НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

Хіміко-технологічний факультет
Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів.

«До захисту допущено»
В.о. завідувача кафедри
_____ Тетяна БОЙКО
(підпис)
“___” _червня_ 2020 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології сталих хімічних виробничих комплексів»

спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно- інтегровані технології»

на тему: «Комп’ютерне моделювання та автоматизація процесу отримання циклогексанону»

Виконав:
студент IV курсу, групи ХА-61
Кіцун Андрій Васильович _____

Керівник:
доц. каф. КХТП, к.т.н., доц. Шахновський А.М. _____

Консультанти:
з хімічної технології доц. каф. КХТП, к.т.н., доц. Безносик Ю.О. _____
(підпис)

з автоматизов. регулювання доц. каф. КХТП, к.т.н., доц. Бондаренко С.Г. _____
підпис

з охорони праці доцент каф. охорони праці, промислової та цивільної безпеки, к.т.н., доц. Полукаров Ю.О. _____
підпис

з організаційно-економічної частини доц. кафедри економіки і підприємництва, к.х.н. доц. Підлісна О.А. _____
Нормативний контроль доц. каф. КХТП, к.т.н., доц. Шахновський А.М. _____

Рецензент _____
_____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище ім’я, по батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2020 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Хіміко-технологічний факультет

Кафедра кібернетики хіміко-технологічних процесів .

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані технології сталих хімічних виробничих комплексів»

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о. завідувача кафедри
_____ Тетяна БОЙКО
(підпис)

«19» лютого 2020 р

ЗАВДАННЯ
на дипломний проєкт студенту

Кіцуну Андрію Васильовичу

1. Тема проєкту Комп'ютерне моделювання та автоматизація процесу отримання циклогексанону,
керівник проєкту Шахновський Аркадій Маркусович, к.т.н., доц., затверджені наказом по університету від «22» квітня 2020 р № 1031-с.

2. Термін подання студентом проєкту 12 червня 2020 р

3. Вихідні дані до проєкту розробити технологічний проєкт процесу гідрогенізації фенолу з утворенням циклогексанону продуктивністю за циклогексаноном 120 000 тон/рік: спосіб отримання продукту – рідкофазна гідрогенізація фенолу; тип каталізатору – паладієвий; робочий діапазон температур 140 – 150 °С; концентрація цільового продукту не менше 98%

4. Зміст пояснювальної записки опис технологічного процесу; розрахунок матеріального балансу схеми; розрахунок оптимальних налаштувань регулятора; автоматизація технологічної схеми; техніко-економічні розрахунки процесу; заходи охорони праці на підприємстві

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) схема технологічного процесу; блок-схема обчислювального модуля, схема автоматизації процесу; монтажне креслення; специфікація монтажного креслення; плакат техніко-економічних показників; презентація дипломного проєкту

6. Консультанти розділів проєкту

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Полукаров Ю. О. доц. каф. охорони праці, промислової та цивільної безпеки		
Організаційно-економічна частин	Підлісна О.А. доц. кафедри економіки і підприємництва		
Розрахунок матеріальних балансів ХТС	Безносик Ю.О. доц. кафедри кібернетики ХТП		
Розроблення схеми автоматизації ХТС	Бондаренко С.Г. доц. кафедри кібернетики ХТП.		

7. Дата видачі завдання 19 лютого 2020

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту (роботи)	Строк викон. етапів проєкту	Примітка
1	Характеристика виробництва, продукції, сировини, допоміжних матеріалів. Комп'ютерно-інтегрований розрахунок матеріальних балансів схеми.	31.03.20	
2	Розрахунок основного апарата. Блок-схема обчислювального модуля (формат А1).	05.06.20	
3	Монтажне креслення (формат А1).	08.06.20	
4	Розробка рішень з контролю та керування виробництвом. Технологічна схема автоматизації (формат А1).	02.06.20	
5	Розробка рішень з охорони праці та економіки і управління виробництвом	05.06.20	
6	Оформлення пояснювальної записки, виконання ілюстративних матеріалів (презентації).	11.06.20	

Студент Андрій КІЦУН

Керівник Аркадій ШАХНОВСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ, КОНТРОЛЬ І РЕГУЛЮВАННЯ, ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ МОДУЛЬ, ЦИКЛОГЕКСАНОН, CHEMCAD, МАТЕРІАЛЬНИЙ БАЛАНС.

Пояснювальна записка 144 с., 33 рис., 27 табл., 8 додатків., 18 джерел.

В даному дипломному проєкті виконане комп'ютерне моделювання та автоматизація процесу отримання циклогексанону.

Наведено технологічну схему отримання цільового продукту. Виконано комп'ютерний розрахунок матеріального балансу процесу в середовищі CHEMCAD 7.1.5.

Проведено розрахунок оптимальних налаштувань обраного регулятора: методом Ротача в середовищі Mathcad 15; та за допомогою компоненту Simulink в MATLAB R2019b. Розроблено обчислювальний модуль, для перевірки обрахунків. Для створення програмного забезпечення, використано мову програмування JavaScript.

Запропоновано технологічну схему автоматизації процесу отримання циклогексанону. Підібрано необхідні технічні засоби автоматизації для функціонування розроблених схем.

Проведено економічні розрахунки основних техніко-економічних показників даного процесу.

Розглянуто заходи із охорони праці та виробничої санітарії даного процесу. Наведено комплекс заходів з техніки безпеки з урахуванням вимог охорони праці.

РЕФЕРАТ

АВТОМАТИЗАЦИЯ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, КОНТРОЛЬ И РЕГУЛИРОВАНИЕ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЙ МОДУЛЬ, ЦИКЛОГЕКСАНОН, CHEMCAD, МАТЕРИАЛЬНЫЙ БАЛАНС.

Пояснительная записка 144 ст., 33 рис., 27 табл., 8 приложений., 18 источников.

В данном дипломном проекте выполнено компьютерное моделирование и автоматизация процесса получения циклогексанона.

Приведено технологическую схему получения целевого продукта. Выполнен компьютерный расчет материального баланса процесса в среде CHEMCAD 7.1.5.

Проведен расчет оптимальных настроек выбранного регулятора: методом Ротача в среде Mathcad 15, и с помощью компонента Simulink в MATLAB R2019b. Разработан вычислительный модуль, для проверки вычислений. Для создания программного обеспечения, использовано язык программирования JavaScript.

Предложена технологическая схема автоматизации процесса получения циклогексанона. Подобраны необходимые технические средства автоматизации для функционирования разработанных схем.

Проведены экономические расчеты основных технико-экономических показателей данного процесса.

Рассмотрены меры по охране труда и производственной санитарии данного процесса. Приведен комплекс мероприятий по технике безопасности с учетом требований охраны труда.

ABSTRACT

AUTOMATION, COMPUTER MODELLING, CONTROL AND REGULATION, COMPUTATIONAL MODULE, CYCLOHEXANONE, CHEMCAD, MATERIAL BALANCE.

Explanatory note has 144 p., 33 fig., 27 tables, 8 appendixes, 18 sources.

In this diploma project computer simulation and automation of the process of obtaining cyclohexanone are performed.

The technological scheme of obtaining the target product is given. Done material balance computer calculation of the process in the CHEMCAD 7.1.5.

The calculation of the optimal settings of the selected regulator is performed: The Rotach method in the Mathcad 15 environment; and using the Simulink component in MATLAB R2019b. Developed a computational module to test calculations. To create the software used programming language JavaScript.

The technological scheme of automation of the process of cyclohexanone production is offered. Necessary technical means of automation for functioning of the developed schemes are selected.

Economic calculations of the main technical and economic indicators of this process are carried out.

Measures for labor protection and industrial sanitation of this process are considered. The complex of safety measures taking into account the requirements of labor protection is given.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ 9
ВСТУП..... 10
1 Аналіз технологічної схеми процесу отримання циклогексанону..... 11
1.1 Опис реакцій процесу отримання циклогексанону 11
1.2 Технологічний опис процесу отримання циклогексанону 12
2 Розрахунок матеріальних балансів процесу отримання циклогексанону в пакеті CHEMCAD 15
2.1 Опис середовища моделювання CHEMCAD 7.1.5 15
2.2 Налаштування середовища CHEMCAD 16
2.3 Розрахунок матеріальних балансів процесу отримання циклогексанону..... 18
3 Автоматизований розрахунок налаштувань регулятора..... 21
3.1 Ідентифікація коефіцієнтів передавальної функції об’єкта..... 21
3.2 Розрахунок оптимальних налаштувань ПІД-регулятора в середовищі Mathcad 22
3.3 Розрахунок оптимальних налаштувань ПІД-регулятора в середовищі MATLAB 25
3.4 Програмне забезпечення для розрахунку налаштувань ПІД-регулятора..... 30
4 Автоматизація технологічної схеми процесу отримання циклогексанону..... 34
4.1 Аналіз параметрів технологічної схеми..... 35
4.2 Опис системи автоматизації..... 36
4.2.1 Контури контролю та регулювання витрати 36
4.2.2 Контури контролю та регулювання тиску..... 36
4.2.3 Контури контролю та регулювання температури..... 37
4.2.4 Контур контролю рівня 39
4.2.5 Контури керування живленням електромоторів..... 39
5 Економіко-організаційні розрахунки процесу отримання циклогексанону 40
5.1 Визначення оптимального виду руху предметів праці 40
5.2 Організація працівників на підприємстві 42

5.3 Основні техніко-економічні показники виробництва циклогексанону 47
6 Охорона праці 54
6.1 Виявлення і аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів на проектованому об’єкті. Заходи з охорони праці 54
6.1.1 Повітря робочої зони 54
6.1.2 Виробниче освітлення 55
6.1.3 Виробничий шум і вібрація 57
6.1.4 Електробезпека 57
6.1.5 Безпека технологічних процесів та обслуговування обладнання 58
6.2 Пожежна безпека 60
ВИСНОВКИ 62
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 63
ДОДАТКИ 65
Додаток А 65
Додаток Б 70
Додаток В 77
Додаток Г 78
Додаток Ґ 112
Додаток Д 118
Додаток Е 119
Додаток Ж 120

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

А – амортизація основних засобів;

АСУТП – автоматизована система управління технологічним процесом;

АФХ – амплітудно-фазова характеристика;

АЧХ – амплітудно-частотна характеристика;

В – випуск продукції;

ВРПП – вид руху предметів праці;

ГДК – гранично допустима концентрація;

Е – коефіцієнт економічної ефективності;

К – капіталовкладення;

КПО – коефіцієнт природнього світла;

ОбЗ – оборотні засоби;

ОЗ – основні засоби;

П – прибуток;

ПІД – пропорційно-інтегрально-диференціальний;

Р – рентабельність;

С - собівартість;

САР – система автоматичного регулювання;

Т – тривалість роботи;

ФВ – фондовіддача;

ФЕ – фондоємність;

ФОП – фонд оплати праці;

Ц – ціна;

Ч – чисельність персоналу.

ВСТУП

Метою дипломного проєкту є комп'ютерне моделювання та розробка засобів автоматизації технологічного процесу отримання циклогексанону методом гідрогенізації фенолу на паладієвому каталізаторі, включаючи розрахунок матеріальних балансів процесу, розробку програмного модуля для розрахунку оптимальних налаштувань регулятора, розробку функціональної схеми автоматизації процесу виробництва, оцінка техніко-економічних показників та аналіз заходів охорони праці на підприємстві.

Циклогексанон – органічна речовина, представник кетонів з формулою $C_6H_{10}O$, безбарвна масляниста летка рідина з неприємним запахом ацетону і м'яти. За звичайних умов слабкорозчинна у воді, але легко розчинюється у звичайних органічних розчинниках. Циклогексанон є важливою сировиною у виробництві нейлону через виробництво капролактаму, тому його щорічне виробництво складає мільйони тон. Також використовується як промисловий розчинник з'єднань целюлози, полівінілхлориду, жирів, восків, масл, клеїв, резин різного походження.

