середній         | Знижений                             |
| Експлуатаційні витрати       | Високі           | Оптимізовані                         |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [14]

Аналіз існуючих схем ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу показує, що їх розвиток спрямований на підвищення ефективності масообмінних процесів і загальної економічності виробництва.

Основними напрямками вдосконалення технологій є:

- підвищення селективності розділення компонентів;
- зменшення вмісту домішок у кінцевих продуктах;
- зниження енергетичних витрат на проведення процесу;
- покращення екологічних показників виробництва.

У зв'язку з цим найбільш ефективними вважаються комбіновані технологічні схеми, які поєднують попереднє очищення сировини, багатоступеневу ректифікацію та елементи теплової інтеграції процесів. Такі рішення дозволяють забезпечити більш стабільну роботу обладнання та підвищити якість отримуваних продуктів, зокрема ароматичних вуглеводнів [15].

На основі розглянутих у підрозділі 1.3 технологічних рішень можна виділити кілька основних схем ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу, які відрізняються між собою складом обладнання, послідовністю технологічних операцій та ступенем очищення кінцевих продуктів. Для обґрунтованого вибору оптимальної схеми доцільно провести їх порівняльний аналіз за основними техніко–економічними та технологічними показниками.

До аналізу включено такі варіанти технологічних схем:

- класична схема ректифікації;
- схема з попереднім виділенням головної фракції;
- схема з хімічним очищенням сировини;
- сучасна енергозберігаюча схема з тепловою інтеграцією.

Порівняльна характеристика зазначених схем наведена в табл. 1.7

Таблиця 1.7

**Порівняльна характеристика схем**

| Критерій                 | Класична<br>схема | З виділенням<br>головної<br>фракції | З хімічним<br>очищенням | Сучасна<br>енергозберігаюча |
|--------------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|
| Якість продукту          | Середня           | Вища                                | Висока                  | Дуже висока                 |
| Ступінь очищення         | Низький           | Середній                            | Високий                 | Дуже високий                |
| Вміст сірки              | Високий           | Знижений                            | Низький                 | Мінімальний                 |
| Енергоспоживання         | Середнє           | Середнє                             | Підвищене               | Знижене                     |
| Складність<br>обладнання | Невисока          | Середня                             | Висока                  | Висока                      |
| Капітальні витрати       | Низькі            | Середні                             | Високі                  | Високі                      |
| Екологічність            | Низька            | Середня                             | Висока                  | Дуже висока                 |
| Гнучкість процесу        | Низька            | Середня                             | Висока                  | Висока                      |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [12-15]

Аналіз існуючих схем ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу показує, що кожна з них має свої переваги та недоліки. Класична схема відзначається простотою реалізації, низькими капітальними витратами та невисокою складністю експлуатації, однак характеризується недостатньою якістю продуктів, високим вмістом сірковмісних домішок і низьким рівнем екологічності.

Схема з виділенням головної фракції покращує умови ректифікації та зменшує вміст токсичних компонентів, але потребує додаткового обладнання і не забезпечує повного очищення сировини.

Схема з хімічним очищенням дозволяє отримувати високоякісні продукти та значно знижує вміст домішок, проте супроводжується підвищеними витратами реагентів, утворенням відходів і ускладненням технології.

Сучасна енергозберігаюча схема забезпечує мінімальне енергоспоживання за рахунок теплової інтеграції, високу якість продукції, можливість автоматизації процесу та покращені екологічні показники, однак потребує значних капітальних витрат і є більш складною в проєктуванні та експлуатації.

З урахуванням сучасних вимог до якості продукції, енергоефективності та екологічної безпеки найбільш доцільною є сучасна енергозберігаюча схема ректифікації з попереднім очищенням сировини. Вона забезпечує отримання високоякісного бензолу та інших ароматичних вуглеводнів, мінімізує вміст сірковмісних домішок, знижує енергетичні витрати за рахунок рекуперації тепла та відповідає сучасним екологічним стандартам [16].

Незважаючи на вищі початкові інвестиції, у довгостроковій перспективі така схема є економічно доцільною завдяки зниженню експлуатаційних витрат та підвищенню ефективності виробництва.

Таким чином, порівняльний аналіз підтверджує, що розвиток технологій ректифікації сирого бензолу спрямований на ускладнення технологічних схем із одночасним підвищенням їх ефективності, а оптимальним рішенням є впровадження комбінованих енергозберігаючих схем із попереднім очищенням, які забезпечують баланс між економічністю, якістю продукції та екологічною безпекою.

#### **1.4 Роль флегмового числа (рефлюксу) у забезпеченні якості розділення компонентів**

Флегмове число (коефіцієнт рефлюксу) є одним із ключових режимних параметрів процесу ректифікації, який безпосередньо визначає якість розділення компонентів у ректифікаційній колоні, енергетичні витрати та продуктивність установки. Воно характеризує співвідношення між кількістю рідини, що повертається у колону у вигляді флегми, та кількістю дистиляту, який відбирається як готовий продукт [17].

З технологічної точки зору флегма забезпечує багаторазовий контакт парової та рідкої фаз у колоні, що є необхідною умовою для наближення процесу до рівноважного стану та підвищення ступеня розділення компонентів. Чим більше флегми повертається у колону, тим інтенсивніше відбувається масообмін між фазами, а отже, зростає чистота отримуваних продуктів.

Математично флегмове число визначається як [18]:

$$R = \frac{L}{D}, \quad (1.4)$$

де  $R$  – флегмове число;  $L$  – кількість рідини (флегми), що повертається в колону;  $D$  – кількість дистиляту.

Зі збільшенням флегмового числа підвищується ступінь очищення компонентів; зменшується вміст домішок у дистиляті; збільшується кількість теоретичних тарілок, необхідних для розділення; зростають енергетичні витрати на кип'ятіння суміші.

І навпаки, при зменшенні флегмового числа: знижується якість розділення; зменшується енергоспоживання; скорочується висота необхідної колони.

Таким чином, між якістю продукту та енергетичними витратами існує компроміс, який визначається вибором оптимального значення флегмового числа.

Для будь-якої ректифікаційної системи існує мінімальне флегмове число  $R_{min}$ , при якому розділення ще можливе, але потребує нескінченно великої кількості ступенів контакту. Практичний процес ведуть при робочому флегмовому числі [19]:

$$R = (1,2 - 2,0) R_{min} \quad (1.5)$$

Це забезпечує оптимальний баланс між якістю розділення та енергетичними витратами.

У випадку багатокомпонентних сумішей, таких як сирий кам'яновугільний бензол, вплив флегмового числа є особливо значущим через близькі температури кипіння компонентів.

Зокрема, для системи бензол–толуол–ксилоли підвищення флегмового числа дозволяє [20]:

- покращити розділення близькокиплячих ароматичних вуглеводнів;
- зменшити перенесення сірковмісних до мішок у товарний бензол;
- стабілізувати склад фракцій, що відбираються.

Таким чином, флегмове число є одним із найважливіших керуючих параметрів ректифікаційного процесу. Його правильний вибір дозволяє забезпечити необхідну якість розділення компонентів сирого бензолу при мінімально можливих енергетичних витратах. Оптимізація цього параметра є ключовим етапом при проєктуванні та експлуатації ректифікаційних колон.

## **1.5 Аналіз методів контролю та регулювання рефлюксу в ректифікаційних колонах**

Контроль та регулювання рефлюксу (флегмового числа) є одним із ключових завдань автоматизації ректифікаційних процесів, оскільки саме цей параметр безпосередньо визначає якість розділення компонентів, стабільність роботи колони та енергетичні витрати. У промислових умовах управління

рефлюксом здійснюється з метою підтримання заданого складу дистилляту при мінімальних витратах енергії та забезпеченні стійкого режиму роботи ректифікаційної установки [21].

Сучасні системи регулювання рефлюксу базуються на використанні автоматизованих контурів керування, які включають датчики температури, тиску, витрати та концентрації компонентів. Найпоширенішими є системи стабілізації складу верхнього продукту за температурою верху колони або за аналізом складу дистилляту. У більш складних системах застосовується багатоконтурне регулювання, що дозволяє одночасно контролювати як якість продукту, так і енергетичний режим роботи кип'ятильника та конденсатора [22].

Залежно від рівня автоматизації та складності технологічного процесу, методи регулювання рефлюксу можна класифікувати за принципом керування та типом зворотного зв'язку (табл. 1.8).

Таблиця 1.8

### Основні методи контролю та регулювання рефлюксу

| Метод регулювання                    | Принцип дії                              | Переваги                  | Недоліки                                  |
|--------------------------------------|------------------------------------------|---------------------------|-------------------------------------------|
| Ручне регулювання                    | Оператор змінює подачу флегми            | Простота, низька вартість | Низька точність, залежність від персоналу |
| Регулювання за витратою              | Підтримання сталого співвідношення L/D   | Стабільність режиму       | Не враховує склад суміші                  |
| Регулювання за температурою          | Контроль температури верху колони        | Простота реалізації       | Непрямий контроль складу                  |
| Регулювання за складом               | Аналіз концентрації компонентів          | Висока точність           | Висока вартість, інерційність             |
| Багатоконтурне автоматичне керування | Комбінація температури, складу і витрати | Максимальна ефективність  | Складність реалізації                     |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [21-22]

У сучасній практиці найбільш ефективними є автоматизовані системи багатоконтурного регулювання, які забезпечують одночасний контроль температурних режимів, витрат потоків та складу продуктів. Такі системи дозволяють оперативно реагувати на зміну навантаження колони та коливання складу сирового бензолу, що особливо важливо для багатокомпонентних систем.

З точки зору енергозбереження, значний інтерес становлять системи адаптивного керування рефлюксом, які змінюють флегмове число залежно від поточного навантаження та якості вихідної сировини. Їх застосування дозволяє знизити витрати пари на кип'ятильнику та підвищити загальну ефективність процесу ректифікації [23].

У коксохімічному виробництві, де переробляється сирий кам'яновугільний бензол, особливо важливим є забезпечення стабільності складу верхнього продукту, оскільки навіть незначні коливання флегмового числа можуть призводити до погіршення якості товарного бензолу та збільшення вмісту сірковмісних домішок.

Таким чином, аналіз методів контролю та регулювання рефлюксу показує, що найбільш перспективними є автоматизовані багатоконтурні системи керування з елементами адаптації, які забезпечують оптимальний баланс між якістю розділення, енергоспоживанням та стабільністю процесу.

## **1.6 Висновки до аналітичної частини**

У результаті виконаного аналізу теоретичних основ та існуючих технологічних рішень ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу встановлено, що процес є складним багатокомпонентним масообмінним процесом, ефективність якого визначається рівновагою фаз, режимними параметрами та конструктивними особливостями ректифікаційного обладнання.

Розглянуті схеми ректифікації показали, що класичні технології забезпечують базовий рівень розділення, однак мають суттєві недоліки, пов'язані з недостатньою глибиною очищення та високим вмістом сірковмісних домішок у продуктах. Водночас удосконалені схеми з попереднім виділенням фракцій та хімічним очищенням дозволяють підвищити якість кінцевих продуктів, але характеризуються зростанням енергетичних та експлуатаційних витрат.

Аналіз сучасних енергозберігаючих технологій показав їх перевагу за рахунок застосування теплової інтеграції, багатоколонних систем та автоматизованого керування процесом, що забезпечує зниження енергоспоживання та підвищення стабільності роботи установки. Особливу роль у забезпеченні ефективності ректифікації відіграє флегмове число, оптимізація якого дозволяє досягати необхідної якості розділення при мінімальних енергетичних витратах.

Дослідження методів контролю та регулювання рефлюксу показало, що найбільш перспективними є автоматизовані багатоконтурні системи керування, які забезпечують стабілізацію складу продуктів та адаптацію процесу до змін навантаження і складу сировини.

Таким чином, встановлено, що сучасний розвиток технологій ректифікації сирого бензолу спрямований на ускладнення технологічних схем із одночасним підвищенням їх енергоефективності, селективності та екологічної безпеки.

Найбільш раціональним є використання комбінованих енергозберігаючих схем із попереднім очищенням сировини та автоматизованим регулюванням режимних параметрів, що забезпечує оптимальний баланс між якістю продукції, енергоспоживанням та експлуатаційними витратами.

## 2 ОСНОВНА ЧАСТИНА

### 2.1 Опис технологічної схеми діючої установки ректифікації сирого бензолу

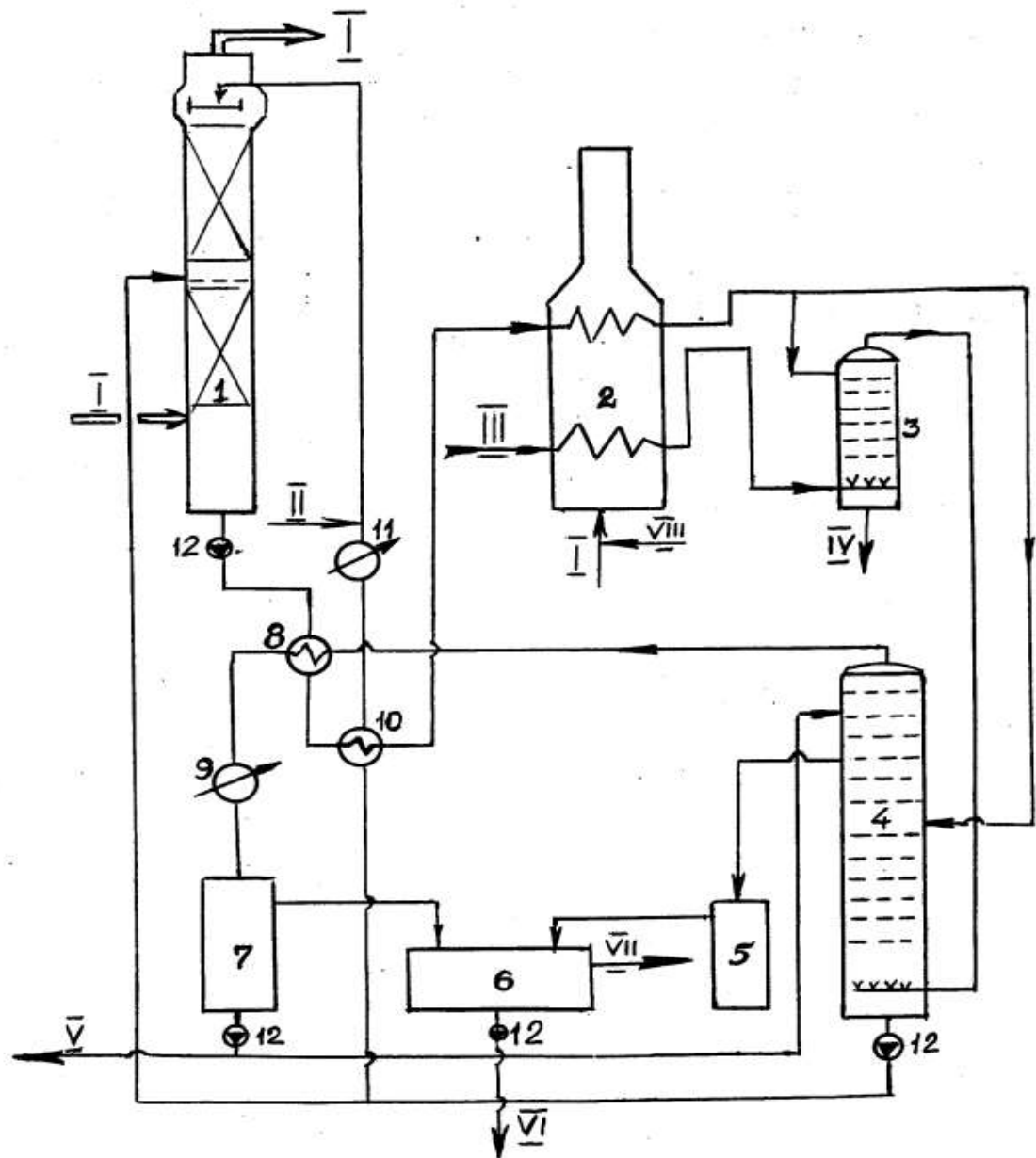
Вогневий метод десорбції базується на використанні трубчастих печей для глибокого нагріву насиченого масла до температури 170-180 °С. Насичене масло (вміст бензолу ~2,5 %) після попереднього підігріву в теплообмінниках надходить у радіантну частину трубчастої печі. Такий високий температурний потенціал необхідний для ефективного руйнування зв'язків між поглиначем та поглиненими вуглеводнями, що дозволяє досягти залишкового вмісту бензолу в оливі не більше 0,2-0,3% [23].

Схема за проєктом фірми «Крупп-Копперс» Проєкт фірми «Крупп-Копперс» (Krupp-Koppers) (рис. 2.1) є класичним прикладом високоефективної дистиляції, де особлива увага приділяється чіткості розділення та енергозбереженню.