В промисловості циклогексанон отримують шляхом окиснення циклогексану; дегідруванням циклогексанолу в паровій фазі; разом з циклогексанолом каталітичним гідруванням фенолу на паладієвому каталізаторі. Популярним методом виробництва вважається окиснення циклогексану, але гідрування фенолу також часто використовується завдяки використанню більш дешевої сировини в якості фенолу та кращої селективності вихідного продукту. Процес більш безпечний та супроводжується меншою кількістю викидів в атмосферу.

1 Аналіз технологічної схеми процесу отримання циклогексанону

1.1 Опис реакцій процесу отримання циклогексанону

Основні промислові шляхи виробництва циклогексанону в якості початкової сировини використовують циклогексан і фенол, шляхом окиснення і гідрування відповідно.

Процес побудований на гідруванні фенолу може бути описаний наступним стехіометричним рівнянням:

$$C_6H_5OH + xH_2 = yC_6H_{10}O + zC_6H_{11}OH$$

Де y + z =1 і x = 2y + 3z. Якщо знехтувати побічними продуктами, то молярне відношення x показує безпосередній вихід продукту. Наприклад, для отримання 90% циклогексанону необхідно ефективне молярне відношення водню до фенолу x = 2,1 [4].

Гідрування фенолу можна проводити як в паровій так і в рідкій фазі. В обох випадках використовується паладієвий каталізатор, але з різними параметрами використання [4].

Процес газофазної гідрогенізації фенолу проводиться при температурі 140-170 °C та тиску злегка вище атмосферного. Застарілі процеси, що базуються на нікелевому каталізаторі мають два чіткі етапи реакції: повна гідрогенізація до циклогексанолу з подальшим дегідруванням. Сучасні процеси, базовані на паладієвому каталізаторі, можуть мати більше 90% виходу циклогексанону в одному реакторі. Без використання реактора дегідрування, включаючи дороге обладнання для досягнення високих температур, процес є дешевшим, що є перевагою з економічної точки зору.

Рідкофазна гідрогенізація фенолу працює при температурі нижче температури кипіння в атмосфері, близько 140-150 °C. Спостерігається висока селективність, що перевищує 99% при 90% конверсії. Крім того, процес потребує меншої кількості інвентаризації каталізаторів і є по суті безпечним [4].

Сьогодні основним способом отримання циклогексанону є рідкофазне окислення циклогексану. Синтез передбачає утворення

циклогексилгідропероксиду, який далі перетворюється на циклогексанон, циклогексанол та побічні продукти, які можна побачити за наступною схемою:

$$C_6H_{12} + O_2 = C_6H_{11}OOH$$

$$3C_6H_{11}OOH \longrightarrow 2C_6H_{11}OH + C_6H_{10}O + H_2O + O_2 + \text{побічні продукти}$$

Реакцію проводять при температурі 140-180 °C і 0,80-2 МПа в групі або одинарній окиснювальній колоні. Селективність реакції сильно залежить від каталізатора. Наприклад, розчинний каталізатор на основі кобальту дає співвідношення кетон/спирт приблизно 3,5. З метою досягнення максимального виходу конверсія залишається низькою.

Хоча окислення циклогексану домінує на ринку, через дешевшу сировину, гідрування фенолу залишається конкурентоспроможним, пропонуючи кращу селективність із меншими проблемами навколишнього середовища та безпеки. Крім того, цей процес дозволяє ефективно реалізувати багаті фенолом відходи вугільної промисловості. Наявність фенолу з низькою ціною є найважливішим елементом прибутковості [4].

1.2 Технологічний опис процесу отримання циклогексанону

На рисунку 1.1 наведено ключові реакції, що протікають при виробництві циклогексанону шляхом гідрування фенолу. Реакції послідовного типу, в яких цільовий продукт є проміжним продуктом. Невеликі кількості циклогексену можуть з'являтися при більш високій температурі внаслідок дегідратації циклогексанолом. Додаткові реакції можуть утворювати домішки шляхом полімеризації бензолу та циклогексану шляхом диспропорціонування [4].

Рисунок 1.1 – Схема рідкофазної гідрогенізації фенолу

В таблиці 1.1 наведено вільну ентальпію та енергію Гіббса процесу при температурі 289,13 К та тиску 1 атм. Гідрування фенолу є високоекзотермічним, тоді як дегідрування циклогексанолу є помірно ендотермічним.

Таблиця 1.1 – Ентальпія та енергія Гіббса процесу (кДж/моль)

За цим механізмом, в загальній технологічній схемі процесу отримання циклогексанону протікають наступні реакції:

$$C_6H_6O + 2{,}1H_2 \xrightarrow{t,Pd} 0{,}9C_6H_{10}O + 0{,}1C_6H_{12}O;$$

$$C_6H_{12}O \xrightarrow{t,Zn/Cr} C_6H_{10}O + H_2;$$

$$C_6H_{12}O \xrightarrow{t} C_6H_{10} + H_2O;$$

$$3C_6H_{10} \xrightarrow{t} C_6H_6 + 2C_6H_{12}.$$

Важливим аспектом є утворення домішок. Легкі домішки можуть виникати переважно шляхом дегідрування циклогексанолу до циклогексену та воду, але при більш високих температурах можуть з'являтися циклогексан та бензол. Цеклогексен утворюється завдяки сприятливих термодинамічних умов, тому необхідно підібрати селективний каталізатор щоб вирішити цю проблему. Що стосується важких домішок, то найбільш вірогідним є утворення циклогексил-циклогексанону з циклогексену та циклогексанону. Кількість може сягати нижче 0,5% маси при роботі нижче 160 °С. Утворення важких частинок швидше відбувається в реакції дегідрування, ніж на етапі гідрування. Сукупність різних джерел показує, що загальний вихід в продуктах мінімум 98% може бути досягнутий у промислових умовах [4].

На рисунку 1.2 зображена технологічна схема процесу отримання циклогексанону шляхом рідкофазної гідрогенізації фенолу.

Рисунок 1.2 – Технологічна схема процесу отримання циклогексанону:
1, 3, 9, 11, 22, 23 – теплообмінник; 2 – випарник; 4, 24 – реактор;
5 – холодильник; 6, 12, 19 – роздільник; 7 – компресор; 8, 14, 15, 17, 20 – насос;
10, 16 – ректифікаційна колона.

Чистий та відпрацьований фенол надходить до теплообмінника 1, в якому нагрівається до температури 110 °С, після чого подається в випарник 2. В свою чергу, в цей апарат потрапляє чистий та після рециклу, через компресор 7, під тиском 200 кПа водень, який змішується в суміш. Після подачі в випарник, при

температурі 115 °С, фенол випаровується і утворює газову суміш з воднем. Отримана суміш парів з випарника 2 надходить в теплообмінник 3, де підігрівається до температури 150 °С. Підігріта суміш надходить в трубчатий каталітичний реактор 4, де відбувається процес гідрогенізації фенолу. Продукти реакції з реактора подаються в холодильник 5, де охолоджуються до температури 33 °С та конденсуються, окрім водню. Газорідинна суміш з холодильника потрапляє в сепаратор 6. Водень з сепаратора 6 надходить до компресора 7, а продукти реакції підігріваються в теплообміннику 9 та йдуть на ректифікацію. Для розділення легких та твердих фракцій, застосовують 2 ректифікаційні колони.

В колоні 10 відділяється фенол від циклогексанону й циклогексанолу, та йде в рецикл. В колоні 16 отримуємо цільовий продукт – циклогексанон, який відділяється від циклогексанолу. Циклогексанол нагрівається в теплообміннику 22, до температури 185 °С, та потрапляє в реактор 24, де відбувається дегідрогенізація до циклогексанону, та як наслідок, в результаті температури під 330 °С, утворюються проміжні продукти: циклогексен, бензол та циклогексан, які поступають на рецикл. [4]

2 Розрахунок матеріальних балансів процесу отримання циклогексанону в пакеті CHEMCAD

2.1 Опис середовища моделювання CHEMCAD 7.1.5

Програма CHEMCAD фірми Chemstations Inc призначена для статичного та динамічного моделювання хіміко-технологічних процесів та апаратів. Вона дозволяє розраховувати матеріальний і тепловий баланси гідравлічних, гідромеханічних, теплообмінних, хімічних, масообмінних процесів [1].

Дане програмне забезпечення використовується для моделювання і розрахунку технологічних схем з рециркулюючими потоками органічних і неорганічних речовин і неперервних сумішей, а також енергетичних потоків.

CHEMCAD дозволяє створювати, аналізувати і оптимізувати різні варіанти технологічного оформлення виробничих процесів, оцінювати їх ефективність і вибирати найкращий з них.

CHEMCAD включає в себе:

1. Базу даних деяких хімічних речовин за властивостями і різні методи їх прогнозування;
2. Бази даних розрахункових модулів типових процесів хімічної технології;
3. Вбудовані засоби для розрахунку конструктивних параметрів типового обладнання хімічних виробництв;
4. Засоби для проведення розрахункових досліджень і оптимізації технологічних схем хімічних виробництв;
5. Обчислювальні модулі розрахунку параметрів динамічних режимів;
6. Інструменти для розрахунку вартості обладнання хімічних виробництв [2].

Під час виконання проєкту використано CHEMCAD 7.1.5.11490 – найновіша версія на даний момент, в якій оновлено інтерфейс, збільшено базу даних речовин і типових хімічних апаратів, оптимізовано процес симуляції та розрахунку моделей.

2.2 Налаштування середовища CHEMCAD

Для початку роботи необхідно налаштувати середовище згідно з технічним завданням (ТЗ), а саме:

1. Обрати необхідні розмірності величин.
2. Обрати з бази даних речовини, що беруть участь у роботі даної схеми.
3. Задати загальні термодинамічні властивості технологічного процесу.
4. Обрати необхідні апарати для технологічної схеми.
5. Налаштувати параметри вхідних потоків та апаратів згідно ТЗ.

Виконавши усі пункти, можна запустити симуляцію процесу та отримати значення компонентів вихідних потоків.

1) Налаштування технічних розмірності

Для цього на панелі меню CHEMCAD у пункті Format необхідно вибрати Engineering Units (рис. 2.1). У спливаючому вікні можна як налаштувати розмірності величин під свої потреби, так і обрати готовий стандартизований набір величин. Для виконання схеми обрано одиниці виміру системи СІ.

Рисунок 2.1 – Вікно вибору розмірності одиниць

2) Вибір речовин для моделювання схеми

CHEMCAD містить в собі більше 6000 чистих речовин, які доступні для використання. Вікно бази даних можна викликати натиснувши на панелі інструментів кнопку Select Components, або ж обрати пункт меню Thermophysical – Select Components. За допомогою пошуку знаходимо необхідні речовини згідно з ТЗ та додаємо до проєкту (рис. 2.2).

Рисунок 2.2 – Вікно вибору компонентів

Для розрахунку схеми необхідно вибрати: фенол, циклогексанол, циклогексанон, водень, циклогексен, циклогексан, бензен та воду.

3) Налаштування термодинамічних величин

Після вибору компонентів, CHEMCAD запропонує налаштувати межі температури та тиску процесу за допомогою майстра термодинаміки (рис. 2.3). Натиснувши ОК програма вибере модель розрахунку та проінформує користувача про обрані параметри симуляції.

Рисунок 2.3 – Вікно майстра термодинаміки

4) Вибір апаратів для побудови схеми

На даному етапі налаштування середовища завершується. В правій частині робочого вікна програми знаходиться бібліотека апаратів, яка зручно розбита на категорії апаратів (рис. 2.4). Крім апаратів, присутні також піктограми вхідного (Feed) та вихідного (Product) потоків. Вони необхідні щоб задати сировину на вході процесу, та отримати цільовий продукт на виході. Також на кожен об’єкт бібліотеки можна натиснути правою кнопкою миші (ПКМ) для розгорнення списку додаткових видів того самого апарату.

Щоб обрати будь-який апарат, достатньо виділити його та перемістити на робоче поле програми. При цьому вибраній піктограмі виставляється унікальний ідентифікаційний номер (ID), який знаходиться над апаратом. З’єднання апаратів відбувається шляхом натиснення на рожеву частину апарату (вихід) та з’єднання з синьою частиною другого апарату чи об’єкта (вхід).

Рисунок 2.4 – Бібліотека апаратів CHEMCAD

5) Налаштування вхідних потоків та апаратів

Після створення схеми, кожен апарат та вхідний потік необхідно налаштувати згідно з умовами технологічного процесу. Для цього достатньо двічі натиснути на об’єкт для відкриття вікна властивостей. В спливаючому вікні задаються відомі параметри роботи об’єкту, так для вхідного потоку це може бути температура, тиск, та витрати речовин які проходять через цей потік (рис. 2.5).

Рисунок 2.5 – Вікно властивостей вхідного потоку 1

Після побудови схеми та конфігурації обладнання і потоків, запускають симуляцію процесу. Для цього необхідно натиснути кнопку Run на панелі інструментів або вибрати пункт меню Run – Run Steady State – Run All.

Процес симуляції поділяється на два етапи: перевірку вхідних даних, та безпосередньо сам процес розрахунку параметрів.

Деякі стандартні апарати містять в собі властивості обов'язкові до заповнення. На першому етапі CHEMCAD перевіряє усі властивості вибраних апаратів і якщо знаходить незаповнене обов'язкове поле – процес симуляції зупиняється і користувачу надається повідомлення про помилку та апарат в якому вона виникла.

Якщо при перевірці обладнання не виникає помилок, CHEMCAD почне симуляцію схеми. Даний процес може зайняти деякий час, тому для контролю процесу доцільно ввімкнути опцію Display trace window в налаштуваннях запуску симуляції, для наочного виду процесу розрахунку. Якщо розрахунок пройшов успішно, CHEMCAD проінформує користувача діалоговим вікном з написом «Recycle calculation has converged».

2.3 Розрахунок матеріальних балансів процесу отримання циклогексанону

Розрахунок матеріальних балансів та побудова технологічної схеми виконані в середовищі CHEMCAD 7.1.5. Складена схема складається з 21 апарату, 2 вхідних, 3 вихідних та 29 проміжних потоків (рис. 2.6).

Рисунок 2.6 – Технологічна схема процесу отримання циклогексанону

Вхідні потоки схеми - № 1 – потік фенолу та № 2 – потік водню.

Вихідні потоки схеми - № 18, 22 – потік газу на віддувку та № 23 – цільовий продукт, циклогексанон.

Під час розробки, підібрано апарати які найбільш точно описують характер реальних апаратів і найкраще підходять для симуляції даної технології. Список використаних апаратів наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Список використаних апаратів

Опис використаних блоків бібліотеки:

- Mixer – змішувач, представляє собою блок з трьома входами для змішування в один вихідний потік.
- Multipurpose Flash – багатоцільовий випарник.
- Heat Exchanger – теплообмінний апарат, використовується для теплообміну між гарячими та холодними потоками.
- Equilibrium Reactor – рівноважний реактор, призначений для розрахунку термодинамічної рівноваги в системі одночасно з матеріальним і тепловими балансами.
- Compressor – компресор здійснює подачу газу під заданим тиском в потоці.
- Component Separator – сепаратор, використовується для розділення компонентів.
- Pump – насос, використовується для переміщення рідини під заданим тиском.
- Shortcut Distillation – ректифікаційна колона, дозволяє розділити вхідну суміш на 2 і більше компонентів.

Для розрахунку схеми необхідно задати параметри для вхідних потоків. Для даної схеми, вхідними потоками живлення будуть потоки водню та фенолу. Характеристики кожного вхідного потоку зображені на рис. 2.7.

Рисунок 2.7 – Параметри вхідних потоків

Після запуску симуляції CHEMCAD розраховує кожен апарат за певною послідовністю (рис. 2.8). Результати процесу зберігаються у вигляді звітів. Доступ до них знаходиться в пункті меню Report.

Рисунок 2.8 – Порядок розрахунку апаратів

В таблицях 2.2-2.10 наведені матеріальні баланси використаних апаратів, та загальний матеріальний баланс усієї схеми.

Таблиця 2.2 – Матеріальний баланс випарника (№ 4)

Таблиця 2.3 – Матеріальний баланс реактора (№ 5)

Таблиця 2.4 – Матеріальний баланс сепаратора (№ 8)

Таблиця 2.5 – Матеріальний баланс ректифікаційної колони (№ 13)

Таблиця 2.6 – Матеріальний баланс сепаратора (№ 14)

Таблиця 2.7 – Матеріальний баланс ректифікаційної колони (№ 16)

Таблиця 2.8 – Матеріальний баланс сепаратора (№ 17)

Таблиця 2.9 – Матеріальний баланс реактора (№ 21)

Таблиця 2.10 – Загальний матеріальний баланс схеми процесу отримання циклогексанону

Продуктивність схеми – 14772,121 кг/год циклогексанону.

На основі проведених розрахунків у середовищі CHEMCAD 7.1.5 можна помітити, що сума вхідних та вихідних потоків збігаються, з чого можна зробити висновок, що матеріальний баланс процесу отримання циклогексанону розрахований вірно. Результати розрахунків наведені у додатку А.

3 Автоматизований розрахунок налаштувань регулятора

3.1 Ідентифікація коефіцієнтів передавальної функції об'єкта

Для побудови перехідної характеристики замкненої системи необхідно знайти вигляд передавальної функції об'єкта та обраного регулятора. Вхідними даними для ідентифікації параметрів є експериментальна крива (рис. 3.1) зміни температури в ректифікаційній колоні при подачі на вхід системи збурення у вигляді одиничної сходинки μ(t).

Рисунок 3.1 – Експериментальна крива зміни температури в ректифікаційній колоні

Для ідентифікації параметрів передавальної функції використано метод 2/3φ(∞) [5].

Коефіцієнти знаходяться за наступний алгоритмом:

1. На графіку перехідної характеристики визначають відрізок на осі ординат, який дорівнює $\varphi(\infty)$. В даному випадку $\varphi(\infty) = k$ та становить 1,96.
2. Знайдений відрізок $\varphi(\infty)$ ділять у співвідношенні 0,632 до 0,368. Для заданої кривої ділять вісь ординат в 123,5.
3. Проводять відрізок з точки 123,5 до точки перетину з перехідною характеристикою $\varphi(t)$.
4. Від точки перетину відрізка проводять перпендикуляр на вісь абсцис, який відтинає відрізок осі (часу) від початку координат, що дорівнює сталій часу. На даному графіку відрізок перетинає вісь абсцис в точці T = 23 [5].

З графіка перехідної характеристики видно що крива має час запізнення τ. Значенню часу запізнення буде відповідати довжина відрізку від початку координат до початку перехідного процесу τ = 5.

Згідно з рисунком 3.1 функція об'єкта має вигляд аперіодичної ланки 1-го порядку з часом запізнення. Отже, в результаті ідентифікації параметрів отримано такі значення: постійна часу T = 23 хв, час запізнення τ = 5 хв, коефіцієнт підсилення k = 1,96.

3.2 Розрахунок оптимальних налаштувань ПІД-регулятора в середовищі Mathcad

Перед установкою на об'єкті керування та в процесі експлуатації системи автоматичного регулювання необхідно провести розрахунок оптимальних параметрів налаштування регуляторів, при яких система, будучи в достатній мірі стійкою, задовольняє прийнятим показниками якості перехідного процесу [6].

Від якості настроювання регулятора залежить ефективність функціонування САР. Вибір оптимальних параметрів настроювання регуляторів є одним з найбільш важливих і складних етапів налагодження САР. Незважаючи на те, що в практику комплексної автоматизації виробничих процесів впроваджується обчислювальна техніка, вимоги до точності і якості оптимальних настроювань регуляторів не тільки не знижуються, але ще більше підвищуються через ускладнення всього комплексу управління. Оптимальні параметри регуляторів підвищують якісні та економічні показники роботи основного і допоміжного устаткування, а також надійність їх експлуатації [6].

Вхідні дані до розрахунку параметрів регулятора:

- Обраний тип регулятора: ПІД;
- Коефіцієнт підсилення k: 1,96;
- Постійна часу T: 23 хв;
- Час запізнення τ: 5 хв;
- Показник коливальності M: 1,5

Визначення налаштувань ПІД-регулятора проводять за наступним алгоритмом:

1. Будують АФХ об’єкта.
2. Задаються значенням постійної часу регулятора T_{i1}.
3. Будують АФХ розімкненої системи при $K_p = 1$ і $T_i = T_{i1}$.
4. Будують дотичну під кутом $\beta = \operatorname{asin}\left(\frac{1}{M}\right)$ до від’ємної дійсної піввісі.

5. Будують М-коло з центром на від'ємній дійсній піввісі, яке одночасно дотикається до променю і до АФХ розімкненої системи.
6. Визначають радіус отриманого кола r.
7. За формулою (3.1) визначають необхідний коефіцієнт підсилення регулятора $К_{р1}$.

$$Кр_1 = \frac{1}{r} \cdot \frac{M}{M^2 - 1} \qquad (3.1)$$

8. Таким чином отримують першу пару налаштувань ПІД-регулятора $К_{р1}$ і $Т_{і1}$ ($Т_{д1} = 0{,}5Т_{і1}$).
9. Задаються новим значенням постійної часу регулятора $Т_{і2}$ і за аналогією отримують другу пару налаштувань – $К_{р2}$ і $Т_{і2}$ ($Т_{д2} = 0{,}5Т_{і2}$).
10. Розрахунок проводять декілька разів (4 – 5 разів) в результаті чого отримують відповідне число рівноцінних пар налаштувань ПІД-регулятора.
11. За результатами розрахунків в площині параметрів налаштувань $К_р$ і $Т_і$ будується границя запасу стійкості.
12. Обирають оптимальні налаштування регулятора в цій області $К_{р_опт}$ і $Т_{і_опт}$; ($Т_{і_опт} = 0{,}5Т_{і_опт}$) [6].

Оптимальним налаштуванням регулятора буде відповідати точка в області запасу стійкості, де відношення $К_р$ / $Т_і$ буде максимальним. Цій умові задовольняє точка дотику до границі області запасу стійкості прямої, проведеної через початок координат [6].

Після визначення оптимальних налаштувань регуляторів необхідно розрахувати та побудувати перехідний процес в замкнутій САР за каналом «завдання – вихід» при отриманих оптимальних параметрах налаштування заданих регуляторів. Побудова перехідного процесу є останнім етапом проектування автоматичної системи [6].

Розрахунок параметрів ПІД-регулятора:

1) Відомі параметри передавальної функції об'єкта, які дані в умові:

$$\mathrm{T} = 23 \text{ хв};\ \mathrm{k} = 1{,}96;\ \tau = 5 \text{ хв};\ \mathrm{M} = 1.5$$

2) Передавальна функція об'єкта за умовою:

$$W_{об}(\omega) = \frac{k}{T \cdot j \cdot \omega + 1} \cdot e^{-j \cdot \omega \cdot \tau} \quad (3.2)$$

3) Передавальна функцію ПІД регулятора (при $k_p = 1$):

$$W_{reg}(\omega) = k_p \cdot (1 + \frac{1}{T_1 \cdot j \cdot \omega} + 0{,}5 \cdot T_1 \cdot j \cdot \omega) \quad (3.3)$$

4) Передавальна функція об'єкта і регулятора розімкненої системи:

$$W_{sys}(\omega) = W_{об}(\omega) \cdot W_{reg}(\omega) \quad (3.4)$$

Графік АФХ розімкненої системи (рис. 3.2):

Рисунок 3.2 - АФХ розімкненої системи з ПІД регулятором

Перша пара налаштувань:

5) Задають постійне значення $K_{p1} = 1$ та $T_1 = 1$;

6) Будують дотичну під кутом $\beta = \text{asin}\,(\frac{1}{M})$;

7) Задають значення M = 1.5 та будуть M-коло за функцією:

$$M = (\cos(\beta) + j \cdot \sin(\beta)) \cdot \frac{L1}{M} - L1 \quad (3.5)$$

8) Задають приблизне значення L так, щоб коло одночасно дотикалось до променю і АФХ системи. В даному випадку L = 67;

9) В результаті отримують графік (рис. 3.3):

Рисунок 3.3 – Перша пара налаштувань ПІД регулятора

10) Застосовуючи формулу (3.1) визначають необхідний коефіцієнт підсилення регулятора. В даному випадку $K_{p1} = 0.027$.