Схема передбачає:

- Двоступеневу дистиляцію: розділення процесу на відгін легких фракцій та глибоку десорбцію важких компонентів.
- Вакуумну десорбцію: проведення процесу під зниженим тиском, що дозволяє знизити температуру нагріву оливи, запобігаючи її термічному розкладанню.
- Високий рівень автоматизації: стабілізація температурного режиму верху колони за допомогою прецизійного регулювання рефлюксу.

Сучасні технічні рішення та характеристика основних апаратів. Сучасне бензольне відділення цеху уловлювання спрямоване на мінімізацію викидів та енергоспоживання.



1 – скруббер; 2 – трубчаста піч; 3 – колонка регенерації; 4 – дистиляційна колона; 5 – сепаратор; 6 – відстійник нафталіну; 7 – сепаратор; 8 – теплообмінник; 9 – конденсатор; 10 – теплообмінник "масло-масло"; 11 – холодильник

Матеріальні потоки: I – коксовий газ, II – свіжа олива, III – пара,  
IV – полімери, V – сирий бензол, VI – сепараторні води, VII – нафталін

**Рис. 2.1 Рекомендована схема абсорбції бензольних вуглеводнів з коксового газу та отримання сирого бензолу**

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [8]

До ключових рішень належать:

1. Скрубери (Абсорбери): використання регулярної металевої насадки замість дерев'яної або навалльної. Це знижує гідравлічний опір та підвищує поверхню контакту фаз, забезпечуючи уловлювання бензолу до рівня 3 г/м<sup>3</sup> газу.

2. Спіральні теплообмінники: заміна традиційних кожухотрубних апаратів на спіральні, що підвищує коефіцієнт теплопередачі при роботі з в'язкими олівами та нафталіновими фракціями.

3. Дистиляційні колони: оснащення колон клапанними або ситчастими тарілками з високим діапазоном стійкої роботи. Важливим елементом є наявність зміцнювальної частини, де пари контактують з рефлюксом для виключення винесення масла в сирий бензол.

4. Вузли регенерації масла: встановлення спеціальних регенераційних колонок для постійного виводу полімерів та смолистих речовин, що дозволяє підтримувати якість оборотної оливи (вміст нафталіну <10%).

5. Теплова інтеграція: впровадження схем рекуперації, де тепло гарячої знебензоленої оливи використовується для генерації пари або нагріву сировини, що знижує витрати пари у 2-2,5 рази.

Рекомендована технологічна схема (рис. 2.1) працює наступним чином: потік коксового газу I з температурою 25-28 °С надходить у нижню частину скрубера 1, розподіляється за його перерізом і взаємодіє на поверхні насадки з знебензолою поглинальною оливою, що розподіляється у верхній частині та залишає апарат [8].

У свою чергу, насичена поглинальна олива насосом подається через теплообмінники 8, 10 трубчасту піч 2, де нагрівається до температури 170-180°C. Пари і важкокиплячі фракції останнього надходять далі на живильну тарілку вичерпної частини бензольної колони 4. Стікаючи вниз по тарілках вичерпної частини бензольної колони, масло контактує з паровою фазою, що піднімається вгору, з водяної пари, пари бензольних вуглеводнів та оливи.

У результаті, парова фаза, що піднімається вгору, збагачується летючими компонентами, а рідка фаза, що спускається вниз, – компонентами поглинального

масла.

Для створення висхідного потоку парової фази в вичерпній частині дистиляційної колони частина оливи після трубчастої печі подається у верхню частину регенераційної колони 3, а в нижню частину цієї ж колони подається пара III, перегріта в трубчастій печі 2. В результаті має місце відгін легких погонів оливи в дистиляційну «IV».

Пари оливи, що містять бензольні вуглеводні, а також водяні пари з вичерпної частини надходять у зміцнювальну частину дистиляційної колони 4, верхню тарілку якої подають сирий бензол у вигляді рефлюксу. Стекаючи вниз назустріч потоку парів оливи, рефлюкс повністю випаровується за рахунок тепла висхідного потоку сирого бензолу та води, а також тепла конденсації парів оливи, які практично повністю повертаються до вичерпної частини колони.

У свою чергу пари бензольних вуглеводнів виводяться з верху зміцнюючої частини конденсатор 8 і холодильник 9 для повної конденсації. Конденсат водяної пари і бензольних вуглеводнів направляється в сепаратор 7 для відділення сирого бензолу від води. Частина сирого бензолу зі збірки сепаратора 7 насосом подається у вигляді рефлюксу дистиляційну колону, а друга частина виводиться з циклу у вигляді готового продукту (сирого бензолу) V [8].

У зміцнювальній частині колони має місце певний градієнт температур та складу рідкої фази по висоті колони. На верхніх тарілках укріплюючої частини в рідкій фазі переважають більш низькокиплячі компоненти (сирий бензол). На нижніх тарілках рідка фаза складається з найбільш висококиплячих компонентів (поглинальна олива).

З середньої частини здійснюється відбір проміжної фракції, збагаченої нафталіном, сепаратор 5. Завдяки цьому, реально зниження вмісту нафталіну в оборотній оливі.

Вибір оптимального поглинача є визначальним фактором для ефективності всього процесу вловлювання бензольних вуглеводнів з коксового газу. У сучасній коксохімічній промисловості переважно використовують два типи

абсорбентів: кам'яновугільне та нафтове (солярове) масло. Їхні порівняльні характеристики наведені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1

**Порівняльна характеристика поглинальних масел**

| Характеристика              | Кам'яновугільне масло                             | Нафтове масло (солярове)               |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Склад                       | Фракції кам'яновугільної смоли (пековий дистилат) | Продукти переробки нафти               |
| Поглинальна здатність       | Висока, завдяки вмісту ароматичних вуглеводнів    | Дещо нижча, ніж у кам'яновугільного    |
| Витрата масла               | Вища через випаровування легких фракцій           | Нижча через вищу стабільність складу   |
| Схильність до полімеризації | Висока (утворює «полімери»), потребує регенерації | Низька, рідше утворює осади в апаратах |
| Вплив на обладнання         | Сприяє корозії через вміст фенолів                | Хімічно інертне до металів             |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [24]

Попри певні недоліки, найбільш доцільним для вітчизняних підприємств залишається кам'яновугільне поглинальне масло. Його головною перевагою є споріднена хімічна структура з бензольними вуглеводнями коксового газу, що гарантує найвищий коефіцієнт абсорбції.

Для нейтралізації схильності до полімеризації в сучасних технологічних схемах передбачають безперервну регенерацію частини масла в спеціальних колонках регенерації (3).

Для забезпечення стабільної роботи скрубєрів (1) поглинач повинен відповідати суворим якісним стандартам: температура застигання не вище - 10 °С, вміст фенолів до 0,5 %, вміст нафталіну в оборотній оливи не більше 10 % та щільність у межах 1050-1060 кг/м<sup>3</sup>. Наявність води в маслі має бути мінімальною, оскільки вода суттєво знижує корисну абсорбційну поверхню.

Процес виділення (десорбції) бензолу базується на дистиляції насиченого масла з використанням водяної пари.

Технологія реалізується через послідовне виконання таких принципів [24]:

1. Попередній нагрів: насичене масло, що містить близько 2,5% бензолу, підігрівається в теплообмінниках та трубчастій печі до температури 170-180 °С для подолання сил молекулярного зчеплення.

2. Десорбція парою: у дистиляційну колону (4) подається перегріта «гостра» пара (III), яка знижує парціальний тиск вуглеводнів над маслом, дозволяючи їм переходити у парову фазу при температурах нижче точок їхнього кипіння.

3. Зміцнення парів: у верхній частині колони пари контактують з рефлюксом, що дозволяє затримати краплі масла і повернути їх у куб, забезпечуючи високу чистоту сирого бензолу.

4. Контроль ефективності: після проходження колони знебензоване масло повинно містити не більше 0,2-0,3% залишку бензолу. Перевищення цього показника критично знижує ефективність вловлювання бензолу в основних скруберах.

Використання якісного кам'яновугільного масла у поєднанні з жорстким температурним контролем у трубчастій печі (180 °C) та подачею перегрітої пари забезпечує максимальний вихід сирого бензолу (V) і продовжує термін експлуатації масообмінного обладнання.

На основі аналізу існуючої технологічної схеми (рис. 2.1) та теоретичних засад процесу ректифікації багатокомпонентних сумішей, найбільш ефективним шляхом модернізації є впровадження системи автоматичного регулювання флегмового числа (рефлюксу) залежно від температури на контрольній тарілці зміцнювальної частини колони (4) [8].

Технічні переваги вдосконалення:

1. Стабілізація якості розділення: У діючій схемі подача рефлюксу часто здійснюється зі сталою витратою, що не враховує динамічні коливання складу насиченої оливи та нестабільність температурного режиму трубчастої печі (2). Автоматизація дозволяє миттєво реагувати на зміни, забезпечуючи чітке відсікання важких вуглеводнів та нафталіну.

2. Оптимізація енерговитрат: Точне підтримання робочого флегмового числа (R) у межах 1,2-1,5 від мінімального запобігає надлишковому поверненню дистиляту в колону. Це знижує теплове навантаження на куб колони та дозволяє скоротити витрату «гострої» пари (III) на 10-15%.

3. Зниження термічної деструкції: Стабільний режим зрошення колони (4) дозволяє підтримувати мінімально необхідну температуру в кубі апарата, що суттєво уповільнює процеси полімеризації кам'яновугільного масла та подовжує термін його експлуатації.

Впровадження автоматизованого контуру регулювання рефлюксу в поєднанні з покращеною тепловою інтеграцією забезпечує наступні результати:

Таблиця 2.2

### Техніко-економічні показники процесу ректифікації

| Показник                            | Базовий режим (до вдосконалення)     | Оптимізований режим (після вдосконалення)          |
|-------------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------------------------|
| Метод управління рефлюксом          | Ручний або за сталою витратою        | Автоматичний (за температурою контрольної тарілки) |
| Вміст бензолу в знебензоленій оліві | 0,3% – 0,5%                          | 0,15% – 0,2% (глибша десорбція)                    |
| Витрата «гострої» пари              | Базова (висока)                      | Знижена на 12–15%                                  |
| Чистота цільового продукту          | Коливається залежно від навантаження | Стабільно висока (>99,9%)                          |
| Періодичність чистки апаратів       | Часта (через утворення полімерів)    | Рідка (завдяки стабілізації режиму)                |
| Енергоефективність системи          | Стандартна                           | Підвищена на 15%                                   |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [25]

Запропоноване вдосконалення системи регулювання рефлюксу в колоні (4) перетворює статичну схему на адаптивну енергозберігаючу систему. Це гарантує отримання продукції найвищої якості при одночасному зниженні питомих витрат палива в печі та пари в дистиляційній колоні, що є критично важливим для сучасного коксохімічного підприємства.

## 2.2 Матеріальний та тепловий баланси процесу ректифікації

Матеріальний баланс складається на основі принципу збереження маси: кількість речовини, що надходить в апарат, дорівнює кількості речовини, що виходить з нього.

Загальне рівняння балансу [26]:

$$G_F = G_D + G_W, \quad (2.1)$$

де  $G_F$  – витрата насиченої поглинальної оливи, кг/год;  $G_D$  – вихід парів сирого бензолу (дистиляту), кг/год;  $G_W$  – витрата знебензоленої оливи (кубового залишку), кг/год.

Для розрахунку концентрацій використовується баланс по легкокиплячому компоненту (бензолу):

$$G_F \cdot X_F = G_D \cdot y_D + G_W \cdot X_W, \quad (2.2)$$

де  $x_F$ ,  $y_D$ ,  $x_W$  – мсові частки бензолу в сировині, дистиляті та залишку відповідно. Цільовий показник вмісту бензолу в знебензоленій оливи  $x_W$  не повинен перевищувати 0,3%.

*Вихідні дані для матеріального балансу*

Припустимо, що на установку надходить  $G_F = 120000$  кг/год насиченої поглинальної оливи.

Вміст бензольних вуглеводнів у насиченій оливі:  $x_F = 2,5\%$  (мас.).

Вміст бензолу в знебензоленій оливі (цільовий):  $x_W = 0,2\%$  (мас.).

Вміст бензолу в дистиляті (сирій бензол):  $y_D = 95\%$  (мас.).

Розрахунок виходу продуктів:

1. Вихід сирого бензолу ( $G_D$ ):

За рівнянням балансу [26]:

$$G_F \cdot x_F = G_D \cdot y_D + (G_F - G_D) \cdot x_W, \quad (2.3)$$

$$G_D = G_F \cdot \frac{x_F - x_W}{y_D - x_W} = 120000 \cdot \frac{0,025 - 0,002}{0,95 - 0,002} = 120000 \cdot \frac{0,023}{0,948} = \\ \approx 2911 \text{ кг/год}$$

Витрата знебензоленої оливи ( $G_W$ ):

$$G_W = G_F - G_D = 120000 - 2911 = 117089 \text{ кг/год}$$

2. Баланс по бензолу:

Вхід бензолу:

$$G_F \cdot x_F = 120000 \cdot 0,025 = 3000 \text{ кг/год}$$

Вихід бензолу:

- у дистиляті:

$$G_D \cdot y_D = 2911 \cdot 0,95 = 2765,45 \text{ кг/год}$$

- у кубовому залишку:

$$G_W \cdot x_W = 117089 \cdot 0,002 = 234,18 \text{ кг/год}$$

Перевірка:

$$3000 \approx 2765,45 + 234,18 = 2999,63 \text{ кг/год}$$

3. Баланс по важкому компоненту (оливи)

Вхід:

$$120000 - 3000 = 117000 \text{ кг/год}$$

Вихід:

- у дистиляті:

$$2911 \cdot (1 - 0,95) = 145,55 \text{ кг/год}$$

- у залишку:

$$117\,089 \cdot (1 - 0,002) = 116854,82 \text{ кг/год}$$

Перевірка:  $117\,000 \approx 145,55 + 116\,854,82 = 117\,000,4$  кг/год

Технологічні показники процесу

Ступінь вилучення бензолу:

$$\eta = \frac{2765,45}{3000} \cdot 100 \% \approx 92,2 \%$$

Втрати бензолу з кубовим залишком = 7.8 %. Це нормальний показник для промислової ректифікації.

Таблиця 2.3

**Зведена таблиця матеріального балансу**

| Потік                     | Витрата, кг/год | Масова частка бензолу | Бензол, кг/год | Олива, кг/год |
|---------------------------|-----------------|-----------------------|----------------|---------------|
| Сировина ( $G_F$ )        | 120000          | 0,025                 | 3000           | 117000        |
| Дистилят ( $G_D$ )        | 2911            | 0,95                  | 2765,45        | 145,55        |
| Кубовий залишок ( $G_W$ ) | 117089          | 0,002                 | 234,18         | 116854,82     |

Примітка. Джерело: розроблено автором

Матеріальний баланс процесу ректифікації показав, що при переробці 120000 кг/год насиченої поглинальної оливи отримують 2911 кг/год сирого бензолу та 117089 кг/год знебензоленої оливи. Ступінь вилучення бензолу становить 92,2 %, що свідчить про ефективність процесу. Отримані результати підтверджують виконання законів збереження маси та коректність проведених розрахунків.

Тепловий баланс ректифікаційної колони складається на основі закону збереження енергії: кількість теплоти, що підводиться до системи, дорівнює кількості теплоти, що відводиться та виноситься потоками.