Провівши розрахунок ще 3 рази для $T_2 = 1{,}5$, $T_3 = 2$ та $T_4 = 3$ отримано пари значень T_i та K_p (рис. 3.4).

Рисунок 3.4 – Отримані пари налаштувань

За результатами розрахунків в площині параметрів налаштувань регулятора K_p і T_i будують границю області запасу стійкості (рис. 3.5). У цій області максимум АЧХ замкненої системи не буде перевищувати заданої величини.

Рисунок 3.5 – Границя області запасу стійкості

Будуємо графік і підбираємо параметри K_p та T_i таким чином, щоб пряма перетнула графік функції g(x) і мала найбільший кут, як можна помітити, то кращою парою налаштувань є остання T_i = 3, K_p = 0,1. Також себе можна перевірити поділивши значення K_p на $T_и$ (рис. 3.6). Максимальне значення дробу буде відповідати оптимальній парі налаштувань регулятора.

Рисунок 3.6 – Отримання оптимальних налаштувань

Для розрахунку та побудови перехідної характеристики ПІД регулятора необхідно:

1. Для початку записати всі відомі параметри передавальної функції та саму передавальну функції об'єкту (3.10)
2. Записати передавальну функцію регулятора з оптимальними налаштуваннями:

$$\mathrm{Wreg_{opt}}(\omega) = Kp_opt \cdot (1 + \frac{1}{T_{opt} \cdot j \cdot \omega} + 0{,}5 \cdot T_{opt} \cdot j \cdot \omega) \quad (3.10)$$

3. Отримати передавальну функцію замкненої системи (3.11):

$$\mathrm{W}z(\omega) = \frac{\mathrm{Wroz}(\omega)}{1+\mathrm{Wroz}(\omega)} \quad (3.11)$$

4. Отримати перехідну характеристику системи застосувавши зворотне перетворення по Лапласу, попередньо помноживши на e^{-p} і $\frac{1}{p}$:
5. Вказати діапазон та побудувати перехідну характеристику (рис. 3.7) [6].

Рисунок 3.7 – Перехідна характеристика системи з ПІД регулятором

Отже, в результаті розрахунку, визначено оптимальні налаштування для ПІД-регулятора: K_p = 0.1, T_i = 3 та $T_д$ = 1,5. Повний лістинг розрахунку наведений у додатку Б.

3.3 Розрахунок оптимальних налаштувань ПІД-регулятора в середовищі MATLAB

Розрахунок оптимальних складових регулятора в середовищі MATLAB дещо відрізняється від попередньо наведеного. Основні відмінності полягають в тому, що використовуване програмне забезпечення наглядно показує зміну

регульованого параметру системи в часі. Крім того, користувачу більше не потрібно проводити складні розрахунки для знаходження необхідних параметрів щоб задовольнити задані показники якості процесу регулювання.

Вихідні дані до розрахунку параметрів регулятора:

- Обраний тип регулятора: ПІД;
- Коефіцієнт підсилення k: 1,96;
- Постійна часу T: 23 хв;
- Час запізнення τ: 5 хв;

В даному проєкті для налаштування ПІД-регулятора використовуються наступні компоненти середовища MATLAB R2019b:

- MATLAB 9.7;
- Simulink 10.0;
- Control System Toolbox 10.7;
- Simulink Control Design 5.4

Для початку, необхідно змоделювати схему керування з використанням ПІД-регулятора в середовищі Simulink. Принцип побудови схожий з програмами будування схем типу CHEMCAD. При запуску Simulink обирається пункт створення нової схеми. Щоб додати будь-який елемент схеми на робоче поле, використовується бібліотека компонентів (рис. 3.8). Викликається шляхом натиснення на кнопку Library Browser, яка знаходиться на панелі інструментів в вкладці Simulation.

Рисунок 3.8 – Бібліотека компонентів Simulink

З даного вікна необхідно обрати наступні об’єкти:

- Step – компонент що генерує вплив на систему у вигляді одиничної сходинки (розділ Sources - Step);
- Суматор – компонент який додає сигнал від одиничної сходинки і зворотного зв’язку системи, видає на вихід нев’язку регулювання (розділ Math Operations - Sum);

- ПІД-регулятор – компонент, що використовується для усунення створеної нев’язки регулювання (розділ Continuous – PID Controller);
- Об’єкт управління – компонент над яким безпосередньо здійснюється регулювання (розділ Continuous – Transfer Fcn);
- Об’єкт запізнення сигналу – так, як в заданій системі присутнє запізнення сигналу, необхідно додати відповідний компонент (розділ Continuous – Transport Delay);
- Осцилограф – компонент для відображення графічної інформації (розділ Sinks – Scope);

Додавши вибрані компоненти, можна переходити до побудови та налаштування схеми. Для початку, в блок об’єкту управління задаємо задані параметри (рис. 3.9). Для відкриття вікна налаштувань компоненту необхідно двічі натиснути на його піктограму.

Рисунок 3.9 – Вікно налаштувань параметрів об’єкту

Після нього встановлюємо блок запізнення сигналу в якому необхідно встановити час запізнення сигналу 5 секунд. Робиться це у налаштуваннях компоненту, в рядку Time delay. Налаштування схеми завершено. Побудована модель зображена на рисунку 3.10.

Рисунок 3.10 – Побудована модель для налаштування ПІД-регулятора

Переходимо до розрахунку коефіцієнтів ПІД-регулятора. Параметри вбудованого ПІД-регулятора показані на рисунку 3.11.

Рисунок 3.11 – Параметри вбудованого ПІД-регулятора

На рисунку видно, Proportional (P) – коефіцієнт підсилення пропорційної складової, Integral (I) – коефіцієнт підсилення інтегральної складової, Derivative (D) – коефіцієнт підсилення диференціальної складової. За замовчуванням, параметри коефіцієнтів підсилення встановлені як пропорційна складова (P) – 1, інтегральна (I) – 1, диференціальна (D) – 0.

Для автоматичного налаштування коефіцієнтів ПІД-регулятора використовується кнопка Tune. В отриманому вікні будується перехідний процес об’єкта керування (рис 3.12).

Рисунок 3.12 – Вікно налаштування ПІД-регулятора

На графіку пунктирна лінія описує характери перехідного процесу об’єкту до зміни значень регулятора. Суцільна лінія показує нові налаштування перехідного процесу. Натиснувши кнопку Show Parameters (рис. 3.13) на панелі інструментів, відкривається вікно, що складається з двох областей.

Рисунок 3.13 – Вікно порівняння початкових та розрахованих параметрів

В першій області показані коефіцієнти підсилення пропорційної, інтегральної та диференціальної складових. В другій зображені параметри: rise time – час наростання, settling time – час встановлення, overshoot – величина перерегулювання, peak – пікове значення.

Впливати на характер перехідного процесу можна за допомогою чотирьох повзунків, які змінюють часові та частотні параметри (рис. 3.14). При цьому суцільна лінія на графіку в реальному часі змінюватиметься відповідно до налаштувань користувача.

Рисунок 3.14 – Повзунки налаштування показників якості регулятора

Змінюючи параметр Response time (час реакції) можна змінювати час встановлення, час наростання, перерегулювання, тим самим змінюючи час перехідного процесу. Повзунки змінюють до тих пір, поки знайдені коефіцієнти та параметри перехідного процесу не будуть задовольняти заданим показникам якості процесу.

Після знаходження оптимальних коефіцієнтів підсилення ПІД-регулятора для заданої системи отримуємо:

- Пропорційний коефіцієнт підсилення дорівнює 1,7215;
- Інтегральний коефіцієнт підсилення дорівнює 0,0372;

- Диференціальний коефіцієнт підсилення дорівнює 1,8528.

Графік перехідної характеристики системи з розрахованими параметрами ПІД-регулятора зображено на рисунку 3.15.

Рисунок 3.15 – Перехідна характеристика системи

Занесемо знайдені показники якості до таблиці та порівняємо з параметрами, знайденими в середовищі Mathcad (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Порівняння значень отриманих показників якості

Знайдені значення показників якості в середовищі MATLAB краще задовольняють вимогам до системи, про що свідчить показник відносного перерегулювання 6,93 % порівняно з 18 %, зменшена динамічна похибка з значення 1,18 до 1,07, та швидший перехідний процес, час якого зменшився з 92 с до 25,8 с.

3.4 Програмне забезпечення для розрахунку налаштувань ПІД-регулятора

Програмний модуль для визначення оптимальних налаштувань регулятора реалізовано у вигляді веб-додатку (Single-page application) з застосуванням мови програмування JavaScript. Вибір технології обумовлений поставленою задачею. Метод розрахунку є графо-аналітичний, тому засоби програмування підібрані через зручність створення графічних інтерфейсів та гнучкості програмного середовища.

Під час розробки веб-додатку використано наступні інструменти:

1. Мова гіпертекстової розмітки HTML 5.
2. Каскадні таблиці стилів CSS 3.
3. Мова програмування JavaScript (ES6).
4. Препроцесор SCSS;
5. Бібліотека для гнучких графіків Chart.js.
6. Бібліотека для запису математичних формул Katex.
7. Середовище розробки Visual Studio Code 1.45.1

Додаток розраховує оптимальні пари налаштувань ПІД-регулятора для заданих коефіцієнтів ланки та сталих часу T_i. Після розрахунку користувачеві надаються результати: графічна інформація у вигляді чотирьох графіків, по одному на кожну пару налаштувань регулятора, та формули передавальної функції об’єкту і регулятора з оптимальними значеннями.

Після завантаження сторінки користувачеві доступна форма введення значень для проведення розрахунку (рис. 3.16):

Рисунок 3.16 – Форма введення даних для розрахунку

Дана форма містить поля для введення коефіцієнту підсилення k, сталої часу T, часу запізнення τ, показника коливальності M. Значення T_{i1}-T_{i4} це сталі часу, які використовуються для підбору оптимальних налаштувань ПІД-регулятора. Всі показники, пов’язані з часом, вводяться в розмірності хвилини.

За рахунок підбору сталих часу виконується перерахунок коефіцієнту підсилення та будуються відповідні М-кола, що одночасно дотикаються до АФХ об’єкта та до променю.

Усі поля можна заповнити без використання клавіатури, за допомогою кнопок більше та менше які з’являються з правого боку поля під час наведення на нього. Також, для зручності та орієнтації користувача вбудовано підказку для введення у вигляді тексту сірого кольору (рис. 3.17).

Нижче полів введення розташовано три кнопки:

1. Очистити – очищає усі поля введення для наступного розрахунку.
2. Приклад – поля форми заповнюються тестовими значення для розрахунку параметрів регулятора.
3. Розрахувати – ініціює процес розрахунку налаштувань регулятора.

Для проведення розрахунку, необхідно заповнити усі поля форми необхідними значеннями, або скористатися тестовими значеннями. Якщо деякі поля не будуть містити значення, розрахунок не буде проведено, натомість додаток проінформує користувача для введення пустого поля (рис. 3.17).

Рисунок 3.17 – Підказка пустого поля та кнопки заповнення поля

Після успішної перевірки даних, програма почне визначати налаштування регулятора за заданим алгоритмом. Індикатором кінця розрахунку для користувача є поява графіків та формул на сторінці (рис. 3.18). Додаток будує чотири послідовних графіки для чотирьох варіантів налаштувань регулятора в залежності від зміни сталої часу регулятора. Для зручності перегляду, присутня функція масштабування та перетягування графічного поля за допомогою коліщатка миші, для перегляду правильності дотику М-кола до АФХ об’єкта та дотичної (рис. 3.19). Функція збільшення/зменшення працює для кожного графіку окремо, що дає можливість зручно сприймати інформацію. Також присутня кнопка «Скинути масштабування», яка також працює незалежно від інших графіків, дозволяє відновити масштабування до 100%. Крім того, для зручності

дослідження кривих, додано функцію виведення координат при наведені на точку даних побудови (рис. 3.20).