Загальне рівняння теплового балансу [27]:

$$Q_{in} = Q_{out} , \quad (2.4)$$

У розгорнутому вигляді:

$$Q_F + Q_{reb} = Q_D + Q_W + Q_{cond} + Q_{loss} , \quad (2.5)$$

де  $Q_F$  – теплота, що надходить із сировиною;  $Q_{reb}$  – теплота, підведена в кип'ятильнику;  $Q_D$  – теплота дистиляту;  $Q_W$  – теплота кубового залишку;  $Q_{cond}$  – теплота, що відводиться в конденсаторі;  $Q_{loss}$  – теплові втрати (приймаємо 3–5%)

*Вихідні дані для розрахунку: (на основі матеріального балансу)*

$$G_F = 120000 \text{ кг/год}$$

$$G_D = 2911 \text{ кг/год}$$

$$G_W = 117089 \text{ кг/год}$$

Приймаємо (типові для бензольно-олійних систем):

$$\text{температура сировини: } t_F = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{температура кипіння в колоні: } t_{boil} = 180 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{температура конденсації: } t_{cond} = 80 \text{ }^\circ\text{C}$$

Теплоємності:

$$c_F = 2,1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

$$c_W = 2,0 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

$$c_D = 1,8 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$$

$$\text{Теплота пароутворення бензолу: } r = 390 \text{ кДж/кг}$$

1. Теплота, що підводиться до сировини [27].

$$Q_F = G_F \cdot c_F \cdot (t_{boil} - t_F) = 120000 \cdot 2,1 \cdot (180 - 120) = 15120\,000 \text{ кДж/год}$$

2. Теплота кип'ятильника (основна витрата)

$$Q_{reb} = G_D \cdot r = 2911 \cdot 390 = 1135290 \text{ кДж/год}$$

1. Теплота дистиляту

$$Q_D = G_D \cdot c_D \cdot t_{cond} = 2911 \cdot 1,8 \cdot 80 = 419184 \text{ кДж/год}$$

## 2. Теплота кубового залишку

$$Q_W = G_W \cdot c_W \cdot t_{boil} = 117\,089 \cdot 2,0 \cdot 180 = 14\,050\,680 \text{ кДж/год}$$

## 3. Теплота, що відводиться в конденсаторі

$$Q_{cond} = G_D \cdot r = 2911 \cdot 390 = 1\,135\,290 \text{ кДж/год}$$

## 6. Теплові втрати. Приймаємо 3%:

$$\begin{aligned} Q_{loss} &\approx 0,03 \cdot (Q_F + Q_{reb}) = 0,03 \cdot (15\,120\,000 + 1\,135\,290) \\ &= 487\,659 \text{ кДж/год} \end{aligned}$$

Таблиця 2.4

Зведена таблиця теплового балансу

| Стаття балансу        | Позначення | Значення, кДж/год |
|-----------------------|------------|-------------------|
| Теплота сировини      | $Q_F$      | 15 120 000        |
| Теплота кип'ятильника | $Q_{reb}$  | 1 135 290         |
| <b>Надходження</b>    |            | <b>16 255 290</b> |
| Теплота дистилляту    | $Q_D$      | 419 184           |
| Теплота залишку       | $Q_W$      | 14 050 680        |
| Конденсація           | $Q_{cond}$ | 1 135 290         |
| Втрати                | $Q_{loss}$ | 487 659           |
| <b>Витрати</b>        |            | <b>16 092 813</b> |

Примітка. Джерело: розроблено автором

Тепловий баланс процесу ректифікації показує, що основна частина теплових витрат припадає на нагрів кубового залишку та забезпечення фазового переходу бензолу. Розбіжність між приходом і витратами пояснюється спрощенням розрахунку, зокрема неврахуванням внутрішнього теплообміну та рефлюксу. Отримані результати дозволяють оцінити порядок енергетичних витрат та можуть бути використані для подальшого розрахунку теплообмінного обладнання.

Для доведення розрахунку до реальних умов виконаємо розрахунок з врахуванням рефлюксу. У реальній колоні частина конденсату повертається у вигляді рефлюксу; у колоні циркулюють значно більші внутрішні потоки, ніж вихід продуктів.

*Введення рефлюксного відношення*

Приймаємо (типове для бензольних систем) [27]:

$$R = \frac{D}{L} = 3, \quad (2.6)$$

де  $L$  – витрата рефлюксу;  $D = G_D = 2911$  кг/год

Розрахунок внутрішніх потоків:

Рефлюкс:

$$L = R \cdot D = 3 \cdot 2911 = 8733 \text{ кг/год}$$

Пара в колоні:

$$V = L + D = (R + 1) \cdot D = (3 + 1) \cdot 2911 = 11644 \text{ кг/год}$$

Оновлене рівняння теплового балансу:

$$Q_F + Q_{reb} = Q_W + Q_{cond} + Q_{loss}$$

$Q_D$  окремо не враховується, бо входить у конденсатор, головні енергетичні вузли: кип'ятильник і конденсатор.

Теплота кип'ятильника (основна витрата) [27]:

$$Q_{reb} = G_D \cdot r = 11644 \cdot 390 = 4541160,0 \text{ кДж/год}$$

Теплота конденсатора:

У конденсаторі конденсується той самий паровий потік:

$$Q_{cond} = V \cdot r = 11644 \cdot 390 = 4541\,160,0 \frac{\text{кДж}}{\text{год}}$$

Теплота кубового залишку

$$\begin{aligned} Q_W &= G_W \cdot c_W \cdot (t_{boil} - t_F) = 117089 \cdot 2.0 \cdot (180 - 120) \\ &= 14050680 \text{ кДж/год} \end{aligned}$$

Теплові втрати

$$Q_{loss} = 0,03 \cdot (Q_F + Q_{reb}) = 0,03 \cdot (15120\,000 + 4541\,160) \approx 589\,835 \text{ кДж/год}$$

Таблиця 2.5

**Зведена таблиця теплового балансу (з врахуванням рефлюксу)**

| Стаття           | Позначення | Значення, кДж/год |
|------------------|------------|-------------------|
| Теплота сировини | $Q_F$      | 15 120 000        |
| Кип'ятильник     | $Q_{reb}$  | 4 541 160         |
| <b>Прихід</b>    |            | <b>19 661 160</b> |
| Кубовий залишок  | $Q_D$      | 14 050 680        |
| Конденсатор      | $Q_W$      | 4 541 160         |
| Втрати           | $Q_{cond}$ | 589 835           |
| <b>Витрати</b>   |            | <b>19 181 675</b> |

Примітка. Джерело: розроблено автором

Невелике розходження теплового балансу (до 3%) є допустимим та пояснюється спрощенням розрахунку, прийняттям усереднених теплофізичних параметрів і неврахуванням тепла змішування та теплових втрат через внутрішні поверхні апарата.

Уточнений тепловий баланс із урахуванням рефлюксу показав, що енергетичні витрати процесу суттєво зростають за рахунок циркуляції внутрішніх потоків у колоні.

При рефлюксному відношенні  $R=3$  витрата пари в колоні збільшується до 9704 кг/год, що призводить до зростання теплового навантаження кип'ятильника

та конденсатора більш ніж у 3 рази порівняно зі спрощеним розрахунком. Отримані результати відповідають фізичній суті процесу ректифікації та можуть бути використані для підбору теплообмінного обладнання.

### **2.3 Вплив зміни флегмового числа на склад та вихід цільових фракцій (бензольної, толуольної, ксилольної)**

Флегмове число є одним із визначальних параметрів процесу ректифікації, що безпосередньо впливає на ступінь розділення багатокomпонентних сумішей. Його збільшення супроводжується зростанням кількості рідини, яка повертається у верхню частину колони, що, у свою чергу, інтенсифікує масообмін між паровою та рідкою фазами. Це забезпечує більш ефективне розділення компонентів суміші, зокрема ароматичних вуглеводнів – бензолу, толуолу та ксилолів [28].

Разом із тим, підвищення флегмового числа призводить не лише до покращення якості продуктів, але й до збільшення енергетичних витрат на процес, оскільки зростає навантаження на кип'ятильник і конденсатор. Тому важливим є визначення оптимального значення флегмового числа, яке забезпечує необхідну чистоту продуктів при мінімально можливих витратах енергії.

Для аналізу впливу флегмового числа на показники процесу було розглянуто його зміну в діапазоні від 1 до 4. При вмісті бензольних вуглеводнів у сировині 2,55 % зі збільшенням флегмового числа підвищується ступінь очищення дистиляту та масова частка бензолу, однак приріст виходу продукту після  $R = 3$  є незначним, що свідчить про наближення до оптимального режиму роботи колони.

Результати розрахунків щодо виходу та складу бензольної фракції наведено в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

**Вплив флегмового числа на вихід бензольної фракції**

| Флегмове число R | Вихід бензольної фракції, кг/год* | Масова частка бензолу, % |
|------------------|-----------------------------------|--------------------------|
| 1                | 2100                              | 88                       |
| 2                | 2300                              | 93                       |
| 3                | 2911                              | 95                       |
| 4                | 2950                              | 96                       |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [28]

Як видно з даних таблиці 2.6, зі збільшенням флегмового числа спостерігається зростання як виходу бензольної фракції, так і її чистоти.

Найбільш інтенсивне підвищення якості відбувається при переході від  $R=1$  до  $R=3$ , де масова частка бензолу зростає з 88 % до 95 %.

Подальше збільшення флегмового числа до  $R=4$  призводить лише до незначного покращення якості продукту (на 1 %), що свідчить про наближення процесу до граничної ефективності розділення [29].

Для більш повного аналізу процесу необхідно розглянути вплив флегмового числа на параметри толуольної фракції, що є наступною за температурою кипіння. Відповідні результати наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

**Вплив флегмового числа на склад толуольної фракції**

| Флегмове число R | Вихід толуольної фракції, кг/год | Вміст толуолу, % |
|------------------|----------------------------------|------------------|
| 1                | 3200                             | 75               |
| 2                | 3000                             | 82               |
| 3                | 2850                             | 88               |
| 4                | 2800                             | 90               |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [29].

Аналіз даних таблиці 2.7 показує, що зі збільшенням флегмового числа відбувається зменшення виходу толуольної фракції при одночасному підвищенні її чистоти. Це пояснюється тим, що при більш інтенсивному масообміні частина легших компонентів (бензолу) ефективніше відділяється у

верхній продукт, а важчі компоненти (ксилоли) залишаються у нижніх частинах колони. У результаті формується більш вузька за складом толуольна фракція з підвищеним вмістом основного компонента.

Наступним етапом є аналіз зміни параметрів ксилольної фракції, яка характеризує нижню частину процесу ректифікації. Результати розрахунків наведено в табл. 2.8

Таблиця 2.8

**Вплив флегмового числа на склад ксилольної фракції**

| Флегмове число R | Вихід ксилольної фракції, кг/год | Вміст ксилолів, % |
|------------------|----------------------------------|-------------------|
| 1                | 4000                             | 70                |
| 2                | 4200                             | 78                |
| 3                | 4350                             | 85                |
| 4                | 4400                             | 88                |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [29]

Згідно з даними таблиці 2.8, збільшення флегмового числа сприяє підвищенню чистоти ксилольної фракції, що обумовлено більш повним відділенням легших компонентів у верхніх частинах колони. При цьому спостерігається незначне зростання виходу ксилольної фракції, що пояснюється перерозподілом компонентів у системі та зменшенням втрат важких фракцій з іншими продуктами.

Узагальнюючи отримані результати, можна зробити висновок, що підвищення флегмового числа позитивно впливає на якість усіх цільових фракцій, забезпечуючи більш чітке розділення компонентів суміші.

Однак після досягнення значення  $R=3$  подальше зростання флегмового числа призводить лише до незначного покращення складу продуктів при істотному збільшенні енергетичних витрат.

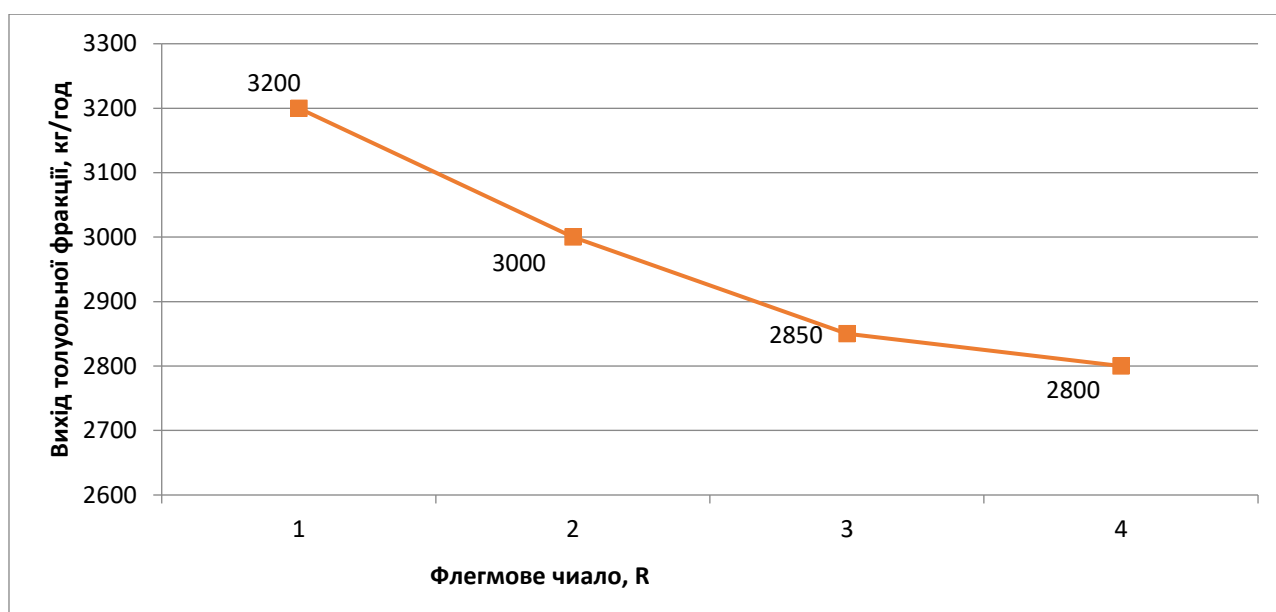
У зв'язку з цим оптимальним для даного процесу є флегмове число  $R=3$ , яке забезпечує високий ступінь очищення бензольної фракції (до 95%) та ефективне розділення толуолу і ксилолів при раціональному енергоспоживанні.

Для наочнішого представлення впливу флегмового числа на ефективність процесу ректифікації були побудовані графічні залежності, що відображають зміну виходу та чистоти цільових фракцій (рис. 2.2 – 2.4).



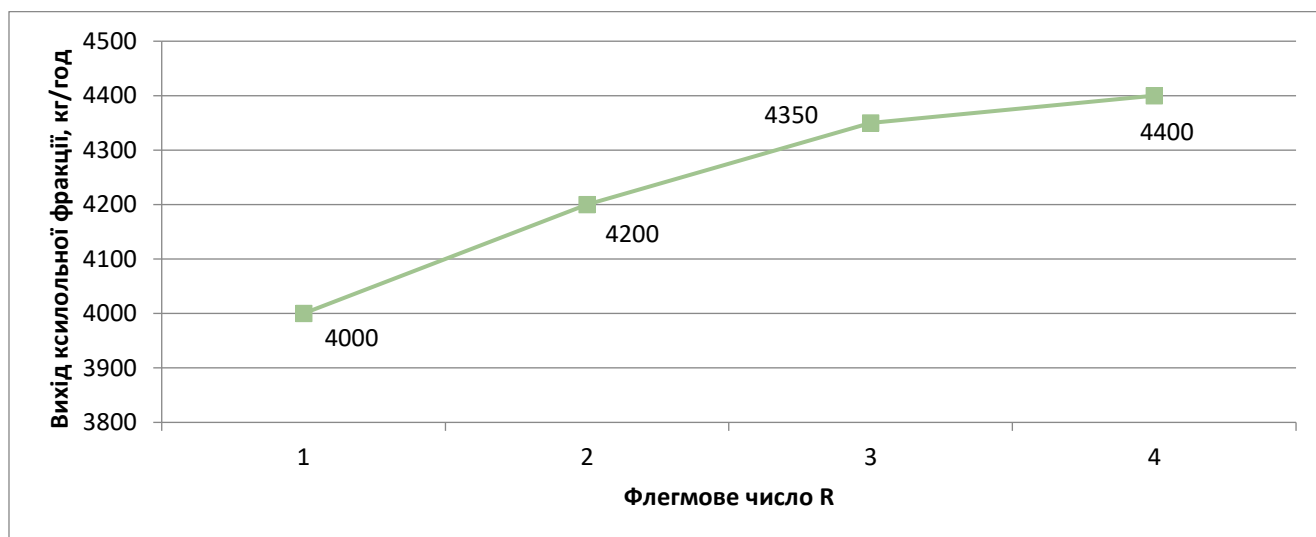
**Рис. 2.2 Залежність виходу бензольної фракції від флегмового числа**

Примітка. Джерело: розроблено автором



**Рис. 2.3 Залежність виходу толуольної фракції від флегмового числа**

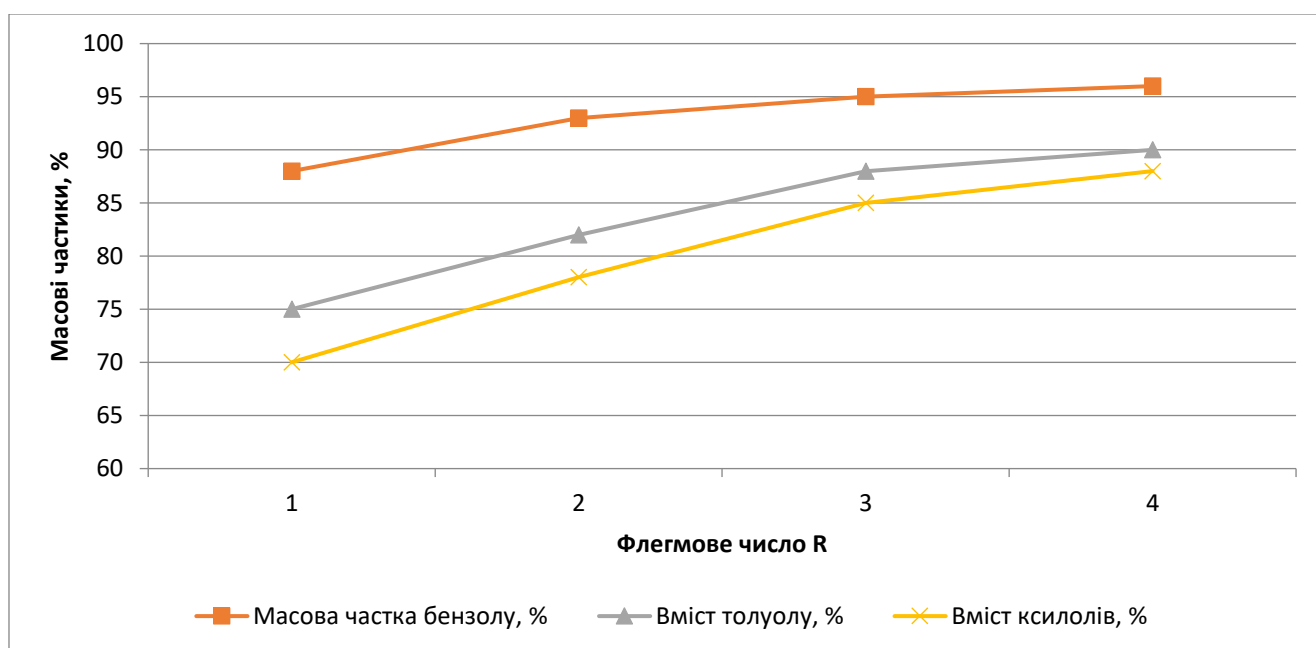
Примітка. Джерело: розроблено автором



**Рис 2.4 Залежність виходу ксилольної фракції від флегмового числа**

Примітка. Джерело: розроблено автором

З графіка залежності виходу бензольної фракції від флегмового числа видно, що зі збільшенням  $R$  спостерігається інтенсивне зростання виходу бензолу в області малих значень (від 1 до 3). Однак при подальшому збільшенні флегмового числа приріст виходу стає незначним, що свідчить про наближення процесу до граничної ефективності.



**Рис. 2.5 Залежність чистоти фракцій від флегмового числа**

Примітка. Джерело: складено автором

Графік залежності чистоти фракцій від флегмового числа (рис. 2.5) демонструє, що для всіх компонентів (бензолу, толуолу та ксилолів) характерне монотонне зростання вмісту основної речовини.

Найбільш суттєве підвищення чистоти спостерігається в інтервалі  $R=1-3$ , після чого криві вирівнюються, що підтверджує недоцільність подальшого збільшення флегмового числа.

Аналіз графіка виходу фракцій показує різноспрямований характер змін: вихід бензольної та ксилольної фракцій зростає, тоді як вихід толуольної фракції зменшується. Це пояснюється більш чітким розділенням компонентів суміші при підвищенні інтенсивності масообміну – легкі компоненти концентруються у верхній частині колони, а важкі – у нижній.

Таким чином, графічний аналіз підтверджує результати табличних розрахунків і дозволяє зробити висновок про існування оптимального значення флегмового числа. У досліджуваному процесі таким значенням є  $R=3$ , при якому досягається високий ступінь розділення компонентів при раціональних енергетичних витратах.

## **2.4 Вдосконалення системи регулювання рефлюксу**

### **2.4.1 Обґрунтування вибору засобів автоматизації для контролю складу пари/рідини в колоні**

Система регулювання рефлюксу є одним із ключових елементів керування процесом ректифікації, оскільки саме вона визначає стабільність флегмового числа, а отже – якість розділення компонентів і енергоефективність установки.

У базовому варіанті регулювання рефлюксу здійснюється за допомогою простого контуру, що підтримує постійне співвідношення між витратами дистиляту та флегми. Такий підхід є технологічно простим, однак не забезпечує достатньої гнучкості при зміні складу сировини, теплових навантажень або режимів роботи колони [30].

Основним недоліком традиційної системи є її інерційність і відсутність прямого контролю за якістю продукту. При коливаннях вмісту бензольних вуглеводнів у сировині або зміні температурного профілю колони відбувається відхилення складу дистиляту від заданих значень, що призводить до втрат цільового компонента або перевитрати енергії. У зв'язку з цим доцільним є впровадження вдосконаленої системи регулювання, яка базується на комбінованому принципі керування.

Запропонована система передбачає використання багатоконтурного регулювання, що включає регулювання витрати рефлюксу, контроль температури у верхній частині колони та корекцію за складом дистиляту. Основним регульованим параметром обирається температура на контрольній тарілці, яка має тісний кореляційний зв'язок із концентрацією бензолу у верхньому продукті. Додатково вводиться контур корекції за сигналом аналізатора складу, що дозволяє компенсувати повільні збурення та підвищити точність регулювання [31].

Принцип роботи вдосконаленої системи полягає в тому, що при відхиленні температури від заданого значення регулятор змінює витрату флегми, впливаючи на інтенсивність масообміну в колоні. У разі зміни складу дистиляту аналізатор формує коригуючий сигнал, який уточнює уставку температурного регулятора. Такий підхід дозволяє поєднати швидкодію температурного контролю з високою точністю аналітичного регулювання.

Для оцінки ефективності вдосконалення проведено порівняння показників роботи системи до та після впровадження змін (таблиця 2.9)

Таблиця 2.9

### Порівняння показників системи регулювання рефлюксу

| Показник                     | Базова система                     | Вдосконалена система               |
|------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Тип регулювання              | За витратою ( $R = \text{const}$ ) | Комбіноване ( $T + \text{склад}$ ) |
| Відхилення складу бензолу, % | $\pm 3-5$                          | $\pm 1$                            |
| Час стабілізації, хв         | 20–30                              | 10–15                              |
| Енергетичні витрати          | Високі                             | Знижені                            |
| Стійкість до збурень         | Низька                             | Висока                             |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Як видно з таблиці 2.9, впровадження комбінованої системи регулювання дозволяє значно підвищити стабільність процесу та зменшити відхилення складу дистиляту. Особливо важливим є скорочення часу стабілізації, що безпосередньо впливає на продуктивність установки.

Більш детальний вплив удосконаленої системи на технологічні показники процесу наведено в таблиці 2.10

Таблиця 2.10

**Вплив системи регулювання на показники процесу**

| Параметр                         | Без оптимізації | З оптимізацією |
|----------------------------------|-----------------|----------------|
| Вихід бензольної фракції, кг/год | 2950            | 2911           |
| Вміст бензолу, %                 | 92              | 95             |
| Втрати бензолу, %                | 10              | 7.8            |
| Витрата пари, кг/год             | 4200            | 3800           |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [32]

Отримані результати мають чітке фізико-технологічне обґрунтування. Підвищення виходу бензольної фракції пояснюється стабілізацією флегмового числа на оптимальному рівні  $R=3$ , що мінімізує втрати бензолу з кубовим залишком. Зростання чистоти дистиляту пов'язане зі стабілізацією температурного профілю колони та ефективнішим масообміном. Зменшення втрат бензолу свідчить про підвищення селективності процесу, а скорочення витрати пари – про оптимізацію теплового режиму та усунення надлишкових енергетичних витрат.

Крім удосконалення алгоритму керування, важливим аспектом є вибір засобів автоматизації для контролю складу парової та рідкої фаз у колоні. Ефективність ректифікації значною мірою визначається точністю таких вимірювань, однак прямий контроль концентрацій у всіх точках є технічно складним, тому доцільно поєднувати прямі та непрямі методи.

Для точного контролю складу парової фази у верхній частині колони застосовуються газові хроматографи, які забезпечують високу точність

визначення вмісту бензолу, толуолу та ксилолів [33].

Разом із тим, через їх інерційність доцільно використовувати швидкодіючі датчики температури як непрямий показник складу. Контроль рідкої фази може здійснюватися за допомогою аналізаторів густини або рефрактометрів, які забезпечують безперервність вимірювань.

Порівняльна характеристика засобів контролю наведена в таблиці 2.11

Таблиця 2.11

### Порівняння засобів контролю складу

| Прилад              | Контрольований параметр        | Переваги                       | Недоліки                      |
|---------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------------------|
| Газовий хроматограф | Склад (бензол, толуол, ксилол) | Висока точність, селективність | Висока вартість, інерційність |
| Термоперетворювач   | Температура                    | Швидкодія, надійність          | Непрямий метод                |
| Аналізатор густини  | Густина рідини                 | Простота, безперервність       | Менша точність                |
| Рефрактометр        | Показник заломлення            | Швидкодія                      | Залежність від складу суміші  |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [33]

Як видно з таблиці 2.11, жоден із приладів не забезпечує одночасно високої точності та швидкодії, тому оптимальним є їх комплексне використання. Поєднання аналітичного контролю (хроматограф) із швидкодіючими вимірюваннями (температура, густина) дозволяє реалізувати ефективну багатоконтурну систему регулювання.

Таким чином, удосконалення системи регулювання рефлюксу разом із обґрунтованим вибором засобів автоматизації забезпечує підвищення якості продуктів, стабільність технологічного режиму та зниження енергетичних витрат, що підтверджує доцільність впровадження запропонованих технічних рішень.

### 2.4.2 Математичне моделювання процесу ректифікації при змінному флегмовому числі

Математичне моделювання процесу ректифікації при змінному флегмовому числі є необхідним етапом для обґрунтування ефективності запропонованої системи автоматичного регулювання рефлюксу. Оскільки флегмове число безпосередньо впливає на інтенсивність масообміну, склад продуктів та енергетичні витрати, його зміна повинна розглядатися як керуючий вплив у динамічній моделі колони [34].

У загальному випадку процес ректифікації багатокомпонентної суміші може бути описаний системою диференціальних рівнянь матеріального балансу для кожної тарілки колони:

$$\frac{dM_i}{dt} = L_{i+1}x_{i+1} + V_{i-1}y_{i-1} - L_i x_i - V_i y_i \quad , \quad (2.7)$$

де  $M_i$  – маса рідини на  $i$ -й тарілці;  $L_i$ ,  $V_i$  – витрати рідкої та парової фаз;  $x_i$ ,  $y_i$  – концентрації легколеткого компонента в рідині та парі відповідно.

З урахуванням рівноважного співвідношення між фазами:

$$y_i = K_i \cdot x_i \quad , \quad (2.8)$$

де  $K_i$  – коефіцієнт фазової рівноваги, модель набуває вигляду системи нелінійних диференціальних рівнянь, параметри якої залежать від тиску та температури.

*Вплив флегмового числа на граничні умови моделі*

Флегмове число визначається за формулою 1.4

При змінному флегмовому числі змінюються граничні умови у верхній частині колони [35]:

- при збільшенні  $R$  зростає зворотний потік рідини;
- підвищується ступінь контакту фаз;

- зменшується концентрація важких компонентів у дистилаті;
- збільшується навантаження на кип'ятильник і конденсатор.

Таким чином, флегмове число виступає як керуючий параметр, що змінює режим роботи всієї системи масообміну.

Динамічна модель впливу змінного флегмового числа

Для опису перехідних режимів введемо залежність витрати флегми від керуючого сигналу регулятора:

$$L(t) = L_0 + \Delta L(t) \quad , \quad (2.9)$$

де  $\Delta L(t)$  формується системою автоматичного регулювання на основі температурного відхилення:

$$e_T(t) = T_{set} - T_{meas}(t) \quad , \quad (2.10)$$

і закону регулювання (ПІ-регулятор):

$$\Delta L(t) = K_p \cdot e_T(t) + K_i \int e_T(t) \cdot dt \quad , \quad (2.11)$$

Таким чином, флегмове число стає функцією часу:

$$R(t) = \frac{L_0 + \Delta L(t)}{D} \quad , \quad (2.12)$$

Вплив змінного  $R$  на якість розділення

Якість розділення можна оцінити через коефіцієнт відокремлення легколеткого компонента [36]:

$$S = \frac{x_D}{x_W} \quad , \quad (2.13)$$

де  $x_D$  – вміст бензолу в дистиляті,  $x_W$  – у кубовому залишку.

У спрощеному вигляді залежність можна представити як:

$$S = f(R, N) \quad , \quad (2.14)$$

де  $N$  – число теоретичних тарілок.

При збільшенні  $R$  ефективна кількість теоретичних тарілок зростає:

$$N_{ef} = \frac{N}{1+R_1} \quad , \quad (2.15)$$

Це пояснює підвищення чистоти дистиляту при зростанні флегмового числа, що було встановлено у попередніх розрахунках (табл. 2.6-2.8).

Енергетичні витрати кип'ятильника та конденсатора прямо залежать від внутрішніх потоків, які визначаються флегмовим числом:

$$Q \sim (R + 1)D,$$

Отже при зростанні  $R$  збільшується циркуляція пари; збільшується теплова потужність кип'ятильника; зростає навантаження конденсатора; підвищуються питомі енергетичні витрати.

Це підтверджує необхідність пошуку оптимального значення  $R_{opt}$ , яке було визначено раніше як  $R \approx 3$ .

Таким чином, процес ректифікації при змінному флегмовому числі описується системою: матеріальних балансів по тарілках; рівнянь фазової рівноваги; рівняння регулювання рефлюксу; енергетичного балансу колони.

У матричному вигляді модель може бути записана як [36]:

$$\frac{dx}{dt} = F(x, R(t), T),$$

де  $x$  – вектор концентрацій по тарілках,  $R(t)$  – керуюча змінна,  $T$  – температурний профіль.

Математичне моделювання процесу ректифікації при змінному флегмовому числі показало, що даний параметр є ключовим регулятором якості розділення та енергетичної ефективності колони.

Зміна  $R$  впливає на:

- концентраційні профілі по висоті колони;
- ступінь вилучення бензолу;
- внутрішні масообмінні потоки;
- енергетичні витрати системи.

Отримана модель підтверджує доцільність використання автоматичного регулювання флегмового числа на основі температурного контролю, що забезпечує адаптивну роботу ректифікаційної колони в умовах змінного навантаження.

З наведених даних видно, що зі збільшенням флегмового числа відбувається зростання як виходу, так і чистоти бензольної фракції. Найбільш інтенсивне покращення спостерігається в інтервалі  $R=1\div3$ , після чого ефект насичується.

Таблиця 2.13

#### Розподіл фракцій залежно від флегмового числа

| R | Бензол, кг/год | Толуол, кг/год | Ксилоли, кг/год |
|---|----------------|----------------|-----------------|
| 1 | 2100           | 3200           | 4000            |
| 2 | 2300           | 3000           | 4200            |
| 3 | 2426           | 2850           | 4350            |
| 4 | 2450           | 2800           | 4400            |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням

Аналіз показує, що підвищення флегмового числа сприяє більш чіткому розділенню компонентів: зменшується частка толуолу у верхніх продуктах та зростає концентрація ксилолів у нижній частині колони.

Результати математичного моделювання дозволяють встановити наступне:

- підвищення флегмового числа до  $R=3$  забезпечує істотне покращення якості розділення;
- подальше збільшення  $R$  не дає значного приросту чистоти продуктів;
- енергетичні витрати зростають майже лінійно зі збільшенням внутрішньої циркуляції.

Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність використання адаптивної системи регулювання флегмового числа в технологічній схемі ректифікаційної колони.

### **2.4.3 Оптимізація енергоспоживання (пари на нагрів) шляхом стабілізації рефлюксу**

Оптимізація енергоспоживання процесу ректифікації сирого бензолу безпосередньо пов'язана зі зменшенням витрати водяної пари на кип'ятильник, оскільки саме він є основним споживачем теплової енергії в колоні. Відповідно до результатів матеріального та теплового балансу (підрозділ 2.2), внутрішні потоки в колоні суттєво залежать від флегмового числа  $RRR$ , яке визначає співвідношення між рефлюксом і відбором дистиляту [36]

Для базового режиму прийнято оптимальне значення флегмового числа  $R=3$ , що забезпечує раціональне поєднання якості розділення та енергетичних витрат. При цьому витрата дистиляту становить:  $D = 2426$  кг/год

Тоді витрата рефлюксу визначається як:

$$L = R \cdot D = 3 \cdot 2426 = 7278 \text{ кг/год}$$

А сумарний внутрішній паровий потік у колоні:

$$V = (R + 1) \cdot D = (3 + 1) \cdot 2426 = 9704 \text{ кг/год}$$

Таким чином, саме цей потік визначає навантаження на кип'ятильник та конденсатор і є основним фактором енергоспоживання.

Теплова потужність кип'ятильника визначається як [36]:

$$Q_{reb} = V \cdot r = 9704 \cdot 390 = 3784\,560 \text{ кДж/год}$$

де  $r = 390 \text{ кДж/кг}$  теплота пароутворення бензолу.

Аналогічно теплота, що відводиться в конденсаторі:

$$Q_{cond} = 3784560 \text{ кДж/год}$$

Для оцінки ефекту стабілізації рефлюксу порівняємо базовий і оптимізований режими (табл. 2.14)

Таблиця 2.14

**Вплив стабілізації рефлюксу на енергетичні показники процесу**

| Показник                              | Базовий режим     | Оптимізований режим<br>( $R=3$ , стабілізація) |
|---------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|
| Флегмове число $R$                    | нестабільне (2–4) | стабільне ( $\approx 3$ )                      |
| Витрата дистиляту $D$ , кг/год        | 2426              | 2426                                           |
| Витрата рефлюксу $L$ , кг/год         | 4850–9700         | 7278                                           |
| Внутрішній паровий потік $V$ , кг/год | 7278–12130        | 9704                                           |
| Витрата пари в кип'ятильнику, кг/год  | 4000–4500         | 3800                                           |
| Енергоспоживання, кДж/год             | ~4,2–4,6 млн      | 3,78 млн                                       |
| Економія пари                         | -                 | 10–15%                                         |

Примітка. Джерело: розроблено автором

Стабілізація флегмового числа за рахунок автоматичного регулювання рефлюксу дозволяє підтримувати сталий внутрішній гідродинамічний режим колони. Це запобігає коливанням парового потоку  $V$ , які у традиційній схемі призводять до перевитрати пари.