Рисунок 3.18 – Графік для першої пари налаштувань

Рисунок 3.19 – Функція масштабування графіку

Рисунок 3.20 – Спливаюча підказка при наведені на точку кривої

Під усіма графіками знаходиться блок формул передавальної функції об’єкта та регулятора з розрахованими оптимальними значеннями налаштувань (рис. 3.21).

Рисунок 3.21 – Область виведення розрахованих значень регулятора

Дана секція додатку показує розраховані значення налаштувань ПІД-регулятора для заданої ланки (в даному випадку: аперіодична ланка 1 порядку з запізненням). Дані формули використовуються для побудови передавальної функції замкненої системи, по каналу завдання-вихід.

З другої формули видно, розраховані коефіцієнти:

- Пропорційний коефіцієнт підсилення $K_p = 0.1$;
- Інтегральний коефіцієнт підсилення $T_i = 3$;
- Диференціальний коефіцієнт підсилення $T_д = 1,5$.

Після закінчення розрахунку та виведення графічної результатів, користувачу показується додаткове вікно з розрахованими коефіцієнтами (рис. 3.22). Дане вікно використовується при поганому з’єднанні з мережею, якщо не можна відобразити основну графічну інформацію звичайним шляхом.

Рисунок 3.22 – Вікно виведення розрахованих коефіцієнтів

Провівши порівняння розрахованих параметрів та значень, знайдених в середовищі Mathcad, видно, що значення співпадають між собою, з чого можна зробити висновок, що створений обчислювальний модуль правильно виконує свої функції, згідно вбудованого алгоритму розрахунку.

Блок схему алгоритму та вихідний код модуля наведено в додатках В та Г відповідно.

4 Автоматизація технологічної схеми процесу отримання циклогексанону

Автоматизація виробництва є вищим рівнем розвитку промислової технології. Це процес, в якому функції контролю та керування вимагають значно меншої частки залучення людини ніж як це було раніше. Введення автоматизації на підприємстві дозволяє збільшити ефективність праці, забезпечити стабільний вихід цільового продукту, та зменшити кількість робочого персоналу, оскільки основні функції виконуються автоматичними пристроями та програмним забезпеченням. На сучасному етапі розвитку автоматизації виробництва з'явилося якісно нове обладнання, яке може варіюватися від простих датчиків до автономних роботів та іншого складного обладнання [7].

Хімічна промисловість займає окрему нішу у сфері автоматизації. Адже отримання деяких товарів і продуктів, які створюються хімічним шляхом, має специфічні особливості. Контролером в системах автоматизації хімічних виробництв називають невеликий пристрій, що виконує управління фізичними процесами та контроль над ними. Це здійснюється завдяки попередньо закладеному в контролер алгоритму дій і даних, що передають спеціальні датчики для подальшого виведення інформації на інші пристрої виконавчого типу. Контролери для автоматизації в хімічній промисловості бувають наступних видів:

- Програмовані контролери логічного типу;
- Розподілені керуючі системи;
- Контролери, які створюються на базі комп'ютерних технологій [8].

У хімічній промисловості контролери встановлюють для управління агрегатами, дозувальними установками, апаратами, які змішують різні компоненти і продукти між собою, а також процесами переробки пластичних мас і різних відходів після основного виробництва [8].

4.1 Аналіз параметрів технологічної схеми

Аналіз технологічної схеми показав, що мета цієї схеми є отримання кінцевого продукту заданої кількості та концентрації. На якість та кількість цільового продукту – циклогексанону, найбільше впливає реактор гідрогенізації (поз. IV). Для автоматизації цього апарату необхідно регулювати подачу суміші та температуру водяного агенту на вході до реактора, а також контролювати тиск всередині апарату. Крім того, для забезпечення необхідної продуктивності виробництва необхідно регулювати наступні параметри:

- Витрату потоків фенолу та водню на вході до випарника;
- Витрати суміші речовин на вході до ректифікаційних колон;
- Витрати газів, що поступають на віддувку після ректифікаційних колон;
- Витрату цільового продукту – циклогексанону;
- Тиск в ректифікаційних колонах;
- Температуру потоку після теплообмінників та холодильника;

Також необхідно контролювати деякі проміжні потоки, рівень суміші в випарнику, тиск у випарнику, реакторі гідрогенізації, температуру суміші у випарнику, ректифікаційних колонах та в реакторі дегідрогенізації.

Відповідно до обраних параметрів регулювання та контролю, обрано місця на технологічних апаратах для заміру необхідних величин. Отримані дані та номінальні значення параметрів занесено до таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри регулювання та контролю виробництва

Таблиця 4.1 – Параметри регулювання та контролю виробництва (продовження)

Таблиця 4.1 – Параметри регулювання та контролю виробництва (продовження)

На основі даних, що наведені в таблиці 4.1, спроектовано та реалізована схема автоматизації процесу отримання циклогексанону, яка містить ряд контурів регулювання, сигналізації, контролю таких параметрів як: витрата, тиск, температура, рівень та живлення електромоторів. Розроблена схема зображена на рисунку 4.1.

На основі каталогів відповідних виробників підібрано технічні засоби автоматизації для функціонування розроблених схем [9-17].

Специфікація на обрані прилади наведена у таблиці додатку Ґ. Монтажне креслення термометра опору ТСМ-1187 в ректифікаційну колону та специфікація кресленика наведені в додатках Д та Е відповідно.

4.2 Опис системи автоматизації

4.2.1 Контури контролю та регулювання витрати

Для контролю витрат у контурах 4, 5, 7, 11, 15, 16 використовується витратомір марки US-800, який використовується як лічильний рідин. Максимальна температура та тиск вимірювального середовища до 200 °С та до 2,5 МПа відповідно. Діаметр умовного проходу 100 мм. Прилад містить в собі вбудований первинний перетворювач (поз. 4-1, 5-1, 7-1, 11-1, 15-1, 16-1) з вихідним струмом 4 – 20 мА; та вторинний перетворювач (поз. 4-2, 5-2, 7-2, 11-2, 15-2, 16-2).

Для контролю і регулювання витрат у контурах 1, 2, 3, 6, 8, 9, 10, 12, 13, 14 використовується витратомір OPTISONIC 7300. Похибка вимірювання складає ±1% . Максимальна температура та тиск вимірювального середовища до 180 °С та до 1,5 МПа відповідно. Містить в собі первинний (поз. 1-1, 2-1, 3-1, 6-1, 8-1, 9-1, 10-1, 12-1, 13-1, 14-1) з уніфікованим виходом 4 – 20 мА, та вторинний (поз. 1-2, 2-2, 3-2, 6-2, 8-2, 9-2, 10-2, 12-2, 13-2, 14-2) перетворювачі.

Сигнали з витратомірів передаються на ПІД – регулятор показуючого типу марки ТРМ10 (поз. 1-3, 2-3, 3-3, 6-3, 8-3, 9-3, 10-3, 12-3, 13-3, 14-3), який показує виміряну величину та здійснює регулюючий вплив на виконавчий механізм марки МЭО-40 (поз. 1-4, 2-4, 3-4, 6-4, 8-4, 9-4, 10-4, 12-4, 13-4, 14-4).

4.2.2 Контури контролю та регулювання тиску

Для контролю тиску в контурах 17, 18, 19, 20 використовується манометр РС-28 (поз. 17-1, 18-1, 19-1, 20-1). Діапазон вимірювання тиску від 0 до 4 МПа. Вихідний сигнал перетворювача 4 – 20 мА. Манометр передає виміряний сигнал

на ПІД – регулятор марки ТРМ10 (поз. 17-2, 18-2, 19-2, 20-2), який для контурів 17, 18 використовується для контролю над параметром, а для контурів 19, 20 для сигналізації верхньої межі тиску та регулювання тиску в ректифікаційних колонах. Регулюючий вплив з регулятора подається на виконавчий механізм марки МЭО-40 (поз. 19-3, 20-3) для керування заслінками. Для сигналізації верхньої межі тиску використовуються індикаторні лампи марки ЛС47 (поз. HL1, HL2).

4.2.3 Контури контролю та регулювання температури

Для контролю температури в контурах 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 використовується термометр опору ТСМ-1187 (поз. 21-1, 22-1, 23-1, 24-1, 25-1, 26-1, 27-1, 28-1, 29-1, 30-1) з робочим діапазоном вимірювання від -50 °С до 500 °С. Дозволяє виконувати вимірювання з малою похибкою та має уніфікований вихідний сигнал зі струмом 4 – 20 мА. Сигнал з термоперетворювача передається на показуючий ПІД – регулятора марки ТРМ10 (поз. 21-2, 22-2, 23-2, 24-2, 25-2, 26-2, 27-2, 28-2, 29-2, 30-2), який показує виміряну температуру, а в контурах регулювання надає регулюючий влив на виконавчий механізм марки МЭО-40 (поз. 21-3, 23-3, 24-3, 25-3, 26-3, 29-3) для керування заслінками.

4.2.4 Контур контролю рівня

Для контролю рівня в випарнику (контур 31) використовується ємнісний рівнемір CLM-36, який використовується для неперервного вимірювання рівня рідини для діапазону температур від -40 °С до 200 °С. Прилад містить в собі вбудований первинний перетворювач з уніфікованим вихідним сигналом 4 – 20 мА (поз. 31-1). Похибка вимірювання рівня складає ±1%. Отриманий сигнал з рівнеміру передається на показуючий ПІД – регулятор марки ТРМ10 (поз. 31-2), для відображення виміряного рівня в випарнику. Також регулятор використовується для сигналізації верхнього рівня суміші в апараті. Для відображення граничного рівня використовується лампа ЛС47 (поз. HL3).

4.2.5 Контури керування живленням електромоторів

Вмикання живлення електромотору насосів (поз. 32-1, 34-1, 35-1, 36-1, 37-1) та компресора (поз. 33-1) виконується за допомогою нормально розімкненої кнопки (поз. 32-5, 33-5, 34-5, 35-5, 36-5, 37-5). В момент натиснення кнопки вмикається індикаторна лампа ЛС47 (поз. HL5, HL7, HL9, HL11, HL13, HL15), яка свідчить про подачу живлення на електромотор. Вимикання живлення відбувається за допомогою нормально замкненої кнопки (поз. 32-4, 33-4, 34-4, 35-4, 36-4, 37-4). При цьому загоряється лампа ЛС47 (поз. HL4, HL6, HL8, HL10, HL12, HL14), яка свідчить про виключення подачі живлення на електромотор. Кнопки керують подачею струму на магнітний пускач (поз. 32-2, 33-2, 34-2, 35-2, 36-2, 37-2), який в свою чергу подає силове навантаження на включення електромоторів. Вимикачі (поз. 32-3, 33-3, 34-3, 35-3, 36-3, 37-3) використовуються для аварійного відключення магнітних пускачів для діагностики чи ремонту. Для реалізації дистанційного керування живленням використовується магнітний пускач ПМЛ-3720 з номінальним струмом 40А, з режимом роботи одна або три фази, та підключення типу зірку чи трикутник.

Розроблена схема автоматизації забезпечить проведення технологічного процесу отримання циклогексанону згідно з технологічним регламентом виробництва.

5 Економіко-організаційні розрахунки процесу отримання циклогексанону

У дипломному проєкті розглядається підприємство, що спеціалізується на виробництві циклогексанону.

Циклогексанон – органічна речовина, представник кетонів з формулою $C_6H_{10}O$, безбарвна масляниста летка рідина з неприємним запахом ацетону і м'яти. За звичайних умов слабкорозчинна у воді, але легко розчинюється у звичайних органічних розчинниках. Циклогексанон є важливою сировиною у виробництві нейлону через виробництво капролактаму, тому його щорічне виробництво складає мільйони тон. Також використовується як промисловий розчинник з'єднань целюлози, полівінілхлориду, жирів, восків, масл, клеїв, резин різного походження.

В даному розділі описано розрахунок основних техніко-економічних показників процесу отримання циклогексанону, на основі яких можна буде зробити висновок щодо доцільності впровадження даного підприємства.

5.1 Визначення оптимального виду руху предметів праці

Види руху предметів праці (ВРПП) – це порядок проходження предмету праці через всі стадії виробничого циклу. Виділяють наступні види ВРПП:

- Послідовний;
- Паралельний;
- Синхронізований.