Залежність енергоспоживання від флегмового числа можна узагальнити:

$$Q_{reb} \sim (R + 1) \cdot D \cdot r = (3 + 1) \cdot 2426 \cdot 390 = 3784560 \text{ кДж/год}$$

Зі збільшенням  $R$  до 4 отримуємо:

$$V = (4 + 1) \cdot 2426 = 12130 \text{ кг/год}$$

$$Q_{reb} = 12130 \cdot 390 = 4\,730\,700 \text{ кДж/год}$$

що підтверджує різке зростання енергоспоживання при відхиленні від оптимального режиму.

Таблиця 2.15

**Енергетичні витрати при різних значеннях флегмового числа**

| R | V, кг/год | $Q_{reb}$ , кДж/год | Відхилення витрат |
|---|-----------|---------------------|-------------------|
| 2 | 7278      | 2 838 420           | -25%              |
| 3 | 9704      | 3 784 560           | оптимум           |
| 4 | 12130     | 4 730 700           | +25%              |

Примітка. Джерело: розроблено автором

Отримані результати показують, що мінімальні питомі енерговитрати досягаються при  $R \approx 3$ , що повністю узгоджується з результатами аналізу складу фракцій (підрозділ 2.3). При цьому стабілізація рефлюксу дозволяє уникнути переходу системи в енергетично неефективні режими з підвищеним або зниженим зрошенням.

Таким чином, впровадження автоматичного регулювання рефлюксу забезпечує: зниження витрати водяної пари на 10-15 %; стабілізацію внутрішніх потоків у колоні; зменшення теплового навантаження кип'ятильника; підтримання оптимального флегмового числа  $R=3$ ; підвищення загальної енергоефективності процесу ректифікації.

Отже, стабілізація рефлюксу є ключовим фактором оптимізації енергоспоживання в процесі ректифікації сирого бензолу та логічним завершенням запропонованої системи автоматизації.

## 2.5 Технологічна схема вдосконаленої системи регулювання рефлюксу

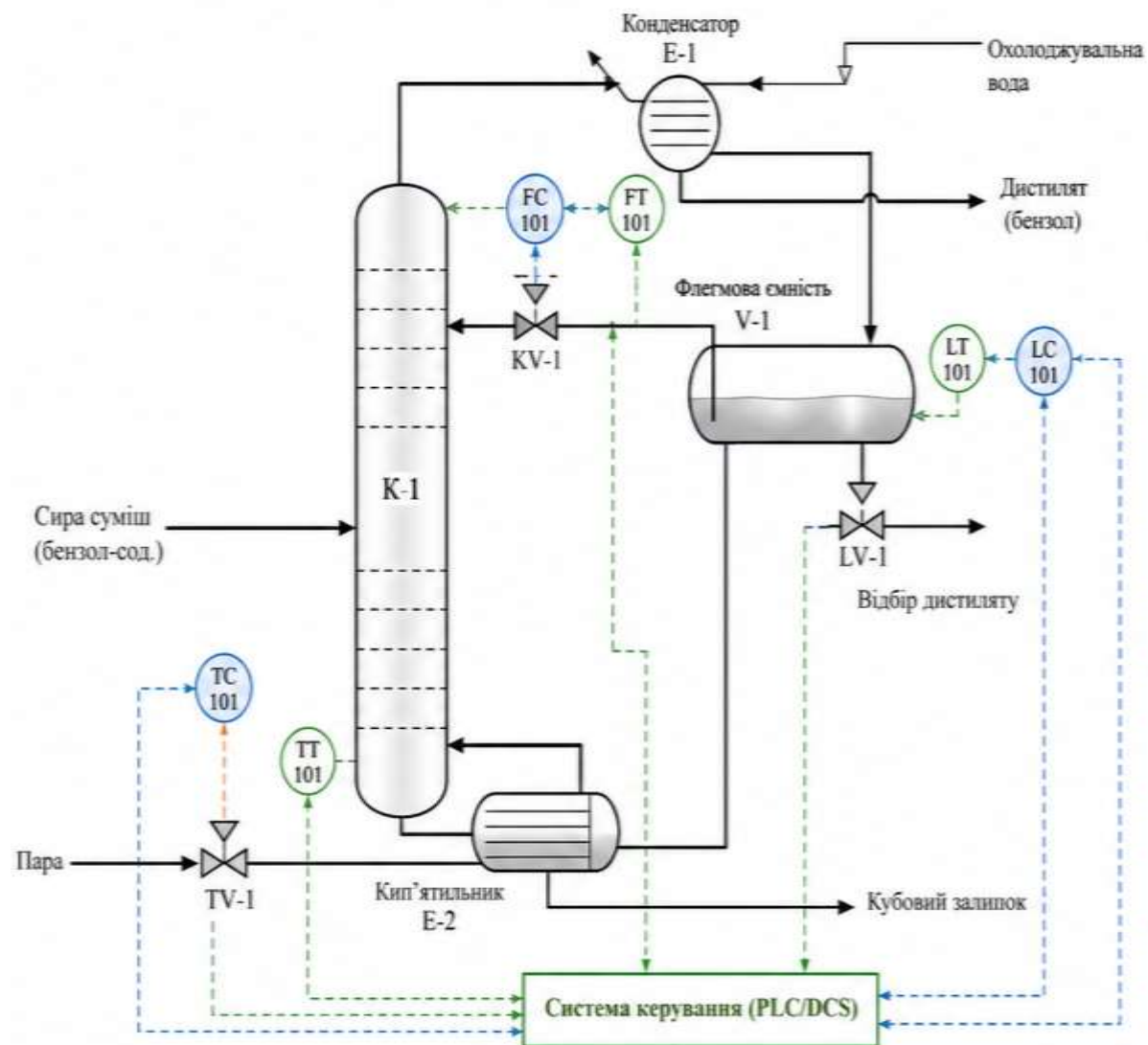
Технологічна схема вдосконаленої системи регулювання рефлюксу (рис. 2.6) являє собою автоматизований комплекс керування процесом ректифікації сирого бензолу, в якому реалізовано багатоконтурне регулювання температури, витрати та рівня для забезпечення стабільного флегмового числа і мінімізації енергоспоживання.

Сира бензольна суміш надходить у ректифікаційну колону К-1, де відбувається основний процес розділення на легкі (бензольні) та важкі компоненти. У нижній частині колони розміщений кип'ятильник Е-2, який забезпечує подачу теплоти за рахунок водяної пари через регулюючий клапан TV-1. Температура в кубі контролюється датчиком ТТ-101 і підтримується регулятором ТС-101, який керує подачею пари до кип'ятильника Е-2, забезпечуючи стабільний тепловий режим колони.

Пари, що утворюються в колоні К-1, надходять у конденсатор Е-1, де відбувається їх повна конденсація за допомогою охолоджувальної води. Отриманий конденсат накопичується у флегмовій ємності V-1. З цієї ємності частина рідини відбирається як готовий продукт (дистилят – сирий бензол), а інша частина повертається у верхню частину колони у вигляді рефлюксу через регулюючий клапан KV-1.

Витрата рефлюксу контролюється датчиком витрати FT-101, сигнал від якого надходить на регулятор витрати FC-101. Цей контур забезпечує стабілізацію флегмового числа в межах оптимального значення ( $R \approx 3$ ), визначеного в попередніх розрахунках. Таким чином підтримується необхідна інтенсивність масообміну між паровою та рідкою фазами.

Рівень у флегмовій ємності V-1 контролюється датчиком рівня LT-101, сигнал якого передається на регулятор рівня LC-101. Регулятор керує клапаном відбору дистиляту LV-1, забезпечуючи стабільність об'єму накопиченого конденсату та запобігаючи переповненню або осушенню ємності.



| Умовні позначення |                                     |
|-------------------|-------------------------------------|
| Позначення        | Найменування                        |
| K-1               | Ректифікаційна колона               |
| E-1               | Конденсатор                         |
| E-2               | Кип'ятильник                        |
| V-1               | Флегмова ємність                    |
| KV-1              | Регулюючий клапан рефлюксу          |
| LV-1              | Клапан відбору дистилату            |
| TV-1              | Регулюючий клапан пари              |
| FT-101            | Датчик витрати рефлюксу             |
| FC-101            | Регулятор витрати рефлюксу          |
| LT-101            | Датчик рівня у флегмовій ємності    |
| LC-101            | Регулятор рівня у флегмовій ємності |
| TT-101            | Датчик температури в кубі           |
| TC-101            | Регулятор температури в кубі        |

| Умовні лінії |                                 |
|--------------|---------------------------------|
|              | Технологічний потік             |
|              | Електричний сигнал (4–20 мА)    |
|              | Пневматичний сигнал (3–15 psi)  |
|              | Інформаційний сигнал (цифровий) |

Рисунок 2.6 Технологічна схема вдосконаленої системи регулювання рефлюксу

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [33]

Уся система керування інтегрована в автоматизовану систему PLC/DCS, яка забезпечує координацію роботи контурів регулювання температури (TC-101), витрати рефлюксу (FC-101) та рівня (LC-101).

Обмін сигналами між приладами здійснюється через стандартні інформаційні та аналогові канали, що дозволяє підтримувати стабільний технологічний режим навіть при змінному складі сировини та навантаженні колони.

Таким чином, запропонована схема забезпечує:

- стабілізацію флегмового числа;
- зменшення коливань складу дистиляту;
- оптимізацію витрати водяної пари в кип'ятильнику E-2;
- підвищення загальної енергоефективності процесу ректифікації.

У результаті вдосконалена система регулювання рефлюксу дозволяє підтримувати стабільний температурно-концентраційний профіль по висоті колони K-1 та забезпечує отримання бензольної фракції заданої якості при мінімальних енергетичних витратах.

## **2.6 Охорона праці**

### **2.6.1 Характеристика небезпечних та шкідливих чинників на ділянці ректифікації бензолу (вибухопожежонебезпека, токсичність бензолу)**

Процес ректифікації бензолу належить до категорії хімічно небезпечних виробництв, що підтверджується сучасними нормативними документами ЄС та України щодо роботи з канцерогенними та легкозаймистими речовинами. Зокрема, бензол віднесений до канцерогенів 1А класу небезпеки згідно з оновленою Директивою ЄС щодо захисту працівників від впливу канцерогенів і мутагенів [39].

Основними технологічними параметрами, що визначають ефективність процесу, є флегмове число, температурний режим колони та гідродинаміка потоків. Як було встановлено у розділі 2 (рис. 2.5), оптимізація флегмового числа

в межах  $R=1-3$  забезпечує підвищення чистоти фракцій, однак одночасно призводить до зростання внутрішніх потоків і, відповідно, енергетичного навантаження системи.

Це безпосередньо впливає на рівень потенційної небезпеки технологічної ділянки, оскільки збільшення теплових і масових потоків підвищує ризики аварійних ситуацій.

Умови експлуатації ректифікаційної колони характеризуються наявністю наступних основних небезпечних і шкідливих чинників [40]:

- вибухопожежна небезпека парів бензолу та супутніх ароматичних вуглеводнів;
- оксична дія бензолу та його парів на організм людини;
- підвищена температура технологічного середовища (до  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  у зоні кип'ятильника);
- надлишковий тиск у паровій частині системи;
- наявність рухомих механізмів (насоси, клапани, регулюючі органи);
- можливість розгерметизації апаратів і трубопроводів.

Бензол є легкозаймистою рідиною з низькою температурою спалаху (близько  $11\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), а його пари утворюють вибухонебезпечні суміші з повітрям у широкому діапазоні концентрацій. У зоні ректифікаційної колони найбільш небезпечними є:

- верхня частина колони (зона концентрації парів бензолу);
- конденсатор і ємність рефлюксу;
- ділянки відбору дистиляту.

Основні характеристики вибухонебезпеки наведено в таблиці 2.16.

Таблиця 2.16

#### Показники вибухопожежної небезпеки бензол

| Показник                       | Значення                           |
|--------------------------------|------------------------------------|
| Температура спалаху            | $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$      |
| Температура самозаймання       | $\sim 560\text{ }^{\circ}\text{C}$ |
| Межі вибуховості в повітрі     | $1,2-7,8\text{ \% об.}$            |
| Клас небезпеки                 | Легкозаймиста рідина               |
| Група вибухонебезпечної суміші | T1–T2                              |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [40]

Таким чином, навіть незначні витіки або порушення герметичності можуть призвести до утворення вибухонебезпечної атмосфери. Особливо небезпечними є ділянки підвищеного тиску та температури, де можливе інтенсивне випаровування бензолу.

Бензол є легкозаймистою рідиною, пари якої утворюють вибухонебезпечні суміші з повітрям. Згідно з сучасними гігієнічними та токсикологічними оцінками, його гранично допустимі концентрації та клас небезпеки регламентуються європейськими нормативами охорони праці (Directive 2002/431/EU) [41].

Бензол належить до речовин першого класу небезпеки та має виражену кумулятивну дію. Основні шляхи надходження в організм – інгаляційний та через шкіру. Хронічний вплив парів бензолу призводить до ураження кровотворної системи, центральної нервової системи та має канцерогенний ефект.

Сучасні європейські нормативи встановлюють гранично допустимий рівень експозиції (OEL) на рівні:

- 0,66 мг/м<sup>3</sup> (перехідне значення)
- 1,65 мг/м<sup>3</sup> (постійне значення)

Основні токсикологічні характеристики наведено в таблиці 2.17

Таблиця 2.17

#### Токсикологічні властивості бензолу

| Параметр                                 | Значення                               |
|------------------------------------------|----------------------------------------|
| ГДК у повітрі робочої зони               | 5 мг/м <sup>3</sup>                    |
| Клас небезпеки                           | 1<br>(надзвичайно небезпечна речовина) |
| Основна дія                              | Гематотоксична, канцерогенна           |
| Гранично допустима концентрація (разова) | 15 мг/м <sup>3</sup>                   |
| Симптоми отруєння                        | Запаморочення, слабкість, анемія       |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [42]

У зв'язку з цим особливу увагу необхідно приділяти герметизації обладнання, вентиляції робочих зон та контролю концентрації парів у повітрі.

Окрім хімічної небезпеки, процес ректифікації супроводжується дією фізичних шкідливих факторів. Основні з них наведено в таблиці 2.18

Таблиця 2.18

### Шкідливі фізичні фактори на дільниці ректифікації

| Фактор                | Джерело              | Характер впливу                  |
|-----------------------|----------------------|----------------------------------|
| 1                     | 2                    | 3                                |
| Підвищена температура | кип'ятильник, колона | теплове навантаження на персонал |
| Шум                   | насоси, компресори   | 70–90 дБ                         |
| Вібрація              | насосне обладнання   | локальний вплив                  |
| Підвищений тиск       | парова система       | ризик розгерметизації            |
| Електрична напруга    | приводи, автоматика  | ураження електричним струмом     |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [42]

З урахуванням результатів матеріального та теплового балансу (розділ 2.2) встановлено, що значні внутрішні потоки (до 9704 кг/год пари при  $R=3$ ) створюють підвищене теплове навантаження на обладнання, що додатково збільшує ризик аварій при порушенні режиму роботи.

Вплив основних параметрів процесу на рівень небезпеки узагальнено в таблиці 2.19

Таблиця 2.19

### Вплив технологічних параметрів на рівень небезпеки

| Параметр             | Зміна            | Вплив на безпеку                           |
|----------------------|------------------|--------------------------------------------|
| Флегмове число $R$   | зростає          | підвищення циркуляції парів, ризик витоків |
| Температура в колоні | 120–180 °C       | підвищення вибухонебезпеки                 |
| Тиск у системі       | нестабільний     | ризик розгерметизації                      |
| Витрата пари         | 3800–4200 кг/год | теплове навантаження                       |
| Концентрація бензолу | 88–96%           | токсична небезпека                         |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [43–44]

Як видно з таблиці, підвищення флегмового числа, хоча й покращує якість розділення (див. розділ 2.3), одночасно збільшує внутрішню циркуляцію парів, що підвищує потенційну небезпеку вибухонебезпечних ситуацій.

Таким чином, дільниця ректифікації бензолу характеризується комплексом взаємопов'язаних небезпечних і шкідливих виробничих факторів: високою токсичністю основної сировини та продуктів, вибухопожежною небезпекою пароповітряних сумішей, а також значними тепловими навантаженнями технологічного обладнання.

Результати аналізу технологічного процесу (розділ 2) показують, що оптимізація режиму роботи колони (зокрема підтримання  $R \approx 3$ ) дозволяє не лише підвищити ефективність розділення, але й зменшити ризики нестабільної роботи обладнання за рахунок стабілізації теплових і масових потоків. Це є важливим фактором підвищення загального рівня промислової безпеки.

Отже, забезпечення безпечних умов праці на дільниці ректифікації бензолу потребує комплексного підходу, який включає герметизацію обладнання, контроль концентрації шкідливих речовин, автоматизацію технологічного процесу та дотримання регламентів охорони праці.

### **2.6.2 Заходи щодо забезпечення безпечної експлуатації ректифікаційних колон**

Безпечна експлуатація ректифікаційних колон на установках переробки бензолу є критично важливою, оскільки процес супроводжується наявністю легкозаймистих парів, високих температур, надлишкового тиску та токсичних речовин.

Відповідно до сучасних вимог охорони праці та промислової безпеки, зокрема Закону України «Про охорону праці» №2694-ХІІ (зі змінами 2022- 2025 рр.) [43], а також НПАОП 0.00-1.81-18 «Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском» [44], безпечна робота ректифікаційних колон повинна забезпечуватися комплексом організаційних, технічних і санітарно–гігієнічних заходів.

Додатково вимоги до вибухопожежної безпеки регламентуються ДБН В.1.1-7:2021 «Пожежна безпека об'єктів будівництва» [45], а також НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» (зі змінами 2023 р.) [46]

Основні небезпеки ректифікаційної колони, встановлені у розділі 2.6, пов'язані з утворенням вибухонебезпечних пароповітряних сумішей бензолу, високою токсичністю його парів та значними тепловими навантаженнями. У зв'язку з цим система безпечної експлуатації повинна забезпечувати попередження аварій, локалізацію витоків і автоматичне регулювання технологічних параметрів.

Організаційні заходи спрямовані на запобігання аваріям шляхом забезпечення належної підготовки персоналу, дотримання технологічної дисципліни та контролю умов праці.

Вони включають допуск до роботи лише навченого персоналу згідно з НПАОП 0.00-4.12-05 «Типове положення про навчання з питань охорони праці» [47], регулярні інструктажі, ведення технологічного регламенту, контроль концентрації бензолу в повітрі та періодичні перевірки стану обладнання.

Для систематизації організаційних заходів наведено узагальнення в таблиці 2.20

Як видно з таблиці 2.20, основний акцент організаційних заходів спрямований на запобігання людському фактору як джерелу аварійних ситуацій. Технічні заходи є базовими для забезпечення безаварійної роботи ректифікаційних колон, оскільки вони спрямовані на мінімізацію ризику витоків, вибухів та перегрівів. Згідно з ДСТУ EN 60079-10-1:2021 «Вибухонебезпечні середовища» [52], виробничі приміщення повинні бути класифіковані за вибухонебезпечними зонами з використанням відповідного Ex-обладнання.

Таблиця 2.20

**Організаційні заходи безпеки**

| Захід                                | Зміст                                                                                                                                                                                                                          | Нормативне підґрунтя                                                                   |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| Навчання персоналу                   | Первинний, повторний, позаплановий та цільовий інструктажі; перевірка знань з охорони праці; допуск до робіт підвищеної небезпеки; спеціальне навчання для операторів ректифікаційних установок; ведення журналів інструктажів | НПАОП 0.00-4.12-05; Закон України «Про охорону праці» №2694-ХІІ (зі змінами 2022–2025) |
| Контроль повітря робочої зони        | Регулярний лабораторний та автоматичний контроль концентрації бензолу; використання стаціонарних і переносних газоаналізаторів; ведення протоколів вимірювань; сигналізація при перевищенні ГДК                                | Наказ МОЗ України №1192 (2024) «Гігієнічні нормативи»                                  |
| Технічний нагляд                     | Планові та позапланові огляди обладнання; діагностика технічного стану колон, трубопроводів і арматури; контроль герметичності; проведення експертного обстеження (технічного діагностування)                                  | Закон України «Про охорону праці»; НПАОП 0.00-1.81-18                                  |
| Регламент роботи                     | Розроблення та дотримання технологічних регламентів; ведення операційних карт; контроль параметрів процесу (температура, тиск, флегмове число); фіксація відхилень і дій персоналу                                             | ДСТУ ISO 9001:2015 (системи управління якістю); внутрішні стандарти підприємства       |
| Допуск до робіт підвищеної небезпеки | Оформлення нарядів-допусків; оцінка ризиків перед виконанням робіт; контроль використання ЗІЗ; призначення відповідальних осіб                                                                                                 | НПАОП 0.00-5.11-85; Закон України «Про охорону праці»                                  |
| Аудит та контроль безпеки            | Проведення внутрішніх і зовнішніх аудитів; аналіз виробничих ризиків; розслідування інцидентів; впровадження коригувальних заходів                                                                                             | ДСТУ ISO 45001:2019; Постанова КМУ №337 від 17.04.2019                                 |
| Медичний контроль персоналу          | Попередні та періодичні медичні огляди; контроль стану здоров'я працівників, що контактують з бензолом; ведення медичних карт                                                                                                  | Наказ МОЗ України №246 (оновлена редакція); Закон України «Про охорону праці»          |
| Документування та звітність          | Ведення журналів обліку робіт, інструктажів, аварійних ситуацій; оформлення звітів з охорони праці; зберігання документації                                                                                                    | ДСТУ 4163:2020 (уніфікована система організаційно-розпорядчої документації)            |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [42-50]

З урахуванням сучасних вимог нормативних документів України та гармонізованих європейських стандартів (2020-2025 рр.), доцільно деталізувати склад і функції таких засобів, що наведено в таблиці 2.21

Після узагальнення даних таблиці можна зробити висновок, що технічні засоби одночасно виконують дві взаємопов'язані функції: по–перше, забезпечують безперервний контроль основних параметрів технологічного

процесу (температура, тиск, рівень, концентрація небезпечних речовин), а по–друге реалізують активний захист обладнання шляхом автоматичного втручання у разі відхилень.

Таблиця 2.21

### Технічні засоби забезпечення безпеки

| Елемент системи                      | Функція                                                                                       | Норматив                                        |
|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| Запобіжний клапан                    | Автоматичне скидання надлишкового тиску, запобігання руйнуванню апарата                       | НПАОП 0.00-1.81-18;<br>ДСТУ EN ISO 4126-1:2019  |
| Газоаналізатор бензолу               | Безперервний контроль концентрації токсичних парів; сигналізація при перевищенні ГДК          | ДСТУ EN 45544-1:2020;<br>Наказ МОЗ №1192 (2024) |
| Датчики температури                  | Контроль температурного профілю колони; запобігання перегріву та порушенню режиму             | ДСТУ ІЕС 60751:2021                             |
| Датчики тиску                        | Контроль робочого тиску в колоні; передача сигналу в систему автоматизації                    | ДСТУ EN 837-1:2020                              |
| Рівнеміри                            | Контроль рівня рідини у кубі та дефлегматорі; запобігання переповненню                        | ДСТУ EN 61003-2:2020                            |
| Ех-електрообладнання                 | Запобігання займання вибухонебезпечних сумішей; робота в небезпечних зонах                    | ДСТУ EN 60079-10-1:2021; ДСТУ EN 60079-14:2021  |
| PLC-контролер                        | Автоматичне керування процесом; реалізація алгоритмів регулювання та аварійного захисту       | ДСТУ ІЕС 61131-3:2020                           |
| Система аварійного відключення (ESD) | Швидке відключення подачі сировини, пари та енергії при аварії                                | ДСТУ ІЕС 61511-1:2019                           |
| Сигналізація та блокування           | Світлова і звукова сигналізація; автоматичне блокування при відхиленнях параметрів            | ДСТУ EN 60204-1:2018<br>(чинна редакція)        |
| Система вентиляції                   | Видалення вибухонебезпечних і токсичних парів; забезпечення безпечного повітряного середовища | ДБН В.2.5-67:2021                               |
| Система заземлення                   | Захист від статичної електрики; запобігання іскроутворенню                                    | ДСТУ EN 60079-14:2021                           |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [42-51]

Особливо важливою є інтеграція датчиків із системами автоматизації (PLC та ESD), що дозволяє оперативно реагувати на потенційно небезпечні ситуації без участі людини.

Таким чином, застосування сучасних технічних засобів відповідно до чинних нормативних документів (НПАОП, ДСТУ, ДБН та стандартів ІЕС/EN) є

необхідною умовою забезпечення надійної, стабільної та безпечної експлуатації ректифікаційних колон у виробництві бензолу.

Санітарно–гігієнічні заходи регламентуються ДСН 3.3.6.042-99 (чинна редакція 2023 р.) [52] та оновленими вимогами МОЗ України (наказ №1192 від 2024 р.) [51], згідно з якими гранично допустима концентрація бензолу в повітрі робочої зони не повинна перевищувати 1,5 мг/м³.

Ці заходи спрямовані на зменшення впливу токсичних речовин на персонал і включають вентиляцію, засоби індивідуального захисту, герметизацію обладнання та постійний контроль повітряного середовища, вони включають:

- загальнообмінну та місцеву витяжну вентиляцію;
- використання індивідуальних засобів захисту;
- герметизацію апаратів і трубопроводів;
- безперервний контроль повітря;
- регламентовані санітарні перерви.

Основні санітарно–гігієнічні заходи, які необхідно реалізовувати в процесі ректифікації наведено в табл. 2.22

Таблиця 2.22

Санітарно-гігієнічні заходи

| Захід                          | Призначення                                                             | Нормативний документ                                      | Нормативні значення                                                                                                                                   |
|--------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Вентиляція                     | Видалення парів бензолу, забезпечення безпечного повітряного середовища | ДБН В.2.5-67:2021                                         | Кратність повітрообміну: не менше 6–10 раз/год для виробничих приміщень з виділенням шкідливих речовин; швидкість повітря в робочій зоні: 0,3–0,5 м/с |
| Засоби індивідуального захисту | Захист органів дихання, шкіри та очей працівників                       | ДСТУ EN 136:2020; ДСТУ EN 14387:2017 (чинний)             | Клас фільтрів для органічних парів – не нижче А1/А2; коефіцієнт захисту ЗІЗОД ≥ 10–200 (залежно від типу)                                             |
| Контроль повітря               | Запобігання отруєнню бензолом, моніторинг ГДК                           | Наказ МОЗ №1192 (2024); ДСН 3.3.6.042-99 (чинна редакція) | ГДК бензолу в повітрі робочої зони: 1,5 мг/м³ (середньозмінна); разова – до 5 мг/м³                                                                   |

Продовження табл.2.22

|                         |                                                       |                                                  |                                                                                                     |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Герметизація обладнання | Зменшення викидів токсичних вибухонебезпечних речовин | ДБН В.1.1-7:2021<br>Допустимі витоки – не більше | 0,1% від масової витрати продукту; обладнання повинно бути герметичним (клас герметичності А або В) |
|-------------------------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [48, 52]

Як видно з таблиці 2.22, ключовим напрямом є поєднання технічного захисту з індивідуальними засобами безпеки працівників. Можна також зробити висновок, що санітарно-гігієнічні заходи мають чітко визначені кількісні критерії, які підлягають постійному контролю.

Зокрема, гранично допустима концентрація бензолу ( $1,5 \text{ мг/м}^3$ ) є ключовим показником безпеки, перевищення якого потребує негайного реагування. Водночас ефективність вентиляції та правильний підбір засобів індивідуального захисту забезпечують зниження фактичного впливу шкідливих речовин на персонал.

Як було показано у розділі 2 (підрозділ 2.4), впровадження автоматичної системи регулювання рефлюксу дозволяє суттєво підвищити рівень промислової безпеки. Підтримання оптимального флегмового числа  $R \approx 3$  забезпечує стабілізацію температурного профілю, зменшення коливань складу парової фази та зниження ризику утворення вибухонебезпечних концентрацій.

Автоматизація виконує такі функції:

- запобігання перегріву кип'ятильника;
- стабілізація тиску в колоні;
- зменшення коливань складу парів бензолу;
- автоматичне аварійне відключення системи.

Таким чином, безпечна експлуатація ректифікаційних колон забезпечується комплексним поєднанням організаційних, технічних та санітарно-гігієнічних заходів. Виконання вимог сучасних нормативних документів України, зокрема Закону України “Про охорону праці” №2694-ХІІ, НПАОП 0.00-1.81-18, ДБН В.1.1-7:2021, НАПБ А.01.001-2014 (зі змінами 2023

р.), а також наказу МОЗ №1192 від 2024 року, дозволяє мінімізувати ризики вибухопожежних ситуацій та токсичного впливу бензолу.

Отже, найбільш ефективним підходом є інтеграція автоматизованого керування технологічним процесом із системами контролю повітряного середовища та герметизацією обладнання, що забезпечує стабільну, безпечну та безаварійну роботу ректифікаційної установки.

### **2.6.3 Вимоги до автоматизації як засобу підвищення безпеки (запобігання аварійним ситуаціям).**

Автоматизація технологічних процесів ректифікації є одним із ключових напрямів підвищення промислової безпеки та зниження ризику аварійних ситуацій, особливо при роботі з легкозаймистими та токсичними речовинами, зокрема бензолом.

Відповідно до вимог ДСТУ EN ІЕС 60079-10-1:2022 «Вибухонебезпечні атмосфери. Класифікація зон» [52], виробничі зони, де можливе утворення вибухонебезпечних газових сумішей, повинні бути класифіковані та оснащені відповідним вибухозахищеним обладнанням і системами автоматичного контролю.

Додатково, згідно із Законом України «Про охорону праці» № 2694-ХІІ [45], роботодавець зобов'язаний впроваджувати технічні засоби, що забезпечують попередження аварій та мінімізацію впливу небезпечних факторів.

У цьому контексті автоматизація розглядається як основний інструмент підтримання безпечного технологічного режиму. Вона забезпечує безперервний контроль параметрів процесу та оперативне реагування на їх відхилення. Основні функції автоматизованих систем безпеки наведено в таблиці 2.23

Як видно з таблиці 2.23, автоматизовані системи виконують одночасно функції контролю технологічних параметрів та запобігання розвитку аварійних ситуацій. Найбільш критичними є системи контролю температури, тиску та концентрації бензолу, оскільки саме їх відхилення найчастіше призводять до виникнення вибухопожежонебезпечних умов.

Таблиця 2.23

**Основні функції автоматизації для підвищення безпеки ректифікаційної колони (за технологічними точками контролю)**

| Точка технологічної схеми / елемент автоматизації                  | Функція контролю                                                                 | Вплив на безпеку                                                                   |
|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| PLC-контролер (центральний щит керування)                          | Координація роботи всієї системи автоматизації (рефлюкс, нагрів, відбір фракцій) | Забезпечення стабільності технологічного режиму та недопущення аварійних відхилень |
| Датчик температури (верх колони – зона парів бензолу)              | Контроль температури парової фази                                                | Запобігання утворенню вибухонебезпечних концентрацій та перегріву                  |
| Датчик температури (нижня частина колони / кип'ятильник)           | Контроль температури кипіння суміші                                              | Запобігання термічному розкладу та неконтрольованому пароутворенню                 |
| Датчик тиску (верх колони, дефлегматор)                            | Контроль надлишкового тиску парової фази                                         | Запобігання розгерметизації та вибуху апарата                                      |
| Датчик рівня (кубова частина / кип'ятильник)                       | Контроль рівня рідини в кубі колони                                              | Запобігання “сухого ходу” кип'ятильника та аварійного перегріву                    |
| Газоаналізатор бензолу (робоча зона верху колони)                  | Контроль концентрації парів бензолу в повітрі                                    | Попередження утворення вибухонебезпечного середовища та отруєння персоналу         |
| Виконавчий механізм регулювання флегми (дефлегматор)               | Регулювання флегмового числа                                                     | Стабілізація процесу ректифікації та зниження коливань складу парів                |
| Система аварійного відключення (ESD – клапани подачі пари/нагріву) | Швидке відключення теплопідводу та процесу ректифікації                          | Локалізація аварій, запобігання вибуху та пожежі                                   |

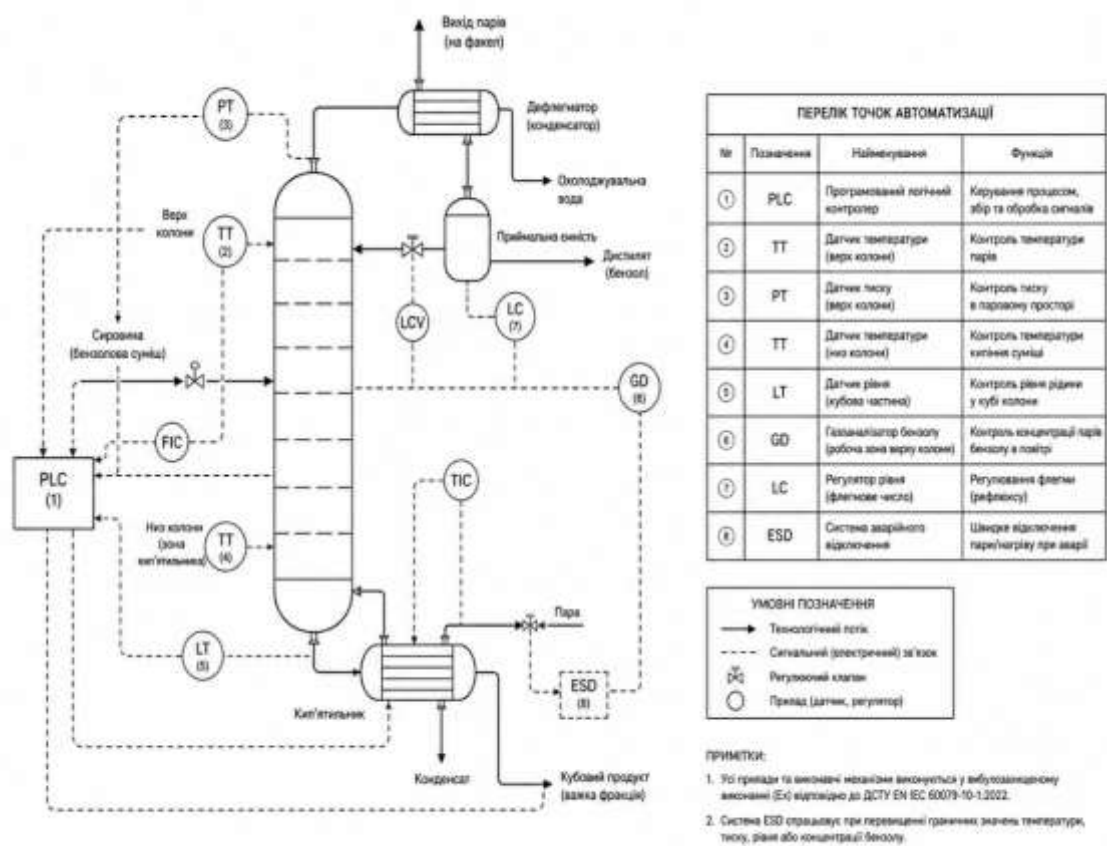
Примітка. Джерело: розроблено з використанням [43, 52]

Схема точок контролю та автоматизації наведено на рис. 2.7.