Розглянутий процес отримання циклогексанону має безперервний режим роботи. На вхід до технологічної схеми надходить 14500 кг фенолу та 628 кг водню. На один цикл на виході отримуємо 14772 кг або ж 14,772 тон цільового продукту – циклогексанону. Тривалість виробничого процесу згідно комп'ютерного розрахунку виробництва складає 60 хв.

Виробництво цільового продукту способом рідкофазної гідрогенізації фенолу включає в себе роботу 24 різних апаратів, а саме: 6 теплообмінників, випарник, 2 хімічних реактори, 3 сепаратори, компресор, 5 насосів, 2

ректифікаційні колони. Загальна потужність виробництва за технологічної схемою складає 120 000 тон циклогексанону на рік. Згідно з розрахунків комп'ютерного моделювання дане виробництво має високі вимоги до проведення технологічних процесів. Тому, усі перелічені апарати обираються для розрахунку економічних показників.

Так як час роботи окремих процесів невідомий, згрупуємо ключові апарати, з чого отримуємо такі операції виробництва:

1. Робота випарника, реактора гідрогенізації (20 хв.)
2. Робота першої ректифікаційної колони (15 хв.).
3. Робота другої ректифікаційної колони (15 хв.).
4. Робота реактора дегідрогенізації (10 хв.).

Оптимальним видом руху предметів праці обираємо послідовний, через складність виробництва та великі об'єми сировини та продуктів.

На першій операції виробництва беруть участь 9 апаратів за технологічною схемою. На другій – 6 одиниць, на третій – 6 одиниць, на четвертій – 3 одиниці обладнання. Всього за обраним послідовним ВРПП кількість обладнання складає 24 технологічних апарати, а оптимальним числом осіб буде 1 особа.

При послідовному ВРПП обробка продукції відбувається послідовно на кожній стадії з наступною передачею продукції на наступну стадію.

Тривалість виробничого циклу складає 60 хв, оскільки виробництво безперервне та працює в 3 зміни по 8 годин без перерв. Це дає можливість за одну робочу зміну завершити 8 циклів виробництва цільового продукту.

Планова потужність виробництва згідно технологічної схеми складає 120 000 тон продукції на рік. Розрахуємо тривалість виробничого циклу за одне завантаження:

$$T_{ВЦ} = \sum_{i=1}^{n} t_i = 20 + 15 + 15 + 10 = 60 \text{ хв} = 1 \text{ год};$$

Графік ВРПП для процесу отримання циклогексанону зображений на рисунку 5.1.

Рисунок 5.1 – Вид руху предметів праці послідовного типу

Кількість завантажень В за одну робочу зміну, при умові тривалості зміни 8 год, дорівнює:

$$В = \frac{Т_{роб.дня}}{Т_{ВЦ}} = \frac{8}{1} = 8 \text{ разів};$$

При умові тривалості виробничого циклу в 60 хв за одну робочу зміну підприємство виконає 8 завантажень.

Згідно з комп'ютерним розрахунком технологічного процесу, виробіток цільового продукту за годину становить:

$$В_{год} = 14772 \frac{кг}{год} = 14{,}772 \ \frac{тон}{год};$$

Тому, за одну робочу зміну, підприємство виробляє:

$$В_{зміна} = 14{,}772 \cdot 8 = 118{,}176 \ \frac{тон}{зміну};$$

За добу:

$$В_{доба} = 14{,}772 \cdot 8 \cdot 3 = 354{,}528 \ \frac{тон}{добу};$$

Через технологічні вимоги до продуктивності виробництва, підприємство працює щодня у три зміни по 8 годин кожна. Кількість робочих днів у році складає 350 днів, 15 днів відведено на заплановані роботи ТОРО. Загальна тривалість роботи виробництва на рік:

$$Т_{підп}^{рік} = 350 \cdot 24 = 8400 \ \frac{год}{рік};$$

При цьому об'єми виробництва підприємства за рік:

$$В_{рік} = 14{,}772 \cdot 24 \cdot 350 = \ 124\,084{,}8 \frac{тон}{рік};$$

5.2 Організація працівників на підприємстві

Тривалість виробничого циклу складає 60 хв, за одну зміну виконується 8 циклів завантаження сировини. Так як виробництво безперервне, отримуємо 3 робочі зміни по 8 годин кожна. Умови праці на підприємстві – нормальні.

На виробництві обов'язковими працівниками, які необхідні для виконання відповідного обсягу робіт і повної комплектації робочих місць протягом зміни, є:

- Начальник зміни.
- Два оператори.
- Слюсар.
- Пакувальник.

На підставі цього, приймемо чисельність явочну за одну робочу зміну: $Ч_{яв}$ = 5 осіб. Тобто, за 3 зміни $Ч_{яв}$ = 15 осіб. Крім цього на підприємстві працюють інженер, технолог, бухгалтер та прибиральниця. Перелік посад, кількість працівників та їх заробітна плата наведена в таблиці 5.1.

Для розрахунку чисельності персоналу за списком, розрахуємо тривалість роботи одного працівника у нормальних умовах праці:

$$Т_{прац}^{рік} = \frac{365 - Т_{св}}{7} \cdot 40 - Т_{св}{}^{*} \cdot 1 = \frac{365 - 11}{7} \cdot 40 - 8 \cdot 1 = 2015\ \frac{год}{рік};$$

Таблиця 5.1 – Список працівників на підприємстві

Тривалість виробничого циклу складає 60 хв, та складається з 4 операцій, оскільки підприємство безперервне а умови праці нормальні, маємо 3 зміни по 8 годин.

Крім виробничого персоналу, на підприємстві працюють: інженер, технолог, бухгалтер та прибиральниця. Тому, чисельність за списком (враховуючи додатковий персонал):

$$Ч_{сп} = Ч_{яв} \cdot \frac{T_{підп}^{рік}}{T_{прац}^{рік}} = 5 \cdot \frac{8400}{2015} + 4 = 24 \text{ осіб};$$

Кількість прибиральниць обумовлено заміщенням один одної, в разі захворювання чи відсутності на робочому місці з інших поважних причин.

Розклад змін на підприємстві:

- Перша зміна: 8:00 – 16:00;
- Друга зміна: 16:00 – 00:00;
- Третя зміна: 00:00 – 8:00.

Розрахуємо кількість бригад для забезпечення безперервного виробництва:

$$N_{бриг} = \frac{T_{підп}^{рік}}{T_{прац}^{рік}} = \frac{8400}{2015} = 4{,}17 \approx 4 \text{ бригади};$$

Складемо графік змінності виробничого персоналу (табл. 5.2).

Таблиця 5.2 – Графік змінності виробничого персоналу

Фактичний час напрацювання кожного працівника:

$$T_{прац.}^{рік\ факт.} = \frac{350}{T_{зм.об.}}(T_{зм.об.} - T_{вих.}) \cdot T_{змін} = \frac{350}{16}(16 - 4) \cdot 8 = 2100\ \frac{год}{рік};$$

де $T_{зм.об.}$ – змінооборот графіку, дні; $T_{вих}$ – кількість вихідних, дні; $T_{змін}$ – тривалість зміни, год.

Розраховуємо час перепрацювання робітника:

$$T_{перепрац} = 2100 - 2015 = 85\ \frac{год}{рік};$$

Графік змінності обслуговуючого персоналу (табл. 5.3).

Таблиця 5.3 – Графік змінності обслуговуючого персоналу

Фактичний час напрацювання адміністративного персоналу:

$$T_{\text{прац.}}^{\text{рік факт.}} = \frac{350}{T_{\text{зм.об.}}}(T_{\text{зм.об.}} - T_{\text{вих.}}) \cdot T_{\text{змін}} = \frac{350}{7}(7-2) \cdot 8 = 2000 \text{ год};$$

де $T_{\text{зм.об.}}$ – змінооборот графіку, дні; $T_{\text{вих}}$ – кількість вихідних, дні; $T_{\text{змін}}$ – тривалість зміни, год.

Розраховуємо час недопрацювання робітника:

$$T_{\text{недопрац}} = 2015 - 2000 = 15\ \frac{\text{год}}{\text{рік}};$$

Перепрацювання кожного працівника враховано при нарахуванні заробітної плати.

Фонд оплати праці підприємства за рік (ФОП):

$$\text{ФОП} = 12 \cdot \text{ЗП} \cdot \text{ЄСВ} = 12 \cdot\ 284\,400\ \cdot 1{,}22 = 4\,163\,616\ \frac{\text{грн}}{\text{рік}}.$$

де, ЗП – заробітна плата, грн/міс, ЄСВ – відрахування на соціальні заходи, 22%

Технічний контроль – сукупність методів, заходів і заходів, які забезпечують відповідність якості продукції, яка виготовляється за вимогами стандартів та нормативів. Об’єктом технічного контролю є технологічний процес. Контроль поділяють на вхідний, проміжний, заключний.

Вхідний контроль – перевірка якості продукції, що надходить на підприємство, як сировина. На даному підприємстві, це перевірка якості фенолу, та водню. Контроль проводить начальник зміни. Для обліку ведеться журнал проведення вхідного контролю.

Проміжний контроль – перевірка правильності проходження процесів при виконання технологічного процесу. Виконується інженером. Для обліку ведеться журнал проміжного контролю.

Заключний контроль – перевірка якості готової продукції, циклогексанону. Проводить технолог, який відбраковує неякісну продукцію. Для обліку ведеться журнал заключного контролю.

5.3 Основні техніко-економічні показники виробництва циклогексанону

В таблиці 5.4 наведено затрати підприємства на сировину.

Таблиця 5.4 – Вартість сировини для виробництва циклогексанону

Отже, згідно вищенаведеної таблиці, річні затрати підприємства на сировину складають: $З_с$ = 7 577 576 464 грн/рік.

Витрати на електроенергію:

Підприємство працює цілодобово протягом 350 днів, тобто 8400 год. Сумарна потужність обладнання цеху 9000 кВт/год. За регульованим тарифом з 1 березня 2020 року, ціна в денний час: 2,5 грн за 1 кВт*год, в нічний час: 1,25 грн за 1 кВт*год. Отже, річні витрати на електроенергію:

$$З_{е/е} = (2{,}5 \cdot 4200 \cdot 9000) + (1{,}25 \cdot 4200 \cdot 9000) = 141\,750\,000\ \frac{грн}{рік};$$

Витрати на опалення:

Загальна площа виробничого приміщення 2000 м^2; Тариф на опалення складає 31.55 грн/м^2 за місяць. Тривалість опалювання: 6 місяців. Отже витрати підприємства на опалення цеху:

$$З_{опал} = 2000 \cdot 31{,}55 \cdot 6 = 378\,600\ \frac{грн}{рік};$$

Таким чином, вартість оборотних засобів складає:

$$ОбЗ = З_с + З_{е/е} + З_{опал} + ФОП = 7\,577\,576\,464 +$$

$$+ 141\,750\,000 + 378\,600 + 4\,163\,616 = 7\,723\,868\,680\ \frac{грн}{рік};$$

В таблиці 5.5 наведено вартість основних фондів (ОЗ), що використовуються на підприємстві.

Таблиця 5.5 – Розрахунок вартості основних фондів

Згідно з таблиці 5.5:

- Вартість ОЗ: 18 509 000 грн;
- Амортизаційні відрахування ОЗ: 1 169 300 грн/рік.