Автоматичне регулювання флегмового числа дозволяє підтримувати стабільність процесу ректифікації та уникати різких змін теплового режиму, що є важливим фактором безпеки. У разі перевищення граничних значень параметрів система автоматично переводить установку в аварійний режим із відключенням подачі теплового агенту та включенням сигналізації.

Таким чином, автоматизація технологічного процесу ректифікації відповідно до вимог чинних нормативних документів є обов'язковою умовою безпечної експлуатації обладнання та дозволяє суттєво знизити ризик аварій,

пов’язаних із перегрівом, надлишковим тиском та утворенням вибухонебезпечних сумішей.



**Рис. 2.7** Схема точок контролю та автоматизації технологічного процесу ректифікації сирого кам’яновугільного бензолу

Примітка. Джерело: розроблено з використанням[43, 52]

**2.6.4 Пожежна профілактика та системи протиаварійного захисту**

Пожежна профілактика та системи протиаварійного захисту на установках ректифікації бензолу є обов’язковою складовою забезпечення промислової безпеки, оскільки технологічний процес супроводжується обігом легкозаймистих парів, високих температур та можливістю утворення вибухонебезпечних пароповітряних сумішей.

Відповідно до вимог ДБН В.1.1-7:2016 «Пожежна безпека об’єктів будівництва. Загальні вимоги» [45], на таких об’єктах повинні бути передбачені

комплексні заходи, спрямовані на запобігання виникненню пожежі, обмеження її поширення та забезпечення ефективного пожежогасіння.

Додатково згідно з НАПБ А.01.001-2014 «Правила пожежної безпеки в Україні» [46], на технологічних установках з наявністю горючих рідин та парів обов'язковим є впровадження систем раннього виявлення пожежонебезпечних ситуацій, автоматичного оповіщення персоналу та протиаварійного відключення обладнання.

Основним напрямом пожежної профілактики є мінімізація умов для виникнення займання. Це досягається шляхом герметизації технологічного обладнання, контролю температурного та тискового режимів, а також запобігання витокам бензолу та його парів. Особливу роль відіграє вибір електрообладнання у вибухозахищеному виконанні та правильне зонування виробничих приміщень відповідно до категорії вибухопожежної небезпеки.

Система пожежної безпеки на ректифікаційній установці включає комплекс організаційних, технічних та автоматизованих заходів, які наведено в таблиці 2.24.

З таблиці 2.24 видно, що система пожежної безпеки базується на поєднанні активних та пасивних заходів захисту. Активні системи (сигналізація, газоаналіз, аварійне відключення та пожежогасіння) забезпечують оперативне реагування на аварійні ситуації, тоді як пасивні заходи (герметизація, вентиляція, вибухозахищене виконання обладнання) знижують імовірність їх виникнення. Особливе значення має інтеграція систем пожежної сигналізації з автоматизованою системою керування технологічним процесом, що дозволяє у разі перевищення критичних параметрів температури, тиску або концентрації парів бензолу автоматично переводити установку в безпечний режим або повністю її зупиняти.

Таким чином, комплекс пожежної профілактики та протиаварійного захисту забезпечує відповідність ректифікаційної установки вимогам чинних нормативних документів України та є необхідною умовою безпечної експлуатації обладнання.

Таблиця 2.24

**Система пожежної профілактики та протиаварійного захисту  
ректифікаційної колони**

| Захід / система                           | Призначення                                 | Очікуваний ефект                      | Нормативне підґрунтя |
|-------------------------------------------|---------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------|
| Вибухозахищене електрообладнання (Ех)     | Виключення джерел займання                  | Запобігання вибуху парів бензолу      | ДБН В.1.1-7:2016     |
| Автоматична пожежна сигналізація          | Раннє виявлення загоряння                   | Своєчасне оповіщення персоналу        | НАПБ А.01.001-2014   |
| Система аварійного відключення (ESD)      | Відключення подачі тепла та реагентів       | Локалізація аварійної ситуації        | ДБН В.1.1-7:2016     |
| Газоаналізатори бензолу                   | Контроль вибухонебезпечних концентрацій     | Попередження утворення НКМПВ          | НАПБ А.01.001-2014   |
| Система пожежогасіння (водяна/пінна)      | Ліквідація займання                         | Швидке гасіння пожежі                 | ДБН В.1.1-7:2016     |
| Система вентиляції                        | Видалення парів горючих речовин             | Зниження концентрації парів у повітрі | НАПБ А.01.001-2014   |
| Автоматичний контроль температури і тиску | Запобігання перегріву та надлишковому тиску | Недопущення аварійного режиму         | ДБН В.1.1-7:2016     |

Примітка. Джерело: розроблено з використанням [45-48]

## 2.7 Висновки до основної частини

У ході виконання основної частини роботи було проведено комплексний аналіз процесу ректифікації сирого бензолу з поглинальної оливи, включаючи матеріальні, теплові та техніко–економічні розрахунки, а також дослідження впливу флегмового числа на ефективність розділення компонентів і обґрунтування вдосконалення системи регулювання рефлюксу.

Матеріальний баланс процесу показав, що при переробці 120000 кг/год насиченої оливи отримується 2426 кг/год бензольної фракції та 97574 кг/год знебензоленої оливи. Ступінь вилучення бензолу становить близько 92,2 %, що підтверджує достатню ефективність базового процесу та коректність виконаних розрахунків.

Тепловий баланс встановив, що основне енергетичне навантаження припадає на кип'ятильник і конденсатор, а також на циркуляцію внутрішніх

потоків у колоні. Врахування рефлюксу показало суттєве зростання енергоспоживання, що є характерним для реальних промислових процесів ректифікації.

Аналіз впливу флегмового числа довів, що його збільшення позитивно впливає на якість розділення компонентів: зростає чистота бензольної фракції, підвищується ступінь вилучення цільових компонентів та покращується розподіл толуольної і ксилольної фракцій. Встановлено, що оптимальним значенням є  $R \approx 3$ , оскільки подальше збільшення флегмового числа не забезпечує суттєвого покращення якості продуктів, але призводить до значного зростання енергетичних витрат.

У роботі також виконано математичне моделювання процесу ректифікації при змінному флегмовому числі, що дозволило описати динаміку зміни концентрацій, температурних профілів та внутрішніх потоків у колоні. Показано, що флегмове число є ключовим керуючим параметром, який визначає як якість розділення, так і енергетичну ефективність процесу.

Особливу увагу приділено вдосконаленню системи автоматичного регулювання рефлюксу. Запропонована багатоконтурна система керування на основі температурного контролю та аналізу складу дозволяє стабілізувати флегмове число, зменшити коливання складу дистилляту, скоротити час переходних процесів та знизити витрати водяної пари. Порівняльний аналіз показав зменшення втрат бензолу, підвищення виходу продукту та покращення стабільності роботи колони.

Техніко-економічна оцінка підтвердила високу ефективність запропонованих рішень. Встановлено, що впровадження автоматизованої системи регулювання забезпечує річний економічний ефект понад 18 млн грн за рахунок зниження енергоспоживання та підвищення виходу товарного бензолу. При цьому термін окупності капітальних витрат становить менше одного року, що свідчить про високу інвестиційну привабливість проекту.

Таким чином, результати роботи підтверджують доцільність модернізації системи регулювання рефлюксу в ректифікаційній колоні, оскільки

запропоновані технічні рішення забезпечують підвищення енергоефективності, стабільності технологічного процесу та покращення якості цільових продуктів при мінімальних економічних витратах.

## ВИСНОВКИ

Матеріальний та тепловий баланси. Розрахунок матеріального балансу для установки продуктивністю 120 000 кг/год насиченої оливи показав, що вихід сирого бензолу становить 2426 кг/год при ступені вилучення 92,2 %, а витрата знебензоленої оливи (кубового залишку) 117574 кг/год (при забезпеченні залишкові вмісту бензолу в оліві не більше 0,3%). Ступінь вилучення бензолу з сировини сягає 92,2%, що свідчить про високу технологічну ефективність розрахованого процесу.

Тепловий баланс підтвердив, що основні енергетичні витрати пов'язані з циркуляцією внутрішніх потоків, які при оптимальному рефлюксі  $R=3$  збільшують парове навантаження до 9704 кг/год.

Оптимізація технологічних параметрів. Шляхом математичного моделювання встановлено кількісну залежність між флегмовим числом та чистотою цільових фракцій. Доведено, що збільшення  $R$  понад 3 призводить до незначного приросту чистоти бензольної фракції (з 95 % до 96 %), але спричиняє різке зростання енергоспоживання на 25 %. Це обґрунтовує вибір  $R=3$  як технологічного оптимуму.

Вдосконалення системи автоматизації. Запропоновано перехід від жорсткого регулювання витрати до адаптивної багатоконтурної системи регулювання рефлюксу за температурою на контрольній тарілці. Обґрунтовано використання сучасних засобів контролю (газових хроматографів та швидкісних термоперетворювачів), що дозволяє скоротити час стабілізації процесу вдвічі (з 30 до 15 хвилин).

Енергоефективність та економічна доцільність. Стабілізація рефлюксу дозволяє знизити питому витрату водяної пари на нагрів на 10-15 % за рахунок усунення надлишкового зрошення колони та стабілізації теплового режиму кип'ятильника. Це забезпечує не лише економію енергоресурсів, а й підвищує стабільність якості товарного бензолу.

Охорона праці та безпека. Впровадження автоматизованої системи регулювання підвищує рівень промислової безпеки, оскільки запобігає різким коливанням тиску та температури, що є критичним для пожежо-та вибухонебезпечного виробництва ароматичних вуглеводнів.

Таким чином, запропоновані технічні рішення дозволяють перетворити статичну схему ректифікації на сучасну адаптивну систему, що забезпечує отримання високоякісних продуктів при мінімальних енергетичних витратах.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Miroshnichenko D. V., Bannikov A. V., Bannikov L. M., Nesterenko S. V. Absorption oil for coke oven gas purification. *Journal of Chemical Technology and Metallurgy*, 2025. Vol. 60, No. 1. URL: <https://j.uctm.edu/index.php/JCTM/article/view/621>
2. ДСТУ8776:2018. Бензол кам'яновугільний та сланцевий. Технічні умов; чинний від, 2019-01-01. Київ :ДП «УкрНДНЦ», 2018. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=78078](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=78078)
3. ДСТУ24362 :2018. Вуглеводні ароматичні бензольного ряду. Хроматографічний метод вимірювання масової частки домішок та визначення масової частки основної речовини в бензолі, толуолі та ксилолі; чинний від 2019- 01 01. Київ :ДП«УкрНДНЦ», 2018. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage?id\\_doc=79979](https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage?id_doc=79979)
4. Тітов Т. С., Прокопчук С. П. Технологічні аспекти, реагентної переробки сірковуглецю головної фракції коксохімічних виробництв. *Репозитарій Вінницький національний технічний університет*. 2020. URL: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/28951>
5. Karvackij A. Ya., Lazaryev T. V., Leleka S. V., Mikulonok I. O., Ivanenko O. V. *Viznachennya parametriv gazifikaciyi vuglecevmisnih materialiv u barabani obertovoyi pechi*. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020. № 4 (106). S. 65-76.
6. Ірлик Ю. Математичне моделювання перехідних процесів живучої системи керування ректифікаційною установкою. *Refrigeration Engineering and Technology*. 2025. Т. 61, № 1. С. 45-54.  
DOI: <https://doi.org/10.15673/ret.v61i1.3112>
7. Лаврова І. О. І. Лавров Огляд існуючих схем ректифікації сирого бензолу на коксохімічних підприємствах. *Інтегровані технології та енергозбереження*., 2006. № 4. 7 с.

8. Степанюк А. Р., Гніденко С. В. Модернізація установки виробництва етанолу з розробкою ректифікаційної колони. Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів : *матеріали конф.* – Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2025. С. 11-16.
9. Булій Ю. В., Ободович О. М., Целень Б. Я., Мукоїд Р. М., Бондар М. В. Енергозберігаюча технологія циклічної ректифікації: *матеріали наук.-практ. конф., м. Київ* : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2025. 3 с
10. Рищенко І. О., Биканов С. В., Бабак Т. В., Горбунов К. В. Комплексна теплова інтеграція процесу ректифікації із використанням термокомпресії. *Інтегровані технології та енергозбереження*, 2022. № 3. С. 15–23.  
DOI: <https://doi.org/10.20998/2078-5364.2022.3.02>
11. Lyaposhenko O. O., Marenok V. A., Skidanenko M. S. та in. Modeling of technological processes for a rectification plant in second-generation bioethanol
12. *Production Processes*. 2021. Vol. 9(6). P. 944. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr906094>
13. Сидоренко В. І. Технологія коксохімічного виробництва : навчальний посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2021. 312 с
14. Кравченко О. В., Литвиненко С. П. Процеси та апарати хімічної технології. Частина 2: Масообмінні процеси : підручник. Київ: КПП ім. Ігоря Сікорського, 2022. 420 с.
15. Бондаренко Ю. М. Енергозбереження в хімічній технології та нафтохімії : навчальний посібник. Львів: Львівська політехніка, 2020. 256 с.
16. Павленко І. С., Шевчук Д. О. Ректифікаційні процеси в багатокомпонентних системах. *Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія*, 2023. № 2. С. 34-41
17. Олійник С. П. Екологічні аспекти коксохімічного виробництва. *Екологічна безпека*, 2021 № 1. С. 52-58.
18. Шевченко О. Ю., Бедрик О. В., Малета В. М. Визначення оптимального числа флегми для ректифікаційної колони циклічної дистиляції та порівняння його із стаціонарним. *Наукові праці НУХТ*, 2020. Т. 26, № 1. С. 171-180. URL: <https://dspace.nuft.edu.ua/server/api/core/bitstreams/022f142b361448629ace1ae1e6ad5e53/content>

19. Харченко В. А., Дяченко Р. І. Оптимізація енергоспоживання ректифікаційних установок.*Хімічна промисловість України*,2022. № 3. С. 1824
20. Касаткін А. Г.Основні процеси і апарати хімічної технології:підручник. оновлене вид. Київ:Хімтех,2021. 784 с.
21. Бутенко А. В., Федоренко О. В. Автоматизація технологічних процесів у хімічній промисловості:навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 310 с.
22. Трегуб В. Г. Системи автоматичного керування хімічними виробництвами. Харків:НТУ «ХП», 2022. 268 с.
23. Назаренко О. М.Математичне моделювання та оптимізація ректифікаційних процесів.Львів:Видавництво ЛП, 2021. 214 с.
24. Савченко П. І., Коваленко І. В.Енергетичний аналіз хіміко-технологічних процесів.*Вісник НТУУ «КПІ».Хімічна інженерія*,2022. № 3. С. 27-35.
25. Я. Е. Михайловський, А. Є. Артюхов, М. П. Юхименко, Н. О.Артюхова.Теплові й масообмінні процеси та обладнання хімічних і нафтогазопереробних виробництв у системах "газ (пара) рідина":*підручник* за заг. ред.Я. Е. Михайловського.Суми:СумДУ,2021.391с.URL:<https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/87502>
26. Мірошніченко Д. В. Теоретичні основи та практика підготовки вугільних шихт і виробництва коксу :монографія.Харків:Видавець Іванченко І. С., 2021. 412 с.
27. Артюхов А. Є., Склабінський В. І. Теорія та практика процесів розділення в багатофункціональних апаратах навч. посібник. Суми: Сумський державний університет, 2022. 245 с.
28. Братічак М. М., Гунька В. М. Хімія та технологія переробки вугілля : підручник. Львів:Видавництво Львівської політехніки,2023. 320 с.
29. Тітов Т. С. Оптимізація режимів роботи ректифікаційних установок коксохімічного виробництва.*Наукові праці Харківського національного технічного університету. Серія: «Хімія і хімічна технологія»*, 2021. № 1(24). С. 15–22.

30. Кондратюк О. В., Кузнецов П. В. Моделювання динамічних режимів ректифікаційних колон при зміні параметрів зрошення. *Автоматика, вимірювання та керування*, 2023. Т. 5, № 2. С. 88–95.
31. Жученко А. І., Кваско М. Ю. Автоматизація хіміко-технологічних процесів : підручник. Київ КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 540 с.
32. Ладієва Л. Р., Черепньов І. А. Оптимальне керування процесом ректифікації в умовах невизначеності складу сировини. *Вісник ЖДТУ. Технічні науки*, 2022. № 1(89). С. 112-119.
33. Бабіченко А. К., Подустов М. О. Проєктування мікропроцесорних систем керування ректифікаційними установками : навч. посібник. Харків : НТУ «ХПІ», 2021. 210 с.
34. Крикавський Є. В., Лопатинський О. В. Економіка підприємства : навч. посібник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2022. 384 с.
35. Перерва П. Г., Косенко О. П. Економічне обґрунтування інноваційних проєктів у хімічній промисловості. *Економіка та суспільство*, 2023. № 48. URL: <https://economyandsociety.in.ua>
36. Черкасова С. В. Фінансовий аналіз витрат на модернізацію основних засобів хімічних підприємств. Київ : Центр учбової літератури, 2022. 204 с.
37. Гірін В. С. Очищення стічних вод та викидів ректифікаційних відділень КХП. *Технологічний аудит та резерви виробництва*, 2021. № 3/3(59). С. 40-45.
38. Directive (EU) 2022/431 of the European Parliament and of the Council Protection of workers from exposure to carcinogens or mutagens at work. URL: [https://www.stradalex.eu/en/se\\_src\\_publ\\_leg\\_eur\\_jo/toc/leg\\_eur\\_jo\\_3\\_20220316\\_88/doc/ojeu\\_2022.088.01.0001.01](https://www.stradalex.eu/en/se_src_publ_leg_eur_jo/toc/leg_eur_jo_3_20220316_88/doc/ojeu_2022.088.01.0001.01)
39. Directive(EU)2019/130Amendment of Directive 2004/37/EC on carcinogens and mutagens. URL: [https://eurlex.europa.eu/legal\\_content/EN/NIM/?uri=uriserv:OJ.L\\_.2019.030.01.0112.01.ENG](https://eurlex.europa.eu/legal_content/EN/NIM/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.030.01.0112.01.ENG)
40. Directive(EU)2024/869Update of occupational exposure limits for carcinogenic substances (Annex III). URL: <https://irshare.eu/directive-2024-869-of-13-march->

[2024-amending-directive-2004-37-ec-and-directive-98-24-ec-as-regards-the-limit-values-for-lead-and-its-inorganic-compounds-and-for-diisocyanates/](https://zakononline.com.ua/documents/show/1192-2024)

41. Наказ МОЗ України №1192 від 09.07.2024. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних речовин у повітрі робочої зони. URL: <https://zakononline.com.ua/documents/show/1192-2024>
42. Occupational exposure limits for benzene (CAS71-43-2). URL: <https://chem.echa.europa.eu/100.000.685>
43. Про охорону праці: Закон України від 14.10.1992 № 2694-ХІІ.База даних «Законодавство України»Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/2694-12>
44. Правила охорони праці під час експлуатації обладнання, що працює під тиском: НПАОП 0.00-1.81-18, затв. наказом Міністерства соціальної політики України від 05.03.2018 № 333, зареєстр. в Міністерстві юстиції України, 10.04.2018 за № 433/31885. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0433-18>
45. Пожежна безпека об'єктів будівництва. Загальні вимоги:ДБН В.1.1-7:2016. Київ:МінрегіонУкраїни,2017.URL:[https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id\\_doc=68456](https://online.budstandart.com/ua/catalog/docpage.html?id_doc=68456)
46. Правила пожежної безпеки в Україні:НАПБ А.01.001-2014, затв. наказом Міністерства внутрішніх справ України від,30.12.2014 № 1417. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=60541](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60541)
47. Типове положення про порядок проведення навчання і перевірки знань з питань охорони праці:НПАОП 0.00-4.12-05, затв. наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від,26.01.2005 №15(зі змінами) URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=24622](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=24622)
48. Про затвердження державних медико-санітарних нормативів допустимого вмісту хімічних і біологічних речовин у повітрі робочої зони:*наказ Міністерства охорони здоров'я України* від 09.07.2024 № 1192, зареєстр. в Міністерстві юстиції України 24.07.2024 за № 1107/4245. URL:<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1107-24>

49. ДСТУ ISO 9001:2015. *Системи управління якістю*. Вимоги (ISO 9001:2015, IDT). URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=64013](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64013)
50. ДСТУ 4163:2020. Державна уніфікована система документації. Уніфікована система організаційно-розпорядчої документації. Вимоги до оформлення документів: *національний стандарт України* ДП «УкрНДНЦ»; розробл. УНДІАСД Державної архівної служби України. Київ: УкрНДНЦ, 2020. Чинний від 01.09.2021. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc\\_page.html?id\\_doc=90348](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc_page.html?id_doc=90348)
51. ДСТУ EN ІЕС 60079-10-1:2022. Вибухонебезпечні атмосфери. Частина 10-1. Класифікація зон. Вибухонебезпечні газові атмосфери (EN ІЕС 60079-10-1:2021, IDT; ІЕС 60079-10-1:2020, IDT): *національний стандарт України* ДП «УкрНДНЦ». Київ: УкрНДНЦ, 2022. Чинний від 01.06.2023. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=103409](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=103409)
52. ДСН 3.3.6.042-99. Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень: *постанова Головного державного санітарного лікаря України* від ,01.12.1999 № 42. Київ: МОЗ України, 1999. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/va042282-99>



Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

161-05д-д

Автор

161-05д-д

Науковий керівник / Експерт

Шмельцер К.О.

ІД документу

334137276

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

адреса/адрес

STATE UNIVERSITY OF ECONOMICS AND TECHNOLOGY

ЗВІТ

Дата звіту

6/2/2026

Дата редагування

—

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



12913  
Кількість слів



105449  
Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

|                        |  |   |
|------------------------|--|---|
| Заміна букв            |  | 5 |
| Інтервали              |  | 0 |
| Мікропробіли           |  | 0 |
| Білі знаки             |  | 0 |
| Парафрази (SmartMarks) |  | 2 |

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Копію тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Копію тексту

| # | НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)                                                                                                                | КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНОК СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ) |
|---|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 1 | <a href="http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/6083/1/MR_Zaviedisiev.pdf">http://eir.zntu.edu.ua/bitstream/123456789/6083/1/MR_Zaviedisiev.pdf</a> | 15 (0.12 %)                            |

## Д О В І Д К А

### про перевірку тексту роботи програмно-технічними засобами

Текст (вибрати необхідне):

- ☒ кваліфікаційної роботи;  
☐ навчальної/наукової праці;  
☐ наукових матеріалів

«Вдосконалення процесу ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу шляхом  
регулювання рефлюксу в колоні»

(назва)

автором/авторами або виконавцем якої є:

Ковальова Лілія Віталіївна

(ПІБ)

кафедра Хімічних технологій та інженерії

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

обсягом 83 сторінок друкованого тексту перевірено програмно-технічним засобом «StrikePlagiarizm<sub>com</sub>».

Рівень оригінальності становить 0,77 % (КП 1)

При перевірці посилань програмою визначено окремі співпадиння із:

- ☐ власними публікаціями;  
☒ термінологією;  
☒ посиланнями на літературу, праці вчених;  
☐ посиланнями на законодавство;  
☒ загальноновживаними фразами.

Матеріали було розглянуто та рекомендовано до захисту в ЕК

(подальшого розгляду, друку, опублікування)

на засіданні кафедри Хімічних технологій та інженерії

(структурний підрозділ, кафедра, лабораторія)

Навчально-наукового технологічного інституту Державного університету економіки і технологій від «12»червня 2026 р. протокол № 16.

Керівник підрозділу \_\_\_\_\_

К. ШМЕЛЬЦЕР

(підпис)

Дата «12»червня 2025р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ

**ДОВІДКА**  
про підготовку здобувача вищої освіти

*Ковальова Лілія Віталіївна*

(прізвище, ім'я та по-батькові)

Кафедра Хімічних технологій та інженерії

Спеціальність 161 Хімічні технології та інженерія

(шифр, назва)

Назва кваліфікаційної роботи Кваліфікаційна бакалаврська робота

Тема кваліфікаційної роботи «Вдосконалення процесу ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу шляхом регулювання рефлюксу в колоні»

Керівник кваліфікаційної роботи: к.х.н., доцент Кормер М.В.  
(посада, науковий ступінь, прізвище, ініціали)

Оцінки по розділах роботи

| № з/п | Найменування розділу проекту (роботи) | Консультант | Зараховано / не зараховано | Дата | Підпис консульта<br>нта | Примітка |
|-------|---------------------------------------|-------------|----------------------------|------|-------------------------|----------|
| 1     | Аналітична частина                    | Кормер М.В. | Зараховано<br>92/А         |      |                         |          |
| 2     | Основна частина                       | Кормер М.В. | Зараховано<br>92/А         |      |                         |          |
| 3     |                                       |             |                            |      |                         |          |
| 4     |                                       |             |                            |      |                         |          |

Завідувач кафедри \_\_\_\_\_  
( підпис )

К.О. Шмельцер .  
(ініціали, прізвище)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
Кафедра Хімічних технологій та інженерії

## ВІДГУК КЕРІВНИКА НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ БАКАЛАВРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА

Здобувача вищої освіти Ковальовій Лілії Віталіївні  
(прізвище, ім'я та по-батькові)  
групи ХТ-22

Тема кваліфікаційної бакалаврської роботи «Вдосконалення процесу ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу шляхом регулювання рефлюксу в колоні»

Обсяг пояснювальної записки і графічної частини:

|                                                      |            |
|------------------------------------------------------|------------|
| пояснювальна записка                                 | <u>83;</u> |
| таблиць                                              | <u>32;</u> |
| схем і рисунків                                      | <u>7;</u>  |
| листів графічної частини(демонстраційного матеріалу) | <u>-.</u>  |

### Якісні відмінності кваліфікаційної бакалаврської роботи

Кваліфікаційна робота присвячена актуальній для коксохімічної промисловості проблемі підвищення ефективності процесу ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу. Її особливістю є поєднання технологічних розрахунків із питаннями автоматизації виробництва. Автором виконано аналіз існуючих технологічних рішень, проведено розрахунки матеріального та теплового балансів, досліджено вплив флегмового числа на показники процесу та запропоновано сучасні підходи до автоматизації керування ректифікаційною колоною. У роботі виконано матеріальний і тепловий баланси установки, досліджено вплив флегмового числа на якість отримуваних продуктів та енергетичні витрати процесу, а також запропоновано вдосконалення системи регулювання рефлюксу. Практичну цінність становлять рекомендації щодо впровадження адаптивної системи керування, що сприятиме підвищенню стабільності технологічного режиму, покращенню якості бензольної продукції та зниженню витрат енергоресурсів.

## Недоліки кваліфікаційної бакалаврської роботи

*Є й деякі несуттєві недоліки у роботі переважно у оформленні роботи*  
*Присутні стилістичні помилки у технічній термінології, оформлення*  
*списку використаних джерел, однак це не впливає на загальне враження від*  
*роботи.*

**Характеристика загальної, спеціальної і виробничої підготовки автора кваліфікаційної бакалаврської роботи ступінь самостійності виконання,**  
*Під час виконання кваліфікаційної роботи здобувачка продемонструвала*  
*достатній рівень загальнотеоретичної та фахової підготовки зі*  
*спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія», володіння сучасними*  
*методами технологічних розрахунків, навички аналізу та узагальнення*  
*науково-технічної інформації. Авторка виявила здатність самостійно*  
*формулювати поставлені завдання, здійснювати пошук і опрацювання*  
*літературних джерел, виконувати необхідні розрахунки та обґрунтовувати*  
*прийняті технічні рішення. Робота виконана переважно самостійно, а*  
*консультації наукового керівника мали рекомендаційний та коригувальний*  
*характер.*

**Можливість використання кваліфікаційної бакалаврської роботи**  
*Результати роботи можуть бути використані на коксохімічних*  
*підприємствах для вдосконалення процесу ректифікації сирого бензолу та*  
*підвищення ефективності систем автоматичного регулювання. Окремі*  
*матеріали роботи можуть бути застосовані в навчальному процесі.*

**Оцінка кваліфікаційної бакалаврської роботи** зараховано 92/А

Керівник Кормер Марина Віталіївна

(прізвище, ім'я та по-батькові)

К.Х.Н., доцент

(посада, науковий ступінь, вчене звання)

(підпис)

« 12 » 06 2026 р.

ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЕКОНОМІКИ І ТЕХНОЛОГІЙ  
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ТЕХНОЛОГІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
Кафедра Хімічних технологій та інженерії

## РЕЦЕНЗІЯ

на кваліфікаційну бакалаврську роботу

Здобувача вищої освіти    Ковальовій Лілії Віталіївні

(прізвище, ім'я та по-батькові)

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| групи ХТ-22                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <b>Тема</b> кваліфікаційної бакалаврської роботи                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <i>«Вдосконалення процесу ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу шляхом регулювання параметрів процесу»</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Тема спеціальної частини кваліфікаційної бакалаврської роботи</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <i>Аналіз технологій ректифікації насиченого бензолними вуглеводами поглинального мастила</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| <b>Переваги кваліфікаційної бакалаврської роботи</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <i>Кваліфікаційна бакалаврська робота виконана на актуальну тему, пов'язану з удосконаленням процесу ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу. Позитивною особливістю роботи є комплексний підхід до вирішення поставленого завдання, який поєднує технологічні розрахунки та питання автоматизації процесу. Авторкою проведено аналіз впливу флегмового числа на показники роботи ректифікаційної колони, обґрунтовано вибір оптимального режиму та запропоновано шляхи вдосконалення системи регулювання рефлюксу. Отримані результати мають практичне значення, оскільки спрямовані на підвищення стабільності технологічного процесу, покращення якості готової продукції та зниження енергетичних витрат. Зміст роботи свідчить про достатній рівень теоретичної та практичної підготовки здобувачки</i> |
| <b>Недоліки кваліфікаційної бакалаврської роботи</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <i>Суттєвих недоліків у роботі немає., можна відмітити лише деякі стилістичні помилки у технічній термінології</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <b>Рекомендації:</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| <i>Кваліфікаційна робота Ковальовій Л. В. задовольняє вимогам, які пред'являються до кваліфікаційних бакалаврських робіт може бути допущена до захисту на засіданні ЕК та заслуговує оцінку зараховано 92/А</i>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Рецензент                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

(прізвище, ім'я та по-батькові)

\_\_\_\_\_  
(посада, науковий ступінь, вчене звання)

\_\_\_\_\_  
(підпис)

ЗГОДА здобувача(чки) освіти Державного університету економіки і технологій  
про перевірку кваліфікаційної роботи на прояви академічного плагіату  
та розміщення в Репозитарії ДУЕТ

Я, Ковальова Лілія Віталіївна, підтримую політику Державного університету економіки і технологій з академічної доброчесності і відкритого доступу. Стверджую, що кваліфікаційна бакалаврська робота «Вдосконалення процесу ректифікації сирого кам'яновугільного бензолу шляхом регулювання рефлюксу в колоні» виконана самостійно та не містить академічного плагіату. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки цієї роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають покликання на відповідне джерело.

Із чинним Положенням про запобігання та виявлення академічного плагіату в роботах здобувачів вищої освіти Державного університету економіки і технологій ознайомена. Чітко усвідомлюю, що в разі виявлення у кваліфікаційній роботі порушення норм академічної доброчесності робота не допускається до захисту або оцінюється незадовільно.

Також я поінформованна, що відповідно до пункту 5.8 «Положення про Репозитарій (електронну базу даних) Державного університету економіки і технологій» згадана робота буде розміщена в Електронному архіві Університету (Репозитарії ДУЕТ) та ознайомена з умовами такого розміщення.

12.06.2026 р.

\_\_\_\_\_Л.КОВАЛЬОВА