Отже собівартість продукції складає:

$$С = А + ОбЗ = 1\,169\,300 + 7\,723\,868\,680 = 7\,725\,037\,980\ \frac{грн}{рік};$$

Калькуляція затрат на виробництво циклогексанону наведена в таблиці 5.6

Таблиця 5.6 – Калькуляція витрат на виробництво

Ціна річного випуску продукції:

Ринкова ціна за один кг циклогексанону складає: 150 грн/кг або ж 150 000 грн/тону.

$$Ц = Ц_{од} \cdot В_{рік} = 150\,000 \cdot\ 124\,084{,}8 = 18\,612\,720\,000\ \frac{грн}{рік};$$

Перед розрахунком наступних показників, переведемо виробничу собівартість у повну за формулою:

$$С_п = С_в + Накладні;$$

Накладні – витрати на утримання загальнозаводської адміністрації та інші загальнозаводські витрати. Приймемо розмір накладних в 100% від виробничої собівартості. В результаті повна собівартість складатиме:

$$С_п = С_в \cdot 2 = 7\,725\,037\,980 \cdot 2 = 15\,450\,075\,961\ \frac{грн}{рік};$$

Собівартість одного кілограму продукції:

$$С_{од} = \frac{С_п}{В_{рік}} = \frac{15\,450\,075\,961}{124\,084{,}8 \cdot 1000} = 124{,}51\ \frac{грн}{кг};$$

Прибуток підприємства:

$$П = Ц - С_п = 18\,612\,720\,000 - 15\,450\,075\,961 =\ 3\,162\,644\,039\ \frac{грн}{рік};$$

Капіталовкладення:

$$К = ОЗ + ОбЗ =\ 18\,509\,000 + 7\,723\,868\,680 =\ 7\,742\,377\,680\ грн;$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$Е = \frac{П}{К} = \frac{3\,162\,644\,039}{7\,742\,377\,680} =\ 0{,}408;$$

Рентабельність виробництва:

$$Р = \frac{П}{С_п} = \frac{3\,162\,644\,039}{15\,450\,075\,961} \cdot 100\% = 20{,}48\%;$$

Період повернення капіталовкладень:

$$Т_{пов} = \frac{К}{П} = \frac{7\ 742\ 377\ 680}{3\ 162\ 644\ 039} = 2{,}4 \text{ роки} = 894 \text{ дня};$$

Фондовіддача основних засобів підприємства:

$$ФВ = \frac{В_{рік}}{ОЗ} = \frac{18\ 612\ 720\ 000}{18\ 509\ 000} = 1\ 005{,}60\ \frac{грн}{грн};$$

Фондоємність:

$$ФЕ = \frac{1}{ФВ} = \frac{1}{1\ 005{,}60} = 0{,}001\ \frac{грн}{грн};$$

В таблиці 5.7 наведено основні техніко-економічні показники підприємства з виробництва циклогексанону.

Таблиця 5.7 – Основні техніко-економічні показники

В результаті розрахунків, можна зробити висновок, що дане підприємство є прибутковим.

Проведемо розрахунок техніко-економічних показників підприємства, в якому впроваджена автоматизація проведення технологічного процесу отримання циклогексанону. Запропоновані заходи сприяють покращенню якості цільового продукту та безпеки проходження технологічного процесу для персоналу.

Так як частиною процесу керує не людина, а програмовані прилади, кількість персоналу зменшилась, а саме кількість операторів за одну зміну зменшилось з 2 осіб до 1, тобто персонал складається з: начальника зміни, оператора, слюсаря та пакувальника. На підставі цього, приймемо чисельність явочну за одну робочу зміну: $Ч_{яв}$ = 4 особи.

Тому, чисельність за списком (враховуючи додатковий персонал):

$$Ч_{сп} = Ч_{яв} \cdot \frac{Т_{підп}^{рік}}{Т_{прац}^{рік}} = 4 \cdot \frac{8400}{2015} + 4 = 20 \text{ осіб};$$

Відповідно витрати на нарахування заробітної плати зменшилось з 284 000 грн/міс до 241 200 грн/міс.

Перелік осіб, що працюють на підприємстві після впровадження автоматизації наведений в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Персонал підприємства після впровадження автоматизації

Крім того, до переліку основних засобів додано вартість засобів автоматизації, які необхідні для досягнення необхідного рівня керування на підприємстві. Список засобів автоматизації наведено в таблиці 5.9.

Таблиця 5.9 – Перелік необхідних приладів автоматизації

Повторимо розрахунок техніко-економічних показників:

Фонд оплати праці підприємства за рік (ФОП):

$$ФОП = 12 \cdot ЗП \cdot ЄСВ = 12 \cdot 241\,200 \cdot 1{,}22 = 3\,531\,168\ \frac{грн}{рік};$$

Вартість оборотних засобів складає:

$$ОбЗ = З_с + З_{е/е} + З_{опал} + ФОП = 7\,577\,576\,464 +$$

$$+ 141\,750\,000 + 378\,600 + 3\,531\,168 = 7\,723\,236\,232\ \frac{грн}{рік};$$

Вартість основних засобів:

$$ОЗ = 18\,509\,000 + 674\,450 = 19\,183\,450\ грн$$

Амортизаційні відрахування:

$$А = 1\,169\,300 + 337\,225 = 1\,506\,525\ \frac{грн}{рік};$$

Тоді, собівартість складає:

$$С = А + ОбЗ = 1\,506\,525 + 7\,723\,236\,232 = 7\,724\,742\,757\ \frac{грн}{рік};$$

Ціна продукції за рік, враховуючи націнку 5% за рахунок впровадження автоматизації:

$$Ц = Ц_{од} \cdot В_{рік} = 158\,000 \cdot 124\,084{,}8 = 19\,543\,356\,000\ \frac{грн}{рік};$$

Переведемо виробничу собівартість у повну. Приймемо розмір накладних в 100% від виробничої собівартості. Тоді, повна собівартість складатиме:

$$С_п = С_в \cdot 2 = 7\,724\,742\,757 \cdot 2 = 15\,449\,485\,515\ \frac{грн}{рік};$$

Собівартість одного кілограму продукції:

$$С_{од} = \frac{С_п}{В_{рік}} = \frac{15\,449\,485\,515}{124\,084{,}8\ \cdot 1000} = 124{,}51\ \frac{грн}{кг};$$

Прибуток підприємства:

$$П = Ц - С_п = 19\,543\,356\,000 - 15\,449\,485\,515 = 4\,093\,870\,485\ \frac{грн}{рік};$$

Капіталовкладення:

$$К = ОЗ + ОбЗ = \ 19\,183\,450 + 7\,723\,236\,232 = 7\,742\,419\,682\ грн;$$

Коефіцієнт економічної ефективності:

$$Е = \frac{П}{К} = \frac{4\,093\,870\,485}{7\,742\,419\,682} = 0{,}529;$$

Рентабельність виробництва:

$$Р = \frac{П}{С_п} = \frac{4\,093\,870\,485}{15\,449\,485\,515} \cdot 100\% = 26{,}50\%;$$

Період повернення капіталовкладень:

$$Т_{пов} = \frac{К}{П} = \frac{7\,742\,419\,682}{4\,093\,870\,485} = 1{,}9\ року = 690\ днів;$$

Фондовіддача основних засобів підприємства:

$$ФВ = \frac{В_{рік}}{ОЗ} = \frac{19\,543\,356\,000}{19\,183\,450} = 1\,018{,}76\ \frac{грн}{грн};$$

Фондоємність:

$$ФЕ = \frac{1}{ФВ} = \frac{1}{1\,018{,}76} = 0{,}001\ \frac{грн}{грн};$$

Розраховані показники занесено до таблиці 5.10.

Таблиця 5.10 – Основні техніко-економічні показники автоматизованого підприємства з виробництва

За знайденими техніко-економічними показниками можна зробити висновок, що підприємство після автоматизації є більш прибутковим, про що свідчить збільшення прибутковості та рентабельності виробництва, тобто автоматизація даного виробництва має сенс. Кресленик порівняльної таблиці

техніко-економічних показників виробництва до та після провадження автоматизації, наведений у додатку Ж.

6 Охорона праці

При реалізації даного проєкту, в реакціях процесу отримання циклогексанону гідрогенізацією фенолу, протікають токсичні та вибухонебезпечні речовини. Передбачено використання механічної, електричної, теплової енергії та енергії стисненого повітря. Проєктні рішення прийнято з урахуванням вимог охорони праці.

В даному розділі на підставі аналізу шкідливих та небезпечних виробничих факторів, що виявлено на проектованому об'єкті, розроблено комплекс заходів, направлених на створення здорових і безпечних умов праці та пожежної безпеки.

6.1 Виявлення і аналіз шкідливих і небезпечних виробничих факторів на проектованому об’єкті. Заходи з охорони праці

6.1.1 Повітря робочої зони

Згідно з відомостями санітарних норм ДСН 3.3.6.042-99, роботи, за важкістю, що виконуються в приміщенні цеху, відносять до категорії «Іа». Для даної категорії робіт, у таблиці 6.1 показано прийняті проєктом значення параметрів мікроклімату виробничих приміщень, що проектуються, для холодного та теплого періоду року.

Таблиця 6.1 – Оптимальні та допустимі норми мікроклімату в робочій зоні виробничих приміщень.

В основному виробничому приміщенні розміщено системи кондиціонування. Також присутня загальнообмінна та місцева припливно-витяжна вентиляція. На апаратах з потенційно небезпечними речовинами ведеться контроль гранично допустимої концентрації (ГДК) токсичних парів в повітрі. Для їх відведення використовуються місцеві системи вентиляції.

В випадку аварії передбачена аварійна вентиляція цеху, яка вмикається як при спрацюванні датчиків газоаналізаторів, що налаштовані на величину ГДК контрольованих речовин, так і вручну персоналом.

Крім того, на підприємстві передбачено нормальне функціонування системи опалення приміщення та видача засобів індивідуального захисту для персоналу.

В таблиці 6.2 наведено коротку характеристику цеху у відповідності до ГОСТ 12.1.005.88.

Таблиця 6.2 – Коротка санітарна характеристика проектованого цеху

Таблиця 6.2 – Коротка санітарна характеристика цеху, що проектується (продовження)

Таблиця 6.2 – Коротка санітарна характеристика цеху, що проектується (продовження)

При порушенні технологічної роботи цеху, можливі викиди токсичних речовин. Для цього періодично в цеху проводиться контроль вмісту в повітрі шкідливих речовин. Встановлено термограф та психрометр для безперервного контролю параметрів повітря. На підприємстві передбачено періодичні (один раз на рік) медогляди персоналу. На робочих місцях персоналу з потенційно небезпечними речовинами встановлено аптечки з нейтралізуючими реагентами.

6.1.2 Виробниче освітлення

Для забезпечення нормального освітлення застосовується природне бокове освітлення та штучне загальне освітлення [18].

Згідно з санітарними нормами ДБН В.2.5-28:2018, розряд зорових робіт у виробничому приміщенні відділення – IVв. Для створення комфортних умов зорової роботи персоналу необхідні параметри освітлення, які наведені у таблиці 6.3 [18].

Таблиця 6.3 – Норми штучного освітлення коефіцієнта природної освітленості КПО виробничих приміщень.

Для освітлення цеху використовуються люмінесцентні лампи білого світла типу ЛБ-40. Також присутнє аварійне освітлення, в якому використовуються світильники прямого типу. Для оцінки освітленості у виробничих приміщеннях передбачено фотоелектричний люксметр Ю-117.

Передбачено періодичну чистку вікон та світильників, для нормалізації рівня освітленості в приміщені, та своєчасну заміну непрацюючих ламп.

Крім основного виробничого приміщення, на підприємстві присутній цех для апаратників АСУТП. Площа операторської складає 18 м^2. Параметри кімнати складає: ширина: 3 м; довжина: 6 м; висота: 3 м. Розрахуємо оптимальну кількість світильників для працівників операторської АСУТП.

Для цього використаємо метод світлового потоку. Щоб визначити оптимальну кількість світильників для цеху, розрахуємо значення необхідного світлового потоку:

$$F = \frac{E \cdot K \cdot S \cdot Z}{\eta}$$

де F – необхідний світловий потік, Лм, E = 200 Лк – мінімально необхідна освітленість, S – площа приміщення, що освітлюється (у даному випадку S = 18 м^2), Z = 1.1 – відношення середньої освітленості до мінімальної (обирається в діапазоні 1,1... 1,2), K = 1.5 – коефіцієнт запасу, η – коефіцієнт використання світлового потоку, що характеризується коефіцієнтами відбиття від стін ($\rho_{сн.}$), стелі ($\rho_{сл}$) та підлоги ($\rho_{п}$), значення коефіцієнтів дорівнюють $\rho_{сл}$ = 0,7, $\rho_{сн}$ = 0,5 і $\rho_{п}$ =0,3 [18].

Індекс приміщення розраховується за формулою:

$$I = \frac{S}{h_c \cdot (a + b)} = \frac{18}{1 \cdot (3 + 6)} = 2$$

де h_c = 1 м – висота підвісу світильника над робочою поверхнею.

Виходячи з розрахованого індексу приміщення I знаходимо коефіцієнт використання світлового потоку η = 0,54 [18].

Тоді формула для визначення світлового потоку набуває вигляду:

$$F = \frac{200 \cdot 1{,}5 \cdot 18 \cdot 1{,}1}{0{,}54} = 11000 \text{ Лм}$$

Для освітлення передбачається використання ламп типу ЛБ-40, світловий потік яких складає F = 3120 Лм. Розрахуємо необхідну кількість ламп у світильниках за формулою:

$$N = \frac{F}{F_л} = \frac{11000}{3120} \approx 3{,}52 = 4$$

де N – кількість ламп, що визначається; F – розрахований світловий потік; $F_л$ – світловий потік однієї лампи [18].

В виробничому приміщенні використані світильники типу НОДЛ. Кожен світильник складається з двох ламп, тобто для забезпечення необхідного освітлення необхідно використовувати 2 світильники з 2 лампами [18].

6.1.3 Виробничий шум і вібрація

Джерелами вібрацій та шумів на виробництві є таке устаткування: випарник, реактори, компресор, насоси, сепаратори та ректифікаційні колони.

Виходячи з положень ДСН 3.3.6.037-99, у виробничих приміщеннях рівень звуку не повинен перевищувати 80 дБА. Згідно ДСН 3.3.6.039-99, допустимий рівень вібрації в приміщенні для 1-го ступеня шкідливості – до 3 дБ, для 2-ої ступені шкідливості – до 3,1 дБ, для 3-ї ступені шкідливості - більше 3,1 дБ. Дане виробництво належить до 2-го ступеня шкідливості по вібрації.

Для зменшення рівня шуму передбачено своєчасне проведення ремонтів апаратів та облицювання внутрішніх поверхонь звукопоглинальними матеріалами.

Для зменшення рівня вібрації передбачено установку апаратів на вібраційні опори, які приймають на себе створювану вібрацію. При роботі з сепараторами персоналу видаються засоби індивідуального захисту, які обладнанні вібропоглинальними вставками.

6.1.4 Електробезпека

Проектований цех, відноситься до класу приміщень з підвищеною небезпекою для персоналу у вигляді ураження електричним струмом. Апаратне устаткування в виробничих приміщеннях живиться від трифазної мережі змінного струму з заземленою нейтраллю та напругою 380 В. Вхідна частота мережі складає 50 Гц.

Основними причинами ураження струмом є:

- Дотик працівника до струмопровідної частини обладнання, яка опинилася під напругою внаслідок пошкодження ізоляції;
- Ураження кроковою напругою в результаті короткого замикання проводу на землю.

Часто трапляються випадки випадкового дотику працівника до фази змінного струму. Величина сили струму, що проходить через тіло людини, в момент ураження, розраховується за формулою:

$$I_Л = \frac{U_ф \cdot 10^3}{R_Л + R_0} = \frac{220 \cdot 10^3}{2000 + 4} = 110 \text{ мА};$$

де $I_л$ – струм, який проходить через людину; $R_л$ – опір тіла людини (2…4 кОм); $R_о$ – опір заземленої нейтралі (≈ 4 Ом), $U_ф$ – фазова напруга (220 В).

Напруга дотику, розраховується за формулою:

$$U_д = I_л \cdot R_л = 0{,}11 \cdot 2000 = 220 \text{ В};$$

Отже, як бачимо із порівняння розрахованих значень струму і напруги з гранично допустимими (ГОСТ 12.1.038-82), порушення вимог правил електробезпеки може викликати тяжкі наслідки для здоров’я та життя людини.

Для захисту від ураження та прямого дотику, використовуються огорожі та захист проводки в кабельних гофрах, для уникнення контакту з людиною, огороджувальні захисні засоби (струмоведучі частини знаходяться в спеціальній скрині, шафі, камері), автоматична сигналізація і блокування кришок, дверей устаткування при включеній напрузі.

6.1.5 Безпека технологічних процесів та обслуговування обладнання

На підприємстві є обладнання: теплообмінники, реактори, сепаратори, насоси, компресори, тощо, які можуть нести потенційну небезпеку для персоналу. Для запобігання травматизму, проєктом передбачено наступні заходи:

- Ізоляція тепловиділяючих апаратів спеціальними кожухами;
- Ремонт апаратів, знімання важких частин, супроводжується використанням кран-балки, тим самим зменшується вірогідність травматизму персоналу;
- Ректифікаційні колони оснащені спеціальними підйомними майданчиками, для обслуговування та ремонту;
- Процес розвантаження цільового продукту сконструювано таким чином, щоб місце роботи та траєкторію руху транспорту було добре видно. Кара оснащена світловою сигналізацією роботи;
- Трубопроводи з гарячою водою та токсичними реагентами виведено в огороджену частину приміщення, для запобігання контакту. Виконується регулярна діагностика герметизації труб.
- Для запобігання падіння персоналу, передбачення встановлення огородження перилами висотою до 1 м на площадках проходу людей.

6.2 Пожежна безпека

Причинами пожежі в цеху можуть бути:

- Теплова дія апаратного устаткування;
- Перенавантаження електрообладнання;
- Прямий удар блискавки в будівлю.
- Механічне пошкодження електромережі;

Для запобігання пожежі на підприємстві передбачено: використання плавких запобіжників в системі розподілення електроенергії та спеціальні автомати для автоматичного вимкнення подачі енергії при аварії, використання стрижньових блискавковідводів, для запобігання удару блискавки. Для уникнення перегріву проводів використовуються проводи грубим січення для збільшення площі опору, та пружні контакти в місцях з'єднання. Проводи прокладаються в спеціальних гофрованих трубах.

В спеціально відведених місцях є протипожежні щити з набором пожежогасіння, в яких присутні пінні вогнегасники, ящики з піском. Виробничі приміщення та склад оснащений пожежними кранами з водою. Присутня автоматична система пожежогасіння.

У цеху встановлено газоаналізатор водню для виявлення його витоку, за аварійної ситуації, для запобігання утворення вибухової суміші, вмикається система аварійної вентиляції. Дані про вибухонебезпечні речовини, що присутні в цеху, наведено в таблиці 6.4.

Таблиця 6.4 – Показники пожежо- і вибухонебезпечні речовин і матеріалів.

Таким чином, в результаті дослідження санітарних норм охорони праці на підприємстві, розроблено комплекс заходів, направлених на створення здорових і безпечних умов праці та пожежної безпеки.

ВИСНОВКИ

В даному дипломному проєкті розглянуто процес отримання циклогексанону рідкофазною гідрогенізацією фенолу, виконано комп'ютерне моделювання та автоматизацію технологічного процесу.

- В середовищі проєктування та симуляції CHEMCAD 7.1.5 проведено комп'ютерний розрахунок матеріального балансу технологічної схеми процесу отримання циклогексанону;
- Виконано розрахунок оптимальних налаштувань ПІД-регулятора в середовищі Mathcad 15;
- Розроблено обчислювальний модуль для знаходження оптимальних налаштувань обраного регулятора. Наведене програмне забезпечення створено за допомогою мови програмування JavaScript (ES6);
- Розроблено технологічну схему автоматизації процесу отримання циклогексанону. Підібрані необхідні прилади для виконання спроектованих процесів автоматизації;
- Проведено розрахунок техніко-економічних показників підприємства з виробництва циклогексанону, за яким визначено прибутковість виробництва, та доцільність впровадження засобів автоматизації;
- Розроблено комплекс заходів, направлених на створення здорових і безпечних умов праці та пожежної безпеки з урахуванням вимог охорони праці.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Балансовые расчеты химико-технологических процессов: учеб. пособие. – Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2014. – 136 с.
2. Chemstations Chemcad. URL: https://studopedia.su/7_16619_Chemstations-Chemcad.html. (дата звернення 30.03.2020).
3. Бугаєва Л. М. Системний аналіз хіміко-технологічних комплексів: підручник [Текст] / Л. М. Бугаєва, Т. В. Бойко, Ю. О. Безносик. – К.: «Інтерсервіс», 2017. – 254с.
4. Dimian A. C. Chemical Process Design [Текст] / A. C. Dimian, Bildea C.S. – M.: WILEY-VCH – 2008. – 46с.
5. Остапенко Ю. О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування: Підручник для студентів ВНЗ напрямку підготовки 050202 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології"– К.: Задруга, 1999. – 424 с.: Іл. – Бібліогр. в кінці розділі.
6. Теорія автоматичного керування: метод. вказівки і завд. до викон. домашньої контр. роб. та самостійної роботи для студ. напр. підг. 6.050202 "Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології" [Текст]. За ред. С.Г. Бондаренко, О.В. Сангінова, Київ, 2013 – 102 с.
7. Автоматизація виробництва - Вікіпедія. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%B2%D1%82%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B8%D0%B7%D0%B0%D1%86%D1%96%D1%8F_%D0%B2%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B1%D0%BD%D0%B8%D1%86%D1%82%D0%B2%D0%B0. (дата звернення 31.05.2020).
8. Автоматизация в химической промышленности. URL: https://www.chemistry-expo.ru/ru/articles/2016/avtomatizaciya-himicheskoj-promyshlennosti/. (дата звернення 01.06.2020).
9. Ультразвуковой расходомер счетчик жидкости US-800, теплосчетчики ЭНКОНТ, датчики расхода и водомеры. Приборы учета воды и тепла для водомерных узлов и тепловых узлов учета. URL: http://www.us800.ru/. (дата звернення 02.06.2020).

10. OPTISONIC 7300 | KROHNE Украина. URL: https://ua.krohne.com/ru/pribory/izmerenie-raskhoda/raskhodomery/ultrazvukovye-raskhodomery/optisonic-7300/. (дата звернення 02.06.2020).
11. TPM10 ПИД-регулятор с универсальным входом. URL: https://owen.ru/product/trm10. (дата звернення 02.06.2020).
12. МЭО-40/63-0,25-90 Механизм электроисполнительный однооборотный. URL: http://www.tps21.ru/magazin/ispolniteljnye-mehanizmy/mehanizmy-meo/meo-40/meo-40-63-0-25-90.html. (дата звернення 02.06.2020).
13. Преобразователь давления PC-28 | СООО «АПЛИСЕНС». URL: https://www.aplisens.by/catalog/datchik-davleniya-pc-28/. (дата звернення 02.06.2020).
14. Лампа сигнальная ЛС-47 неон зеленая IEK. URL: https://www.iek.ru/products/catalog/modulnoe_oborudovanie/dopolnitelnye_modulnye_ustroystva/dopolnitelnye_ustroystva_modulnoy_serii/signalnye_lampy/lampa_signalnaya_ls_47_neon_zelenaya_iek. (дата звернення 02.06.2020).
15. Термопреобразователь ТСМ-1187, ТСП-1187 купить в Москве - "ООО Термопара". URL: https://termopara.org/pribor/termopreobrazovatel-tsm-1187-tsp-1187. (дата звернення 02.06.2020).
16. Емкостной уровнемер CLM-36. URL: http://kontech-system.com.ua/uroven/izmeriteli-urovnya-nepreryvnogo-deystviya/emkostnoy-urovnemer-clm-36.html. (дата звернення 02.06.2020).
17. Магнитный пускатель Этал ПМЛ-3720 О*2Б 40А 220В РТЛ-2057 IP54 звезда/треугольник (ЭТАЛ0002160) купить в Киеве в интернет-магазине | ELTRON. URL: https://eltron.com.ua/ru/magnitnyy-puskatel-etal-pml-3720-o2b-40a-220v-rtl-2057-ip54-zvezda-treugolnik. (дата звернення 02.06.2020).
18. 4.2. Виконати розрахунок світлового потоку ламп, що забезпечують нормативну штучну освітленість в приміщенні. URL: https://studfile.net/preview/6329374/page:14/. (дата звернення 04.06.2020).